

УДК 51.74

Влияние расположения заградительных экранов на характеристики переноса газовой примеси в окрестности автомагистрали*

С.А. Лаврук, С.А. Вальгер

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: lavruks@mail.ru; valger@itam.nsc.ru

Настоящая работа направлена на изучение подходов к численному моделированию задач переноса вредных выбросов от низких источников загрязнения в окрестности автодороги. Рассмотрена модельная задача, соответствующая экспериментальным данным [22] об инъекции этана через систему низких источников, расположенных на подложке, имитирующей автодорогу. Проведено исследование влияния турбулентного числа Шмидта на процессы турбулентного перемешивания газов в окрестности системы плохообтекаемых тел. В рамках численного моделирования исследованы различные конфигурации расположения заградительных экранов и дана оценка наиболее эффективных конфигураций с точки зрения удаления примеси этана из пешеходных зон в окрестности автодороги. Выполнено качественное и количественное сравнение с данными эксперимента по профилям концентрации примеси в характерных сечениях.

Ключевые слова: микромасштабные модели аэродинамики, загрязнение воздуха, автомобильный транспорт, компьютерное моделирование, модели турбулентности.

Введение

Одним из важнейших критериев оценки состояния окружающей среды является качество атмосферного воздуха, в составе которого присутствуют вещества-загрязнители в виде газов и аэрозолей. Загрязняющие вещества в воздухе, такие как газообразные примеси диоксида углерода, оксидов азота, диоксида серы, бенз(а)пирена, аэрозоли с частицами сажи и соединений тяжелых металлов, минеральных и органических соединений, большей частью имеют антропогенное происхождение. По данным [1] основными источниками эмиссий в воздухе крупных городов являются промышленность, теплоэнергетика и транспорт. Выбросы вредных веществ от высоких источников промышленных производств сегодня строго регламентированы и контролируются как на стадии проектирования объектов предприятий, так и в ходе их эксплуатации. Более неопределенным вопросом является оценка и контроль за выбросами от низких источников и, в частности, от автотранспорта. Загрязнение воздуха газами и аэрозолями, выбрасываемыми в атмосферу при работе автотранспорта, сегодня приобретает серьезные масштабы, что ставит новые вызовы перед экологами, специалистами по градостроительству, инженерами и учеными. В отличие от промышленных источников выбросов, перенос эмиссий от автотранспорта носит более локальный характер. Высокие концентрации

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00755 А).

опасных загрязняющих веществ могут наблюдаться в окрестности зданий, автодорог и в пешеходных зонах. Плотная застройка городов, наличие высотных зданий и отсутствие системного планирования застройки территорий, с одной стороны, и большая нагрузка на транспортную инфраструктуру — с другой приводят к снижению продуваемости территорий, возникновению локальных зон высоких концентраций примесей, ухудшению качества воздушной среды и снижению качества жизни и здоровья населения.

Сегодня наравне с инструментами атмосферного мониторинга и контроля за уровнем концентраций газовых эмиссий и аэрозолей в воздухе активно используются методы математического и статистического анализа и методы численного моделирования для описания и прогноза процессов переноса, трансформации и фильтрации примесей в приземном слое атмосферы. Так, совместно с данными атмосферного мониторинга в настоящее время активно используются системы прогноза загрязнения (GFS, WRF) [2]. Однако, как правило, такие системы работают с макро- и мезомасштабными течениями и не позволяют оценивать локальные эффекты переноса загрязнителя в городском ландшафте. Еще один метод, ориентированный на практическое применение в области прогнозирования вредных выбросов в атмосфере, основан на полуэмпирической модели ASHRAE [3] и разработан с учетом экспериментальных данных, полученных в аэродинамической трубе [4, 5]. Однако модель неприменима для сложного городского ландшафта, т.к. не позволяет оценить детальную структуру течения в окрестности систем плохообтекаемых тел.

Одним из перспективных направлений развития математических моделей применительно к задачам о переносе вредных примесей в сложной застройке является создание методик, основанных на решении полных трехмерных уравнений механики сплошных сред и позволяющих выполнить сценарное моделирование переноса примеси от серии низких источников вблизи зданий и сооружений в широком диапазоне геометрических параметров [6–20]. В работах [15–18] предлагались модели, позволяющие оценить концентрацию выбросов от линейных источников около дорог. В исследованиях [15, 16] для описания массопереноса вдоль автодорог в ряде городов США применялась модель RLINE, предназначенная для оценки рассеивания загрязняющих веществ от мобильных источников. Полученные результаты сравнивались с данными натурных замеров для данных территорий. В работе [17] была проведена оценка параметров течения около участка, соответствующего части дорожного полотна, в условиях различного расположения этого полотна относительно основного высотного уровня застройки. Авторами [19, 20] было выполнено трехмерное численное моделирование течения воздуха в различных конфигурациях городского каньона для оценки расположения застойных зон около зданий и определения наиболее загрязненных из этих зон. Так, в работе [19] численное моделирование течения воздуха в условиях плотной городской застройки проводилось для одного из районов г. Мельбурна, а в работе [20] использовалось трехмерное параметрическое моделирование придорожных территорий при различных геометрических параметрах автодороги. В работе [8] приведен детальный обзор существующих численных моделей и схем, применяющихся для описания течений в городских каньонах. В [9] оценивался вклад в модель турбулентности, обусловленный разными размерами автомобилей. Авторами [10] был предложен способ параметризации турбулентности, вызванной движением автотранспорта, для применения в прикладных расчетах. Работы [11, 12] посвящались исследованию аэродинамики микрорайонов сложной архитектуры и исследованию влияния режимов термической стратификации пограничного слоя на параметры турбулентного переноса примеси.

Таким образом, на примере перечисленных работ видно, что численное моделирование, основанное на полных трехмерных уравнениях механики сплошных сред, позволяет получить структуру течения в окрестности городского ландшафта, оценить поле

концентраций газа в воздушной среде, провести параметрическое моделирование для оценки различных архитектурных решений и расположения малых архитектурных форм и зеленых зон. Однако численные модели требуют тщательной валидации на наборе экспериментальных данных. Задача о переносе эмиссии от автотранспорта в городской застройке, с одной стороны, характеризуется существенной неопределенностью входных данных, включая данные о направлении и скорости ветра, температурном режиме и составе среды, параметрах источников примеси и т.д. С другой стороны, при ее решении требуется тестирование численных методик с целью выбора численных моделей и их калибровки. В работе [21] был приведен обзор экспериментальных работ в аэродинамических трубах, направленных на исследование течений воздуха в условиях городских застроек и описание зон течений за плохообтекаемыми телами, опасных с точки зрения скопления тяжелых выхлопных газов. Работы [21, 22] посвящались экспериментальным исследованиям процессов переноса и осаждения газовой примеси в воздухе в окрестности тестовых конфигураций автодорог. Авторами [22] экспериментально исследовалось влияние конфигурации придорожной инфраструктуры на распространение вредных эмиссий при направлении ветра перпендикулярно дороге.

Настоящая работа направлена на изучение подходов к численному моделированию задач переноса вредных выбросов от низких источников в окрестности автодороги. Рассматривается задача, соответствующая экспериментальным данным [22] об инжекции этана через систему низких источников, расположенных на подложке, имитирующей автодорогу. В рамках численного моделирования на задаче обтекания системы низких плохообтекаемых тел (без учета заградительных экранов) проведено тестирование влияния турбулентного числа Шмидта на процессы турбулентного перемешивания газов различной плотности в окрестности подложки. На втором этапе исследовались различные конфигурации расположения заградительных экранов (с наветренной стороны, с подветренной стороны и с обеих сторон дороги) и получены оценки наиболее эффективных конфигураций с точки зрения удаления примеси этана из пешеходных зон в окрестности автодороги. В ходе работы также проведено качественное и количественное сравнение с данными [22] по профилям концентрации в характерных сечениях.

1. Постановка задачи

Рассмотрим модельную задачу, исследованную экспериментально в работе [22], которая описывает в масштабе 1:150 фрагмент автомагистрали. В [22] набор призм квадратного сечения, имитирующих автомобили на автодороге, располагался на плоской подложке. С подветренной стороны каждой призмы на подложке находился инжектор круглого сечения, через который в исследуемую область подавался газ этан (C_2H_6). В эксперименте рассматривались различные варианты заглубления фрагмента автодороги относительно уровня подложки, а также несколько конфигураций расположения заградительных экранов вдоль автодороги. В качестве исследуемого параметра измерялись концентрации этана вдоль нескольких характерных вертикальных и горизонтальных линий в следе за полотном автодороги. В настоящей работе для численного исследования выбрано несколько конфигураций автодороги, отличающихся расположением заградительных экранов. На рис. 1а, 1б приведена схема расчетной области для базовой конфигурации автодороги без учета заградительных экранов (далее — конфигурация 1).

Фрагмент полотна автомагистрали (рис. 1б) имеет размеры $0,24 \text{ м} \times 0,48 \text{ м}$. На полотне расположено шесть параллельных полос инжекторов этана радиусом $r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ и шесть полос призм квадратного сечения с характерным поперечным размером $b = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и высотой $h = 2b$. Расстояние от подветренной стороны призмы до центра инжектора в каждой паре составляет $l = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В расчетах рассматривается геометрическая

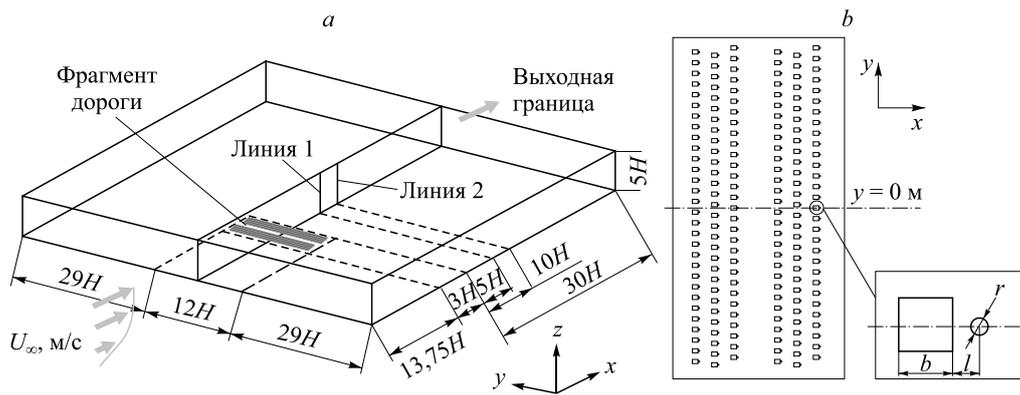


Рис. 1. Схема расчетной области (а) для конфигурации 1 и фрагмент исследуемой автодороги в плане (b).

область размером $46,75H \times 70H \times 5H$. Другие рассматриваемые конфигурации (далее конфигурации 2, 3 и 4) отличаются от базовой наличием заградительного экрана высотой $H = 4 \cdot 10^{-2}$ м.

Расположение заградительных экранов схематически показано на рис. 2. Здесь базовая конфигурация 1 не включает заградительных экранов, конфигурация 2 соответствует расположению экрана на наветренной стороне автодороги, конфигурация 3 — расположению экрана на подветренной стороне автодороги, а конфигурация 4 включает два экрана по обе стороны дорожного полотна.

На вход в расчетную область поступает воздух. Средняя скорость набегающего потока на высоте H составляет $U_H = 1,4$ м/с. Число Рейнольдса набегающего потока по высоте экрана H при скорости U_H составляет $Re_{U_H} = 3,8 \cdot 10^3$. Через набор инжекторов круглого сечения, расположенных на плоской подложке, в область поступает газ этан с массовым расходом $1500 \text{ см}^3/\text{мин}$. Эксперименты, описанные в работе [22], выполнялись при нормальных температурных условиях, вследствие чего в работе рассматривается задача в изотермической постановке.

2. Математическая модель и численные методы

Численное моделирование задачи о переносе этана над автомагистралью проводится на основе стационарных осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений Навье–Стокса для двухкомпонентной среды «воздух–этан», дополненных уравнениями двухпараметрической модели турбулентности $k-\epsilon$ Realizable [23] с коррекцией Ментера–Лехнера [24] в пристеночной зоне. Многочисленные валидационные тесты, проведенные в работах [25, 26], показывают, что низкорейнольдсовая модификация $k-\epsilon$ модели Realizable достаточно хорошо предсказывает характерные особенности течения в окрестности отдельно расположенных плохообтекаемых тел, имитирующих элементы зданий.

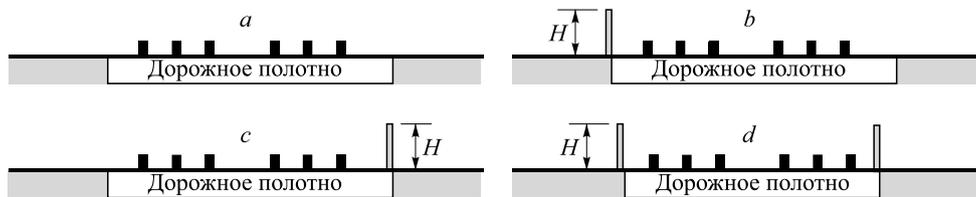


Рис. 2. Схемы расположения заградительных экранов для конфигураций 1 (а), 2 (b), 3 (c) и 4 (d) в соответствии с экспериментами [22].

Таким образом, рассматривается модель двухкомпонентной среды, в которой локальные значения массовой доли этана рассчитываются на основе уравнения конвекции-диффузии:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i, \quad (1)$$

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i, \quad (2)$$

где ρ — плотность среды, \vec{v} — скорость, Y_i — массовая доля i -го компонента, $D_{i,m}$ — коэффициент массовой диффузии i -го компонента, μ_t — турбулентная вязкость, Sc_t — турбулентное число Шмидта.

Для описания граничного условия скорости на входной границе расчетной области используется логарифмический профиль

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right), \quad (3)$$

где $u_* = 0,3$ м/с — динамическая скорость, $k = 0,4$ — константа Кармана, $z_0 = 0,0072$ м — шероховатость подложки.

На рис. 3 показаны замеренные в эксперименте [22] средние скорости течения на входе (символы) и профиль скорости (линия), полученный из выражения (3) и используемый в настоящих расчетах. Наблюдается хорошее соответствие данных в диапазоне высот $0,1 \div 0,5$ м.

Для описания параметров турбулентности k и ε на входе в расчетную область использовались соотношения [27]

$$k = \frac{1}{2} \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{kz}, \quad (5)$$

где $C_\mu = 0,09$.

Для набора инжекторов выбрано граничное условие с постоянным суммарным массовым расходом этана $3,15 \cdot 10^{-5}$ кг/сек, интенсивностью турбулентности $I_j = 2\%$ и характерным турбулентным масштабом $l_t = 10^{-3}$ м.

На верхней и боковых границах расчетной области используется условие симметрии, на выходе из расчетной области задано условие постоянства статического давления $\Delta P = P_{ст} - P_0 = 0$ атм. На подложке и стенках препятствий задано условие прилипания.

Для решения системы уравнений, описывающих течение несжимаемой двухкомпонентной среды, использован метод конечных объемов на неструктурированной расчетной сетке. В рамках предварительного исследования сеточной сходимости для конфигурации 1 было получено решение на трех расчетных сетках с характерными размерами сеточных элементов

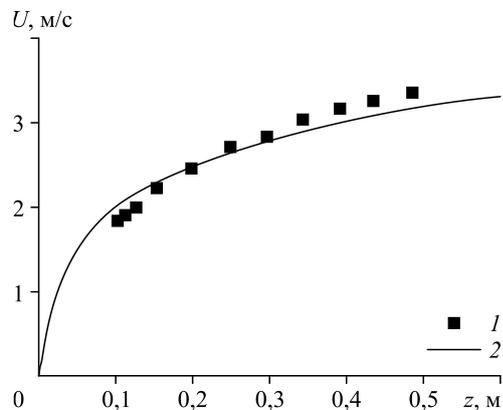


Рис. 3. Профили скорости на входе в исследуемую область.

Данные эксперимента [22] (1) и профиль (2), полученный по выражению (3).

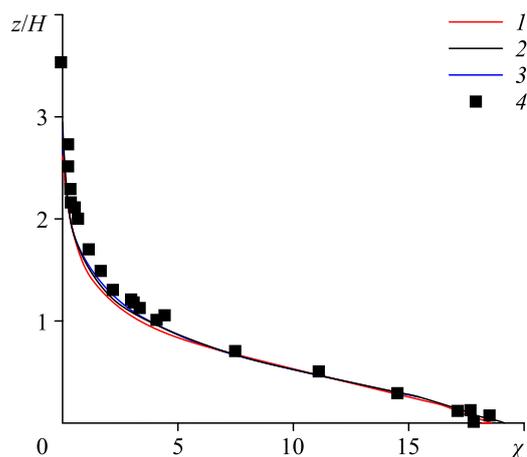


Рис. 4. Профили безразмерной концентрации χ по высоте вдоль линии 1 (см. рис. 1), полученные в эксперименте [22] (4) и в расчетах с $Sc_t = 0,55$ на сетках с характерным размером элемента ≈ 16 (1), 8 (2) и 4 (3) мм соответственно.

в окрестности автомагистрали и в следе за ней ≈ 16 мм (сетка 1), 8 мм (сетка 2) и 4 мм (сетка 3) соответственно. Сравнение результатов расчетов на трех сетках между собой и с экспериментальными данными [22] проведено по профилям безразмерной концентрации этана, построенным вдоль вертикальной линии 1 (см. рис. 1а; $y = 0$ м, $x = 0,2$ м), расположенной вниз по потоку за автомагистралью. Безразмерная концентрация этана в работе [22] рассчитывалась как

$$\chi = \frac{CU_r}{Q/L_x L_y}, \quad (6)$$

где C — массовая концентрация этана [–], $U_r = 2,46$ м/с — скорость; $L_x = 0,24$ м, $L_y = 0,48$ м — характерные линейные размеры, $Q = 1500$ см³/мин — суммарный расход этана через инжекторы. На рис. 4 показаны профили безразмерной концентрации этана по высоте вдоль линии 1, рассчитанные на трех сетках, а также профиль, полученный в эксперименте [22].

Исследование сеточной сходимости показало, что решение на сетках с размерами элементов ≈ 8 мм (сетка 2) и 4 мм (сетка 3) не имеет существенных различий. Для последующих расчетов, описываемых в работе, использовалась сетка 2 с размером элемента ≈ 8 мм. Сетка включала 11 миллионов элементов тетраэдральной формы. Вблизи границ расчетной области, описываемых граничным условием стенки, расчетная сетка включала 15 призматических слоев. Расстояние от стенки до первого узла сетки выбиралось таким образом, чтобы безразмерный параметр y_+ удовлетворял условию $y_+ \leq 1$. Соотношение характерных размеров соседних элементов в модели не превышало 1,2.

Для согласования поля давления и поля скорости при решении уравнений использован алгоритм совместного расчета скорости и давления на основе неявной связи уравнений сохранения импульса и уравнения неразрывности (Coupled pressure-based method) [28]. Для аппроксимации конвективных членов уравнений использована MUSCL-схема с третьим теоретическим порядком точности. Сходимость решения в расчетах обеспечена выполнением условия достижения абсолютных значений невязок по всем искомым переменным 10^{-4} . В качестве расчетной среды использован решатель ANSYS Fluent 2020R1.

3. Обсуждение результатов

3.1. Влияние турбулентного числа Шмидта на характеристики перемешивания

Численное моделирование турбулентного течения двухкомпонентной газовой среды в геометрически сложной расчетной области требует калибровки констант модели. В работе [14] было показано, что стандартные значения турбулентного числа Шмидта $Sc_t = 0,7$, характеризующего соотношение влияния молекулярных процессов переноса количества движения и переноса массы примеси диффузией, в ряде задач не позволяют

корректно описать поле концентрации примеси. На первом этапе представленной работы для базовой конфигурации 1 (рис. 2а), изученной экспериментально в [22], выполнено параметрическое исследование влияния числа Шмидта на характеристики переноса примеси. Рассматривались три расчетных случая: для значений числа Шмидта $Sc_t = 0,7, 0,6, 0,55$.

Базовая конфигурация 1 (рис. 2а) представляет собой фрагмент автодороги, расположенный на одном высотном уровне с подложкой и включающий систему плохообтекаемых тел, имитирующих автомобили, а также систему инжекторов, расположенных за телами. На рис. 5 показана структура течения в окрестности автодороги за плохообтекаемым телом, полученная в расчетах с числом Шмидта $Sc_t = 0,7$. Набегающий поток срывается с верхних кромок первого ряда призм, обтекая систему препятствий как единое целое. Призмы квадратного сечения расставлены в шахматном порядке, вследствие чего между телами формируются локальные зоны 1 ускорения потока (рис. 5а). За телами формируются отрывные зоны 2 (рис. 5а, 5с), куда подается инжектируемый с подложки этан. Структура течения в окрестности системы призм квадратного сечения хорошо согласуется с данными [12]. Линии тока, описывающие траекторию переноса этана (рис. 5б, 5д) показывают, что инжектируемый газ, попадая в отрывную зону за призмой, циркулирует в области 3 и затем сносится вниз по потоку.

На рис. 6 показано сравнение профилей безразмерной концентрации χ вдоль линий 1 ($y = 0$ м, $x = 0,2$ м, рис. 1а) и 2 ($y = 0$ м, $x = 0,6$ м, рис. 1а), рассчитанных с числами

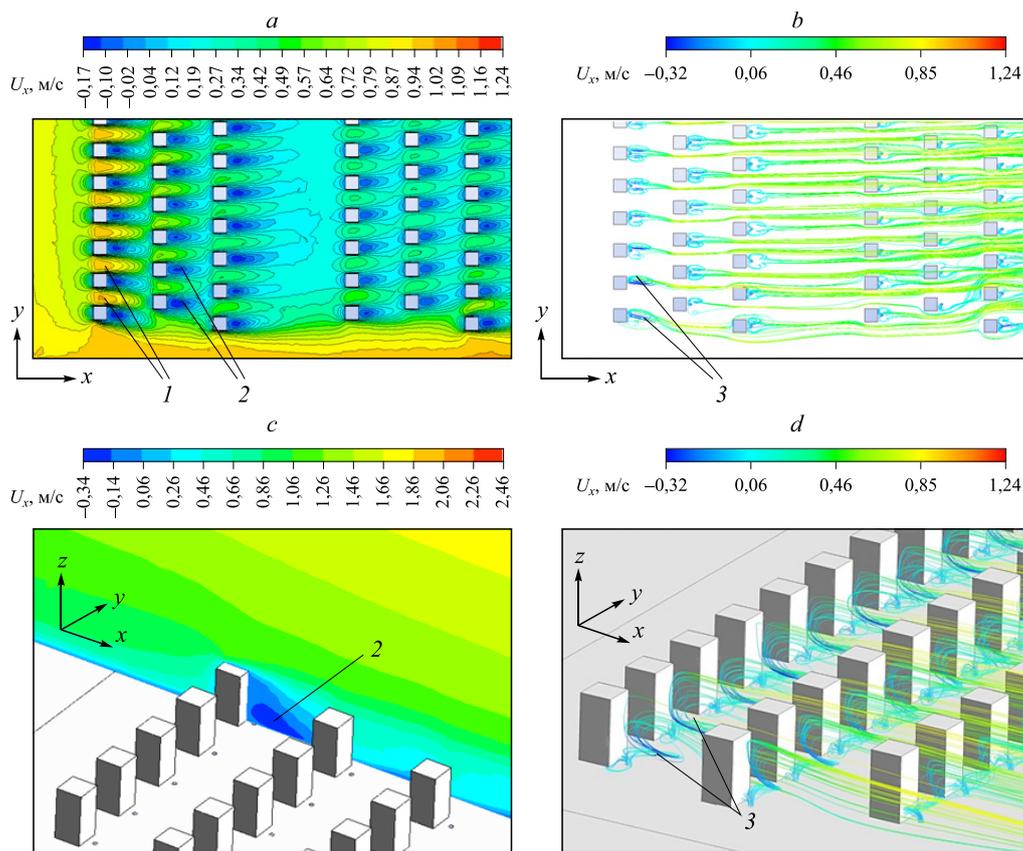


Рис. 5. Поле скорости U_x в горизонтальном сечении $z = h/2$ (а) и в вертикальном сечении $y = 0$ (с) и линии тока, описывающие траекторию переноса этана, в плане (б) и в изометрии (д).

1 — зона ускорения потока, 2 — отрывная зона, 3 — зона циркуляции инжектируемого газа.

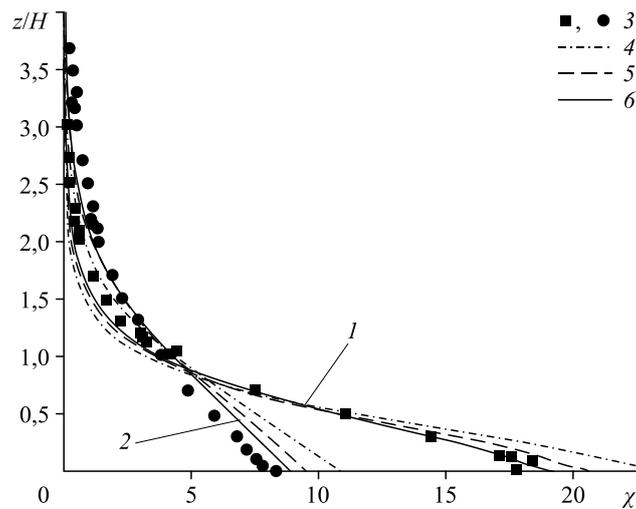


Рис. 6. Профили безразмерной концентрации χ по высоте вдоль линий 1 (1) и 2 (2), полученные в эксперименте [22] (3) и в расчетах с числами Шмидта $Sc_t = 0,7$ (4), $0,6$ (5), $0,55$ (6).

Шмидта $Sc_t = 0,7, 0,6, 0,55$ (кривые) и полученных в эксперименте [22] (символы). Все три случая качественно описывают профиль концентрации по высоте. Для расчетных случаев ($Sc_t = 0,7$ и $Sc_t = 0,6$) наблюдается существенное завышение концентраций вблизи подложки по сравнению с экспериментальными данными. Так, рассчитанные концентрации этана вблизи подложки для линии 1 составляют $\chi = 23,4$ и $20,6$ для $Sc_t = 0,7$ и $0,6$ соответственно, в то время как в эксперименте в данном сечении $\chi \approx 18,4$. Для расчетного случая $Sc_t = 0,55$ наблюдается хорошее количественное согласование с данными эксперимента по концентрациям этана вблизи подложки ($\chi \approx 19,1$). Аналогично результатам, полученным для линии 1, максимальные концентрации этана для линии 2 наблюдаются вблизи подложки и составляют $\chi \approx 10,9$ ($Sc_t = 0,7$), $\chi \approx 9,6$ ($Sc_t = 0,6$), $\chi \approx 8,9$ ($Sc_t = 0,55$), $\chi \approx 8,3$ [22]. Для случая $Sc_t = 0,55$ в расчетах также наблюдается хорошее соответствие с данными эксперимента по наполненности профилей концентрации этана на участке $H < z < 3H$. Таким образом, для дальнейших расчетов предлагается использовать калибровку по числу Шмидта $Sc_t = 0,55$.

3.2. Исследование влияния расположения заградительных экранов на распределение концентраций этана в окрестности автодороги

Трехмерное численное моделирование, основанное на решении уравнений механики сплошных сред, позволяет получить подробные данные о структуре течения и описать ее характерные особенности. Рассмотрим структуру течения этан-воздушной среды в окрестности автомагистрали и препятствий для конфигураций 2 – 4. На рис. 7 показаны векторные поля скорости в горизонтальном сечении XY ($z = h/2$) для расчетных конфигураций 2 (a), 3 (b) и 4 (c). В случае конфигурации 2 (рис. 7a) набегающий поток срывается со стенки, расположенной перед фрагментом автомагистрали. Наиболее высокая скорость в потоке ($U_{2,max} = 1,16$ м/с) наблюдается в зоне поджатия потока 1. Далее поток частично затекает в зону автодороги и устремляется к подветренной стороне препятствия. За препятствием формируется протяженная зона рециркуляции 2, длина которой в центральном сечении составляет $l_{2,r} = 6,4H$. В случае конфигурации 3 (рис. 7b) препятствие расположено за автодорогой. Набегающий поток обтекает систему плохообтекаемых

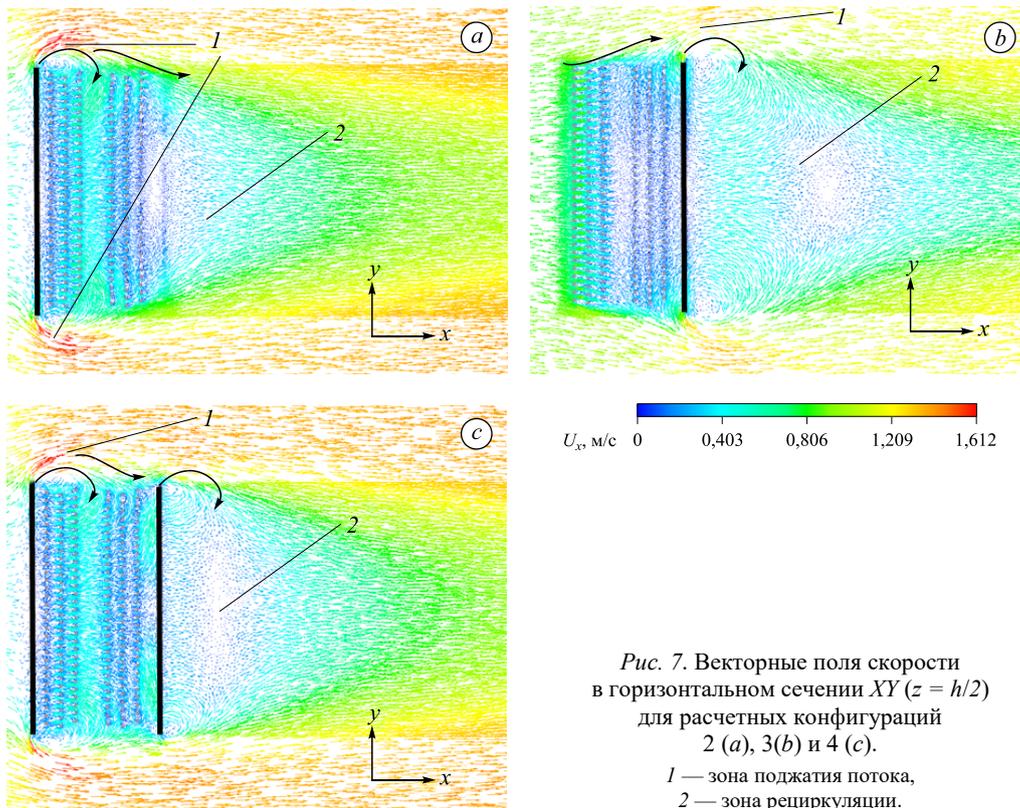


Рис. 7. Векторные поля скорости в горизонтальном сечении XY ($z = h/2$) для расчетных конфигураций 2 (a), 3(b) и 4 (c).
 1 — зона поджатия потока,
 2 — зона рециркуляции.

тел на подложке как единое целое и далее срывается с верхней и боковых кромок препятствия. Наиболее высокая скорость в потоке ($U_{4,\max} = 1,33$ м/с) наблюдается в зоне 1. За препятствием также формируется зона рециркуляции 2 с длиной в центральном сечении $l_{3,r} = 7H$. Конфигурация 4 представляет собой комбинацию конфигураций 2 и 3. В этом случае, как и для конфигурации 2, максимальная скорость потока наблюдается над зоной 1 срыва потока с боковых и верхней кромок первого препятствия ($U_{4,\max} = 1,61$ м/с). За первым препятствием формируется зона рециркуляции. При этом поток, срывающийся с боковых кромок препятствия, затекает в зону автодороги и разворачивается в сторону подветренной стороны первого препятствия. Также здесь можно наблюдать срыв потока с кромок второго препятствия и протяженную отрывную зону 2, длиной $l_{4,r} = 3H$ за ним.

Рассмотрим поведение концентрации этана для расчетных конфигураций 1–4. Для описания формы облака этана в следе за автодорогой в зависимости от конфигурации препятствий для всех расчетных случаев были построены изоповерхности для безразмерной концентрации этана $\chi = 6$ (рис. 8), а также поля безразмерных концентраций этана в характерном вертикальном xz ($y = 0$ м) (рис. 9) и горизонтальном xy ($z = 1/4H$) (рис. 10) сечениях. Для количественного сравнения конфигураций 1–4 длины и высоты шлейфа примеси, полученные на основе анализа изоповерхности для $\chi = 6$, обезразмеривались на характерный линейный масштаб H для всех конфигураций. Для конфигурации 1 облако имеет плоскую, вытянутую в продольном направлении вдоль подложки форму. Концентрация этана $\chi = 6$ наблюдается в окрестности автодороги и в следе за автодорогой. При этом максимальная высота, на которую поднимается облако, составляет $h_{1,g} = 0,75H$. Форма облака в этом случае обусловлена отсутствием препятствий. Анализируя форму облака для конфигурации 1, можно сделать вывод, что при отсутствии загрязнительных

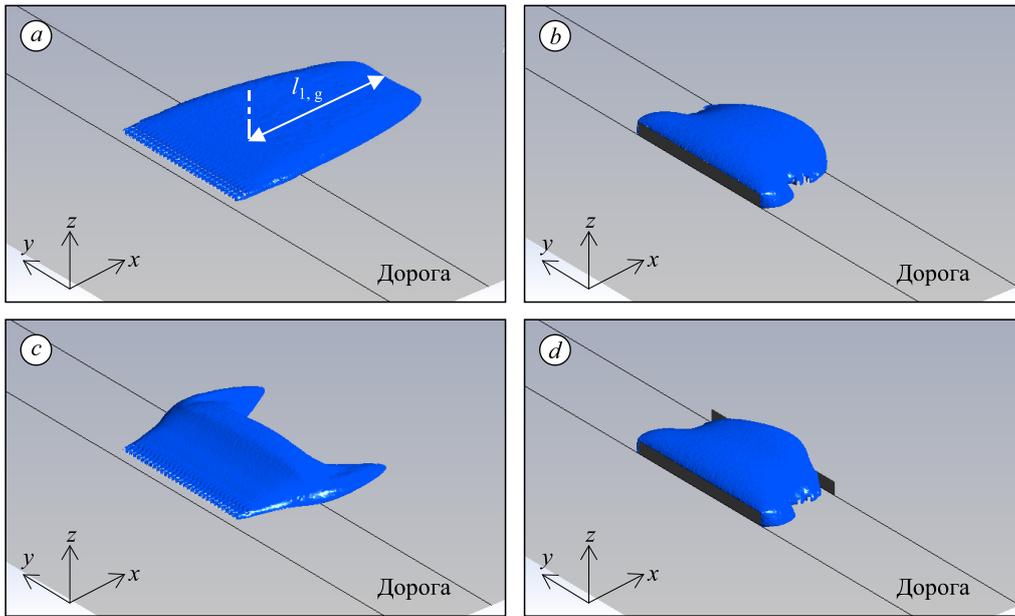


Рис. 8. Изоповерхности, построенные для безразмерной массовой концентрации этана $\chi = 6$ для расчетных конфигураций 1 (a), 2(b), 3(c) и 4 (d).

экранов в окрестности автодороги газ-загрязнитель не поднимается высоко над дорогой. При этом концентрации загрязнителя могут наблюдаться в пешеходных зонах даже на достаточно большом расстоянии от автодороги ($l_{1,g} \approx 10H$). Для конфигурации 2 наибольшие концентрации этана наблюдаются в окрестности автодороги — в рециркуляционной зоне, расположенной за заградительным экраном (рис. 10b). Внешний поток затекает в зону рециркуляции за препятствием и увлекает газ-загрязнитель к подветренной стороне экрана. За счет размещения заградительного экрана перед полотном автодороги облако этана поднимается выше ($h_{2,g} = 1,6H$), однако наиболее высокие концентрации этана наблюдаются в пределах автодороги и не распространяются существенно вниз по потоку. В случае конфигурации 3 этан вместе с внешним потоком увлекается вниз по потоку за автодорогой, разворачивается перед экраном и распространяется в зонах, расположенных в окрестности боковых кромок экрана (рис. 10c). Видно, что этан скапливается в зоне перед экраном. Для конфигурации 4 характерно формирование облака высоких концентраций этана в зоне автодороги между экранами (рис. 10d). Характер распространения газа соответствует описанному в конфигурации 2, однако за счет наличия второго заградительного экрана облако менее вытянуто в продольном направлении (рис. 9d, 10d).

Для количественной оценки влияния заградительных экранов на характер переноса примеси в окрестности автодороги рассмотрим профили безразмерной концентрации χ в характерных горизонтальных и вертикальных сечениях. Также проведем сравнение полученных в расчетах результатов с экспериментальными данными [22]. Для конфигураций 2–4 на рис. 11a–11c соответственно показаны экспериментально полученные профили безразмерной концентрации χ по высоте вдоль линии 1 и вдоль линии 2, а также профили, полученные в расчетах. Сравнив численные и экспериментальные данные, можно видеть, что результаты численного исследования (кривые) и данные эксперимента [22] (символы) хорошо коррелируют между собой практически во всем диапазоне высот. Однако для конфигурации 3 уровень концентрации этана занижен по всей высоте сечения. Это можно объяснить тем, что в ближнем следе для данной конфигурации линия 1 попадает в зону сильной рециркуляции за препятствием, в которой уровень

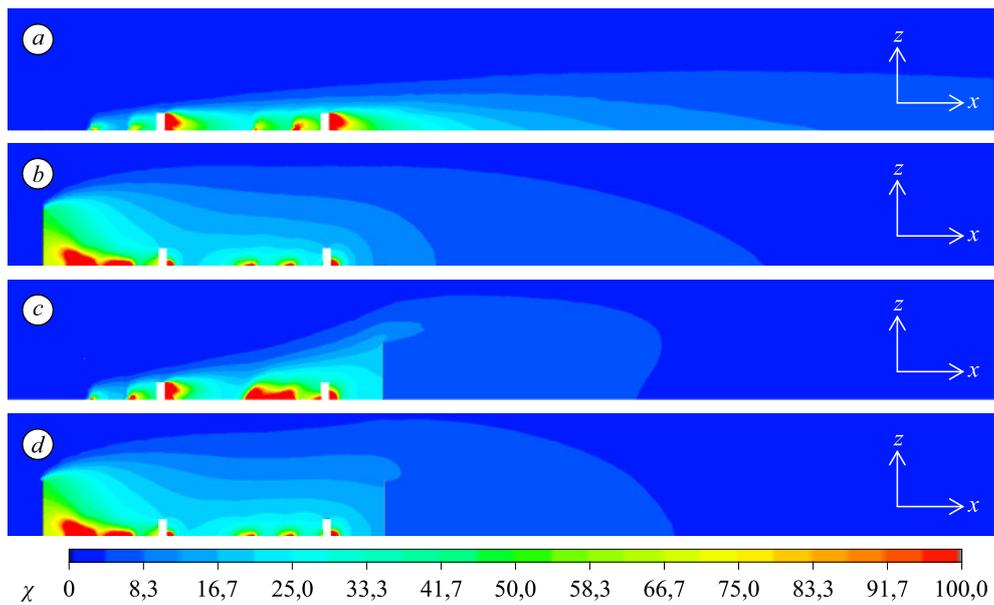


Рис. 9. Поля безразмерной массовой концентрации этана в центральном сечении xz ($y = 0$ м) для расчетных конфигураций 1 (a), 2 (b), 3 (c) и 4 (d).

турбулентной кинетической энергии в рамках RANS-подхода не предсказывается с необходимой точностью [12].

На рис. 12 представлены соотношения расчетных нормализованных концентраций этана χ_i/χ_1 для конфигураций $i = 2, 3, 4$, построенных в плоскости XZ вдоль линий $z = 0, 0,02, 0,04, 0,08$ м. Приведенные здесь профили построены аналогично данным эксперимента [22] и позволяют дать оценку эффективности расположения экранов вдоль автодороги

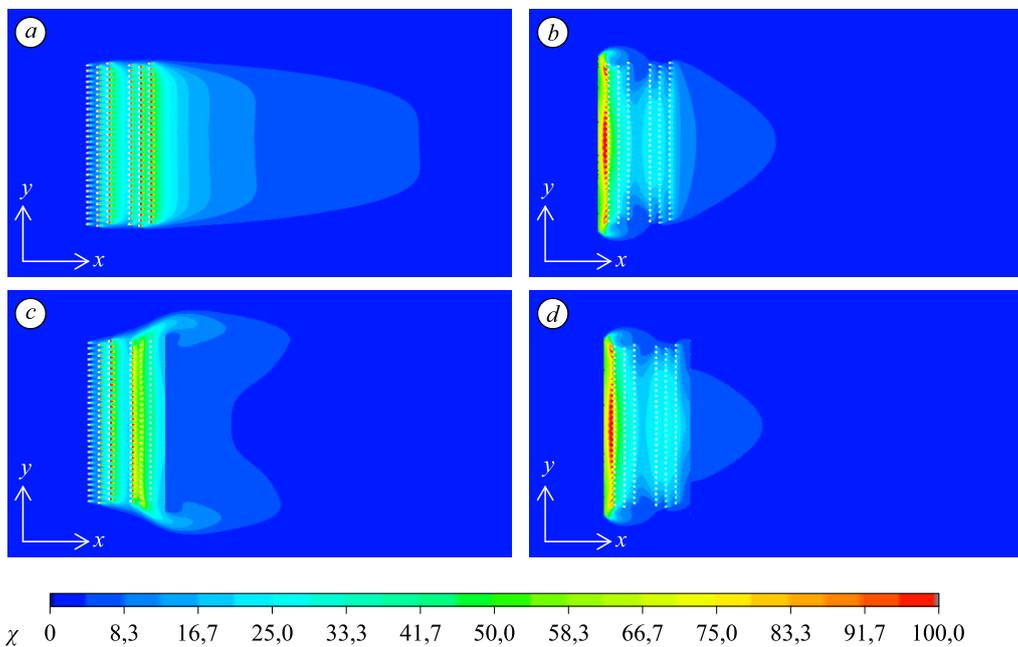


Рис. 10. Поля безразмерной массовой концентрации этана в горизонтальном сечении xy ($z = 1/4H$) для расчетных конфигураций 1 (a), 2 (b), 3 (c) и 4 (d).

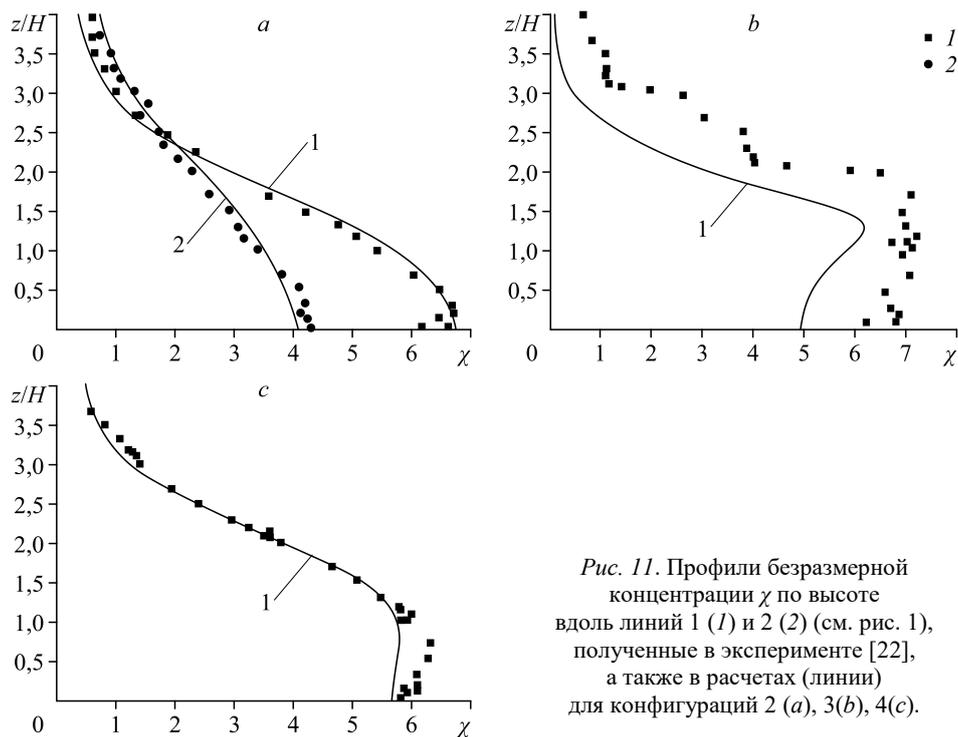
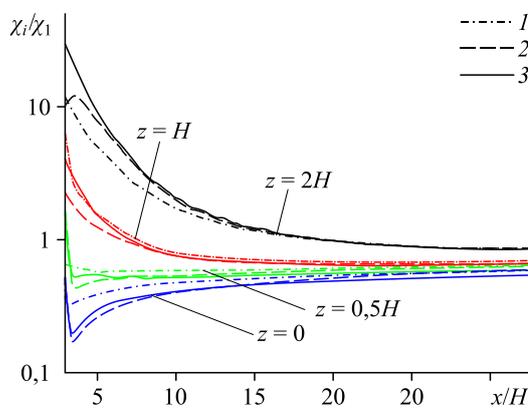


Рис. 11. Профили безразмерной концентрации χ по высоте вдоль линий 1 (1) и 2 (2) (см. рис. 1), полученные в эксперименте [22], а также в расчетах (линии) для конфигураций 2 (a), 3(b), 4(c).

по сравнению со случаем 1, когда заградительные экраны отсутствуют. Как видно из рисунка, на небольшой высоте, соответствующей расположению пешеходных зон, все конфигурации расположения экранов являются более эффективными по сравнению с конфигурацией 1. Так, наибольшее снижение концентраций этана (в центральном сечении) за автодорогой на поверхности подложки и на высоте $z = 0,02$ м наблюдается при расположении заградительного экрана за полотном автодороги (конфигурация 3) и в случае наличия двух экранов (конфигурация 4). Стоит отметить, что структура течения и форма облака примеси носят сложный пространственный характер. Например, для конфигурации 3 характерно снижение концентраций примеси вблизи центрального сечения, однако наблюдаются высокие концентрации в окрестности боковых кромок экрана (рис. 10c). На высоте $z = 0,04$ м и $z = 0,08$ м все конфигурации экранов показывают существенный рост концентрации этана в ближнем следе за полотном дороги по сравнению с первой расчетной конфигурацией (рис. 12). Следовательно, можно сделать вывод, что наличие экранов позволяет изменить поведение «низкого» источника примеси таким образом, чтобы наиболее высокие концентрации эмиссии наблюдались над пешеходными зонами и зонами пребывания людей,



что имеет положительный эффект. При этом расположение заградительного экрана за полотном дороги относительно господствующего направления ветра может дать максимальный положительный эффект по отношению к другим типам расположения заграждений.

Рис. 12. Соотношение расчетных нормализованных концентраций этана χ_i/χ_1 для конфигураций $i = 2$ (1), 3 (2), 4 (3), построенных в плоскости XZ вдоль линий $z = 0, 0,02, 0,04, 0,08$ м.

Заключение

С помощью численного моделирования исследован процесс распространения газовой примеси в окрестности фрагмента автомагистрали при различных конфигурациях расположения заградительных экранов. Моделирование проведено на задаче в масштабе 1:150 и в соответствии с постановкой, изученной ранее экспериментально [22]. Исследование включало два этапа. На первом этапе проводилась калибровка численной модели по турбулентному числу Шмидта. Установлено, что стандартное значение числа Шмидта $Sc_t = 0,7$ дает хорошее качественное согласование с данными эксперимента по распределению концентраций примеси в характерных сечениях. Однако для получения количественного соответствия с экспериментом [22] вблизи подложки требуется калибровка константы $Sc_t = 0,55$. Исследование различных конфигураций с числом Шмидта $Sc_t = 0,55$ показало хорошее качественное и количественное совпадение с результатами эксперимента при описании распределения концентраций примеси в окрестности системы низких плохообтекаемых тел. На втором этапе численная модель применялась для расчета трех конфигураций расположения заградительных экранов: с наветренной стороны, с подветренной стороны и с обеих сторон дороги. Все рассмотренные варианты расположения экранов дают положительный эффект снижения концентрации примеси на подложке и на небольшой высоте над подложкой ($z = 0, 0,02$ м). Наиболее удачными с точки зрения снижения уровня примеси в пешеходных зонах являются конфигурации 3 и 4, которые дают наименьшую концентрацию этана в ближнем следе за дорогой на расстоянии $x/H < 15$. На высоте $z/H \geq 1$, наоборот, для всех конфигураций расположение экранов приводит к повышению уровня этана. Это свидетельствует о возможности искусственной трансформации «низкого» источника в «высокий» за счет расположения экранов вблизи автодороги. Таким образом, использование заграждений позволяет перестраивать течение и управлять формой облака высоких концентраций примеси в городской застройке. Применение параметрического численного моделирования в ходе проектирования автомагистралей и дорожной инфраструктуры позволяет снизить негативный эффект влияния загрязняющих веществ в воздушной среде.

Список литературы

1. Безуглая Э.Ю., Завадская Е.К., Ивлева Т.П., Смирнова И.В., Воробьева И.А. Качество воздуха в крупнейших городах России за 10 лет 1998–2007 гг. Аналитический обзор. ГУ «ГГО», Росгидромет, 2009. 133 с.
2. National center for atmospheric research: atmospheric chemistry observations and modeling: [сайт]. URL: <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>.
3. American society of heating refrigerating and air-conditioning engineers. ASHRAE Handbook — HVAC Applications. 2011. 1104 p.
4. Wilson D.J. Critical wind speeds for maximum exhaust gas reentry from flush vents at roof level intakes // ASHRAE Trans. 1982. Vol. 88. P. 503–513.
5. Wilson D.J. A design procedure for estimating air intake contamination from nearby exhaust vents // ASHRAE Trans. 1983. Vol. 89. P. 136–152.
6. Blocken B., Stathopoulos T., Saathoff P., Wang X. Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008. Vol. 96, No. 10–11. P. 1817–1831.
7. Gromke C. A vegetation modeling concept for building and environmental aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies // Environ. Pollut. 2011. Vol. 159, No. 8–9. P. 2094–2099.
8. Старченко А.В., Нутерман Р.Б., Данилкин Е.А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск: Изд-во ТГУ, 2015. 252 с.
9. Alonso-Estébanez A., Pascual-Muñoz A., Yagüe C. et al. Field experimental study of traffic-induced turbulence on highways // Atmos. Environ. 2012. Vol. 61. P. 189–196.
10. Bäumer D., Vogel B., Fiedler F. A new parameterisation of motorway-induced turbulence and its application in a numerical model // Atmos. Environ. 2005. Vol. 39, No. 31 (Spec. ISS). P. 5750–5759.
11. Valger S., Fedorova N. Numerical simulation of multicomponent gas flow in vicinity of bluff body within non-isothermal boundary layer // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 2027, No. 1. P. 040043-1–040043-8.

12. Вальгер С.А., Федорова Н.Н., Федоров А.В. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 1. С. 24–42.
13. Gromke C., Ruck B. Pollutant concentrations in street canyons of different aspect ratio with avenues of trees for various wind directions // Boundary-Layer Meteorol. 2012. Vol. 144, No. 1. P. 41–64.
14. Tominaga Y., Stathopoulos T. Turbulent schmidt numbers for CFD analysis with various types of flow field // Atmos. Environ. 2007. Vol. 41, No. 37. P. 8091–8099.
15. Snyder M.G., Venkatram A., Heist D.K. RLINE: a line source dispersion model for near-surface releases // Atmos. Environ. 2013. Vol. 77. P. 748–756.
16. Milando C.W., Batterman S.A. Operational evaluation of the RLINE dispersion model for studies of traffic-related air pollutants // Atmos. Environ. 2018. Vol. 182. P. 213–224.
17. Ahangar F.E., Heist D., Perry S., Venkatram A. Reduction of air pollution levels downwind of a road with an upwind noise barrier // Atmos. Environ. 2017. Vol. 155. P. 1–10.
18. Venkatram A., Horst T.W. Approximating dispersion from a finite line source // Atmos. Environ. 2006. Vol. 40, No. 13. P. 2401–2408.
19. Gousseau P., Blocken B.J.E., Stathopoulos T., van Heijst G.J.F. Near-field pollutant dispersion in an actual urban area: analysis of the mass transport mechanism by high-resolution large eddy simulations // Comput. Fluids. 2015. Vol. 114. P. 151–162.
20. Steffens J.T., Heist D.K., Perry S.G., Isakov V. et al. Effects of roadway configurations on near-road air quality and the implications on roadway designs // Atmos. Environ. 2014. Vol. 94. P. 74–85.
21. Ahmad K., Khare M., Chaudhry K.K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections — a review // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2005. Vol. 93, No. 9. P. 697–717.
22. Heist D.K., Perry S.G., Brixey L.A. A wind tunnel study of the effect of roadway configurations on the dispersion of traffic-related pollution // Atmos. Environ. 2009. Vol. 43, No. 32. P. 5101–5111.
23. Shin J., Han D., Sung H. Modeling of aluminum combustion in air-breathing combustor // 5th Eur. Conf. Aerosp. Sci. 2013. P. 2–4.
24. ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc., USA. 2020.
25. Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters // Build. Environ. 2012. Vol. 53. P. 34–48.
26. Franke J., Hirsch C., Jensen A.G., Krüs H.W. et al. The COST 732 best practice guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary // Int. J. Environ. Pollut. 2011. Vol. 44, No. 1–4. P. 419–427.
27. Richards P.J., Hoxey R.P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\varepsilon$ turbulence model // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 1993. Vol. 46–47, No. C. P. 145–153.
28. Chen Z.J., Przekwas A.J. A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows // J. Comput. Phys. 2010. Vol. 229, No. 24. P. 9150–9165.

*Статья поступила в редакцию 30 ноября 2020 г.,
после доработки — 15 января 2021 г.,
принята к публикации 23 марта 2021 г.*