

ЕКОЛОГІЯ

УДК 551.51

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.87.0.91

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВБЛИЗИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

Солодов В.Г.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. На основе разработанного ПО MTF5[®] поставлена задача о переносе примеси окиси углерода в приземном слое автомобильной дороги в условиях боковой ветровой эюры, переменного рельефа местности и придорожных насаждений. Использована система уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, уравнение переноса примеси и уравнения $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Приведены данные натурных исследований. Обсуждается возможность проветривания придорожного пространства путем организации разрывов насаждений на изгибах автодороги.

Ключевые слова: автомагистраль, придорожные насаждения, перенос загрязнений, численное моделирование, натурные измерения на местности.

Введение

Высокие уровни загрязнения придорожного пространства наблюдаются в придорожных каньонах в условиях высоких и густых насаждений вдоль относительно узких автомобильных дорог. В пространстве таких дорог водители транспортных средств, пешеходы испытывают воздействие концентраций загрязнений, превышающих существующий уровень стандартов качества воздуха [1]. Работа посвящена изучению распространения загрязнений в приземном слое автомобильной дороги общего назначения.

Анализ публикаций

Вычислительный подход, получивший развитие за рубежом в последнее время [2–9], использует компьютерное моделирование различных частных сценариев дисперсии примеси на местности с учетом ее рельефа, растительности и метеофакторов. Одно из преимуществ этого подхода определяется невозможностью в отдельных случаях осуществления экспериментальных исследований, например, в случаях прогноза катастрофических событий, либо оценки проектируемых решений.

Постановка задачи моделирования

В настоящей работе на основе уравнений Навье-Стокса, уравнения переноса примеси, осредненных по Рейнольдсу, и модели турбулентности в приближении несжимаемой среды, развита численная модель реального участка автомобильной дороги и исследуется

распространение в приземном слое атмосферы следа линейного источника примеси.

В литературе распространены примеры моделирования распространения следов от точечных и линейных источников загрязнения на модельных массивах регулярной структуры [3, 8, 9]. Однако характеристики рассеяния линейного источника в реальных условиях могут существенно отличаться от характеристик рассеяния в регулярных рядах модельных структур.

Первая часть исследования проведена на основе двумерной поперечной модели течения и является в значительной степени оценочной для предлагаемого подхода. Модель описывает длинный прямолинейный участок автодороги с придорожным рельефом местности и насаждений постоянной структуры. Вторая часть посвящена исследованию особенностей переноса на реальном трехмерном криволинейном участке автомобильной дороги.

Уравнения движения сплошной среды представляются в виде [10]:

$$\operatorname{div} \bar{u} = 0, \\ \rho \frac{d\bar{u}}{dt} = -\nabla p + \eta \Delta \bar{u} + \rho \bar{F}.$$

Уравнение переноса пассивной примеси имеет вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) c = \mu \Delta c + S_c.$$

Здесь S_c – мощность источника примеси, \bar{F} – мощность источника импульса, μ – коэффициент турбулентной диффузии, η – коэффициент турбулентной вязкости.

Для моделирования турбулентных эффектов переноса использовалась двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности k – ε с пристенными функциями и коррекцией сжимаемости [11]. Ее эффективность и экономичность для задач моделирования переноса примеси обсуждалась в работах [3, 4]. Уравнения переноса для k и ε параметров модели, константы и подробное описание модели можно найти, например, в [10]. Влияние растительности учитывалось с помощью источниковых членов в правых частях уравнений импульса в виде степенной зависимости

$$F_i = -C_0 |\mu|^{(C_1-1)} u_i.$$

На основе экспериментальных данных [4] для плотной жесткой листвы константы модели составили соответственно $C_0 = 10$, $C_1 = 1$. Для разреженных насаждений и зимнего времени года коэффициент C_0 по данным опытов [12, 13] уменьшался на два порядка. Значение $C_1 = 1$ означало безынерционность листа. Согласно рекомендациям [3] в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k внедрялся источник член типа $F_k = u_i F_i$, в уравнение переноса ε – источник член типа $F_\varepsilon = C_k \varepsilon / k F_k$. Данная модификация модели турбулентности интерпретирует влияние растительности как однородное изотропное сопротивление объема, добавочные члены в уравнениях модели увеличивают производство турбулентности.

Исследование проведено с использованием программного комплекса *MTFS*[®] [14], в котором базовый неявный алгоритм основан на расщеплении по методу переменных направлений и *TVD* схеме 2-го порядка точности с коррекцией сжимаемости [15].

Течение вне расчетной области предполагалось полностью турбулентным, что определялось входным профилем скорости ветра с использованием пограничного слоя $u(z) = U_* / \kappa \cdot \ln(z/z_0 + 1)$, где κ – параметр Кармана, z_0 – коэффициент шероховатости;

$U_* = \sqrt{\tau_h / \rho}$ – скорость трения [9]. Параметры турбулентности на границах области

$$k = U_*^2 / \sqrt{C_\mu}; \quad \varepsilon = U_*^3 / \{\kappa \cdot (z + z_0)\},$$

где $C_\mu = 0.09$.

Двумерная модель дисперсии примеси на автодорогах. Сравнение с данными натуральных измерений

Двумерная вычислительная область имеет размеры $10L \times 5L$, где L – высота области. Область разбита на домены, каждый из которых аппроксимируется гексагональной сеткой. Мощность сетки в расчетной области для типичного расчета составила около $10e+5$ узлов, минимальный размер пристенной ячейки в пограничном слое $0.5L \times 10e-03$. В типичном расчете L выбиралось равным 40 м.

Вдоль осевой линии автодороги моделировался линейный источник с выделением постоянного расхода примеси (на примере окиси углерода – CO) во времени и вдоль дороги на высоте около 0,5 м с температурой, равной температуре набегающего потока. Средняя скорость выделения CO на основании [17] принята равной 0. Температура дорожного покрытия считалась совпадающей с температурой воздуха. Моделирование выполнялось для условий типичного зимнего рабочего дня с 10 до 12 ч. Погодные условия определялись на месте наблюдения с помощью психрометра, чашечного анемометра и барометра-анероида. Измерения проводились на высоте 1.5...2 м от поверхности земли и представлены в табл. 1. Замеры окиси углерода на местности выполнялись прибором «Аквилон 1-1» (производитель «Элеком», г. Киев).

Конфигурация насаждений изображена на рис. 1–3; листья моделировались с высоты 0,5 м, высота насаждений достигала 15 м. При сопоставлении распределений CO в расчетах подбиралась плотность листьев по известной геометрии и плотности насаждений до совпадения результатов расчета и измерений в характерной точке. По результатам расчетов на основании выбранной плотности листьев сравнивались расчетные и экспериментальные данные в контрольных точках. Некоторые предварительные результаты обсуждаются в работах автора [12, 13].

Таблица 1 – Сопоставление результатов измерений и расчета для участков № 1–6

Участок	Точка измерения	Опыт № 1, массовая доля CO	Опыт № 2, массовая доля CO	Скорость ветра, м/сек	Угол направления ветра с осью дороги, град	Расчет массовой доли CO
№ 1	№ 1	1.1e-6	1.65e-6	3.00	45	1.0e-06
№ 2	№ 2	2.3e-6	4.3e-6	4.00	15	2.7e-06
№ 3	№ 3	2.0e-6	5.0e-6	5.00	30	1.4e-06
№ 4	№ 4	4.6 e-6	4.9 e-6	4.00	25	4.7e-06
–“–	№ 5	1.6 e-6	2.3 e-6	4.00	25	2.4e-06
№ 5	№ 6	1.3 e-6	1.7 e-6	4.00	45	2.2E-06
№ 6	№ 7	0.7 e-6	2.6 e-6	5.00	60	0.2E-06
–“–	№ 8	0.3 e-6	0.9 e-6	5.00	60	0.7E-06

В опытах направление ветра составляло угол с осевой линией автодороги, отличный от 90 град. Наличие продольной составляющей ветровой нагрузки не нарушало условий двумерной модели, основанной на предположении бесконечного продолжения двумерной структуры течения и процессов для любого сечения автодороги или улицы. При этом на обочинах дороги сохранялась структура растительности или загромождений. При расчетах использовалась проекция ветровой составляющей на направление, перпендикулярное осевой линии автодороги.

В проблеме моделирования существуют два определяющих параметра: распределение загазованности вдоль автодороги и параметры загромождения вдоль обочин. В данной работе предлагается задавать величину постоянной загазованности, опираясь на анализ транспортного потока, и подбирать параметры плотности загромождений (которая не является нормированной [3]), опираясь на значения загазованности в контрольных точках опытного участка. Такой подход под-

твердил возможность моделирования влияния листвы и позволил прояснить характерные значения параметров пористости, эквивалентной плотности насаждений. По данным наблюдений и на основе анализа состава и интенсивности автотранспортного потока [1, 2] с учетом результатов [17] задавался постоянный расход CO 5e-06 кг/сек на погонный метр осевой линии. Основные результаты сопоставления приведены на рис. 1–3, где приведены графики распределений CO вдоль вертикали в характерных точках. В табл. 1 также даны локальные сопоставления данных измерений и расчета для участков № 1–6.

Измерения выполнялись локально, обновлялись через 10 мин, поэтому разброс данных измерений (табл. 1, рис. 1–3) может быть также связан с нестационарностью атмосферы, порывами ветра, изменением дорожной обстановки. Вместе с тем совпадения на участках № 1, 2, 4, 5 можно признать вполне удовлетворительными.

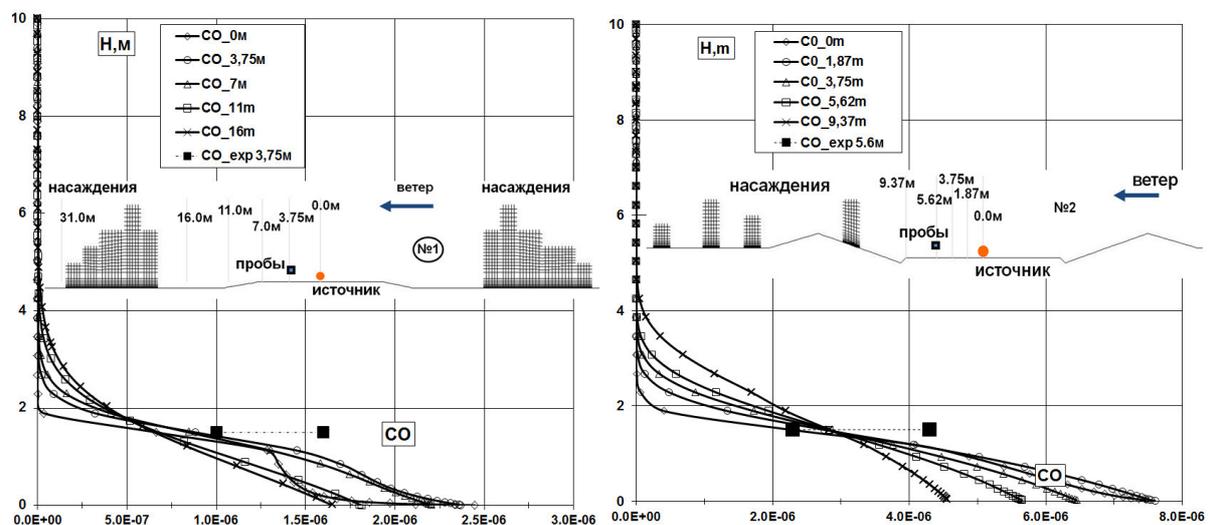


Рис. 1. Сопоставление опытных и расчетных данных для участков № 1, 2

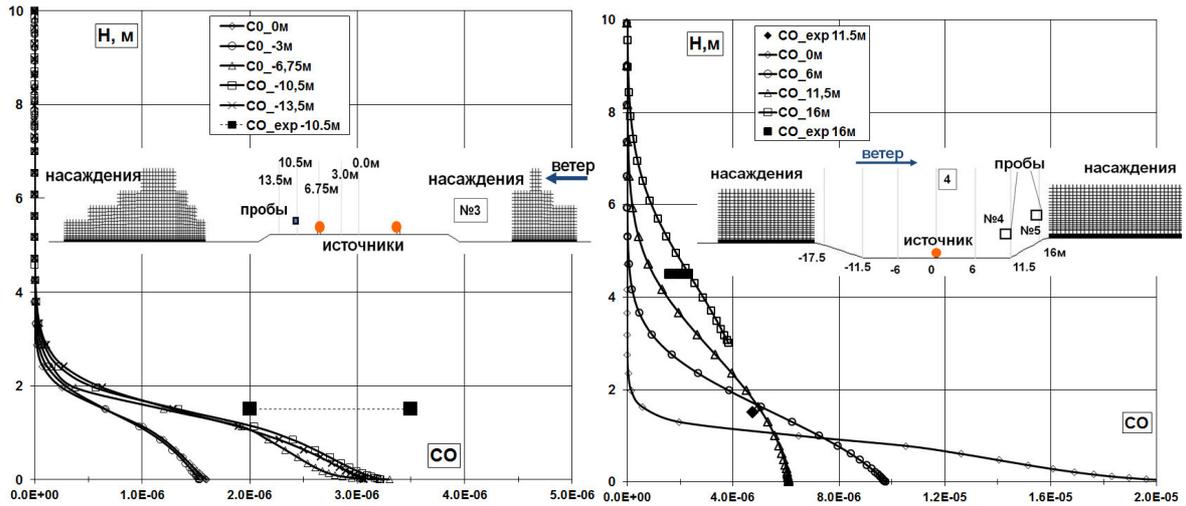


Рис. 2. Сопоставление опытных и расчетных данных для участков № 3, 4

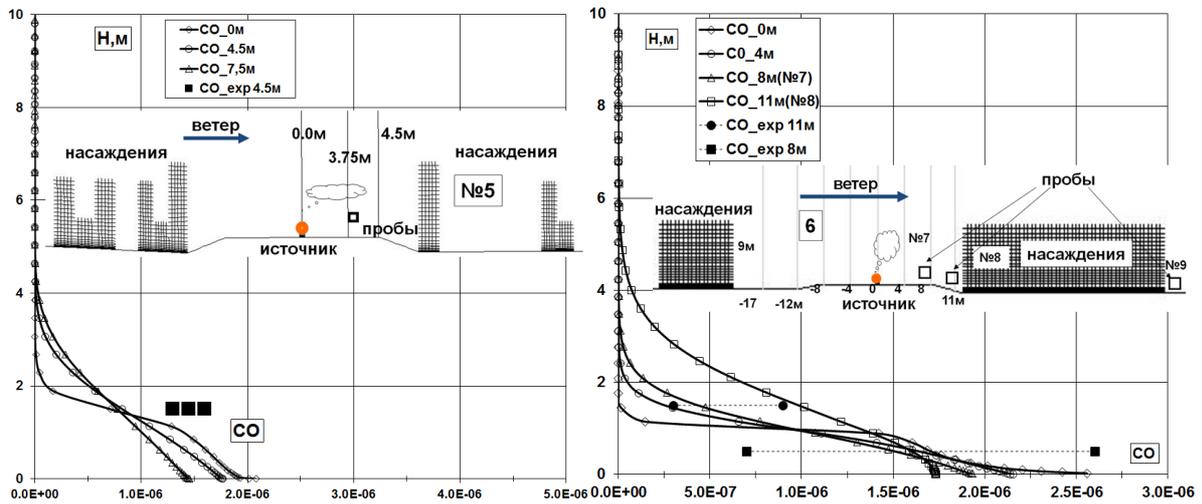


Рис. 3. Сопоставление опытных и расчетных данных для участков № 5, 6

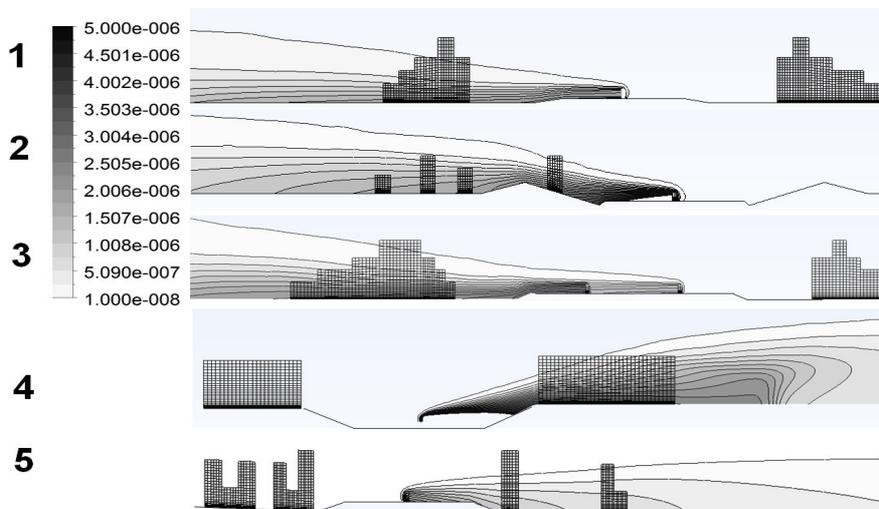


Рис. 4. Изолинии массовой доли CO для участков № 1–5

Изолинии массовой доли CO (рис. 4) указывают на торможение ветровой эпюры за насаждениями пропорционально плотности насаждений. Накопление CO можно ожидать за массивными насаждениями в связи с вихреобразованием (№ 2, № 5) и возникновением противотока (№ 4).

Вычислительная область выполнена в виде прямоугольника в плане с размерами $6L \times 6L \times L$, где L – высота области. В типичном расчете значение L выбиралось равным 200 м. Течение вне расчетной области предполагалось полностью турбулентным. В расчетах использовалась $k-\epsilon$ модель турбулентности. Входной профиль скорости ветра использовался с учетом пограничного слоя.

Вдоль осевой линии на поверхности дороги предполагался линейный источник примеси (CO) при постоянном расходе во времени $5e-06$ кг/сек на высоте 0,5 м при температуре набегающего потока 288 К. В этих условиях численно рассматривался процесс дисперсии примеси в придорожном пространстве под воздействием ветра. Основные данные о конфигурации расчетной области, параметры профиля дороги и рельефа, а также направление ветра для всех участков приведены в табл. 2, 3.

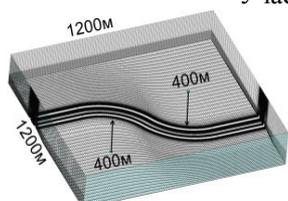
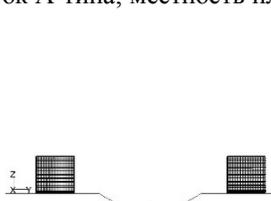
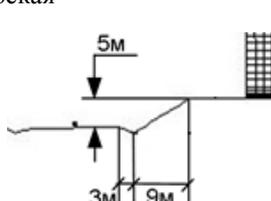
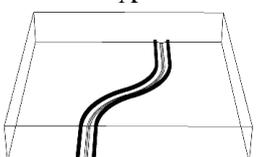
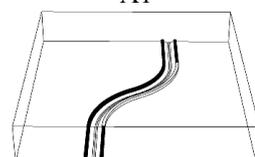
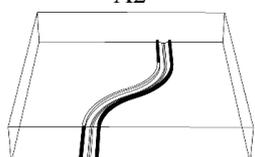
Моделирование придорожной растительности основывалось на модели частичной проницаемости занимаемых объемов. Рас-

сматривался летний вариант плотности листьев со значениями коэффициентов $C0 = 1$, $C1 = 1$, что соответствовало массивам придорожной растительности с наличием кустов в нижнем поясе насаждений. Высота насаждений в примерах выбрана равной ширине полосы насаждений для всех участков. Рассматривались варианты распространения примеси при направлении ветра с выпуклой и вогнутой сторон участка (табл. 2, 3).

Влияние угла натекания, разрыва насаждений для случая плоской местности представлено на рис. 5–8, где приведены поля массовой доли CO в диапазоне $1e-07 \dots 5e-06$ и поля скорости. Анализ результатов расчетов вариантов для участка А-типа (рис. 5–8) позволяет сделать следующие выводы.

На прямолинейных частях дороги насаждения и рельеф создают наибольшее сопротивление ветровому потоку, ортогональному этим частям. На изгибе дороги сопротивление уменьшается при возникновении скоса [13]. Дополнительное снижение сопротивления ветровой нагрузке возникает за счет увеличения эффективного расстояния между насаждениями в результате скоса. Поэтому аэродинамическое сопротивление изгибной части дороги ниже, чем прямых частей. Это создает эффект сноса медленных приземных масс воздуха и примеси вдоль прямых участков автодороги особенно в случае отсутствия разрыва насаждений (рис. 5–7).

Таблица 2 – Матрица численного эксперимента для участка А-типа

Участок	Участок А-типа, местность плоская		
			
схема насаждений			
Плотность насаждений	густая, нет разрывов ветер 1м/с 	густая, разрыв справа, ветер 1м/с 	густая, разрыв слева, ветер 1м/с 
Макс. значения масс. доли CO на участке / в плоскости симметрии	$8.64_{10^{-6}}$ $5.39_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)	$3.58_{10^{-5}}$ $3.48_{10^{-5}}$ (в плоскости симметрии)	$1.27_{10^{-5}}$ $3.30_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)

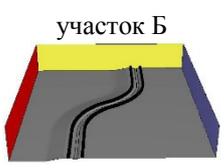
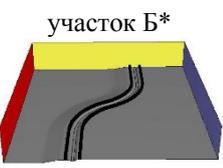
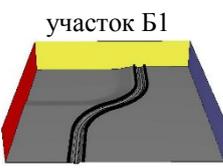
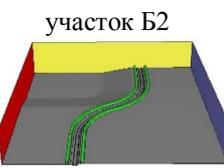
Варианты разрыва насаждений А1, А2 заметно различаются как по характеру распространения примеси на подветренной стороне автодороги, так и по уровням концентраций примеси на обочинах дороги (рис. 8). Вариант А2 ближе к варианту А по упомянутым параметрам. Это означает, что доминирующую роль в формировании факторов играет полоса насаждений между автодорогой и ветровой эпюрой (наветренная полоса).

Постановка задачи, матрица численного эксперимента для участка Б-типа при влиянии рельефа придорожной местности на распространение примеси в условиях плотных насаждений представлены в табл. 3. Глубина обочины участка Б (Б*) (вдоль всего участка) – 20 м, Б1 (вдоль части участка) – 20 м, участка Б2 (вдоль части участка) – 40 м

ниже уровня дорожного покрытия при уклоне местности 1:5.

Анализ результатов расчетов в вариантах для участков Б, Б1, Б2 позволяет прийти к следующим выводам. По сравнению с вариантом А варианты Б, Б1, Б2 отличаются снижением местности с подветренной стороны; при этом незначительно набухает пограничный слой во впадине, а также увеличивается поперечный снос воздуха над впадиной (рис. 9, 10). Варианты Б1, Б2, которые отличаются только глубиной впадины в подветренной части участка, дают картины обтекания местности по структуре и распространению примеси, мало отличающиеся друг от друга. Анализ расчетных данных (табл. 3) указывает на локальность влияния глубины впадины на эпюру скорости и распределение примеси вдоль автодороги.

Таблица 3 – Матрица численного эксперимента для участка Б-типа

Направление ветра	Ветер 1м/с с правой стороны участка ←	Ветер 1м/с с левой стороны участка →	Ветер 1м/с с правой стороны участка ←	Ветер 1м/с с правой стороны участка ←
Участок				
Макс. значения массовой доли СО на участке	$8.16_{10^{-6}}$ $3.05_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)	$8.67_{10^{-6}}$ $2.63_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)	$9.26_{10^{-6}}$ $3.15_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)	$8.86_{10^{-6}}$ $3.06_{10^{-6}}$ (в плоскости симметрии)

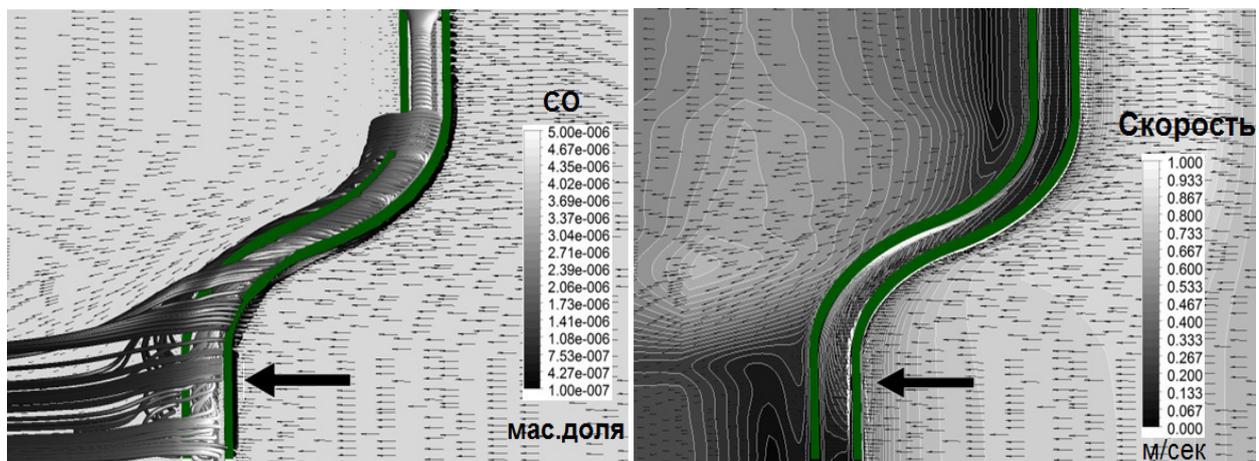


Рис. 5. 3D-модель плоского участка А, приземные линии тока, влияние угла натекания

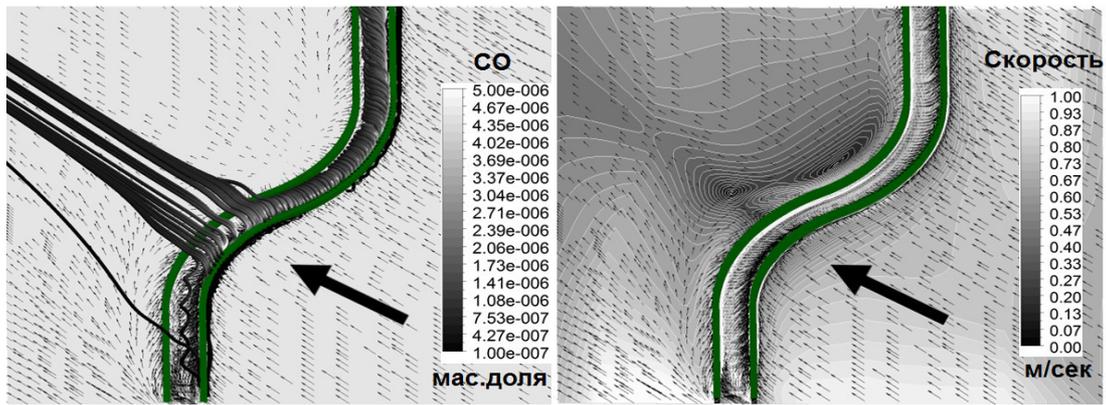


Рис. 6. 3D-модель плоского участка А, приземные линии тока, влияние угла натекания

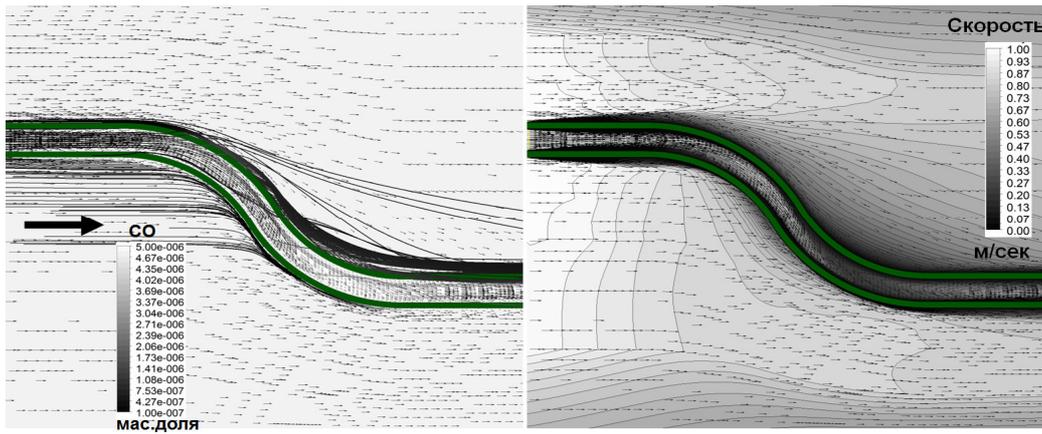


Рис. 7. 3D-модель плоского участка А, приземные линии тока, влияние угла натекания

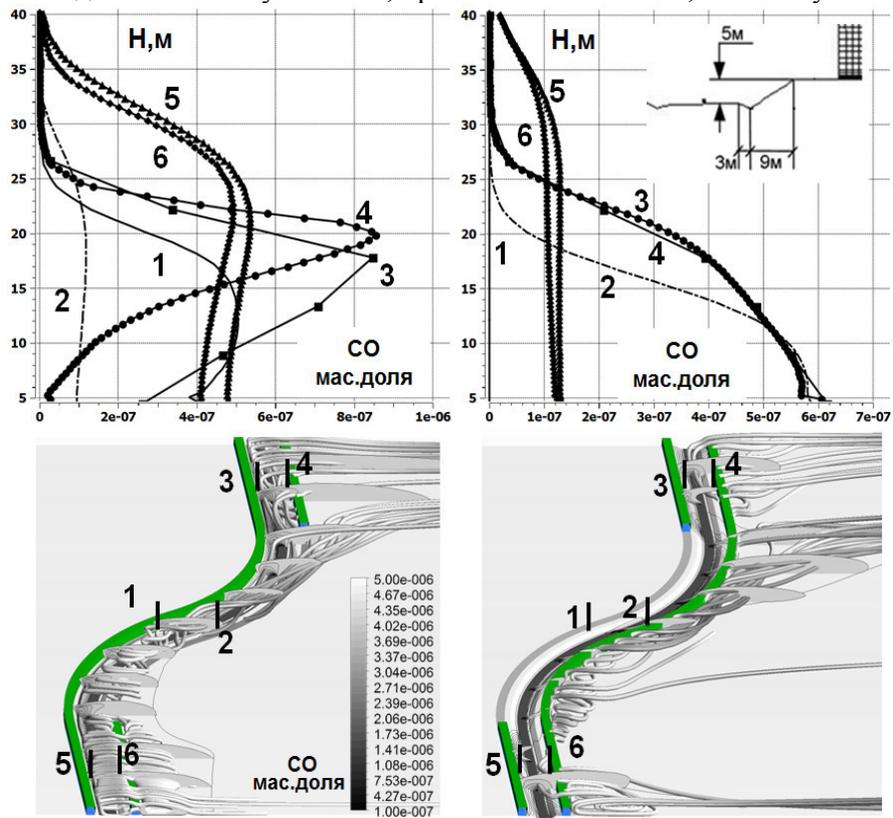


Рис. 8. Влияние разрывов насаждений. Линии тока в моделях плоских участков А1 (слева) и А2 (справа); изолинии массовой доли примеси в сечениях, и распределение примеси по высоте в точках 1–6

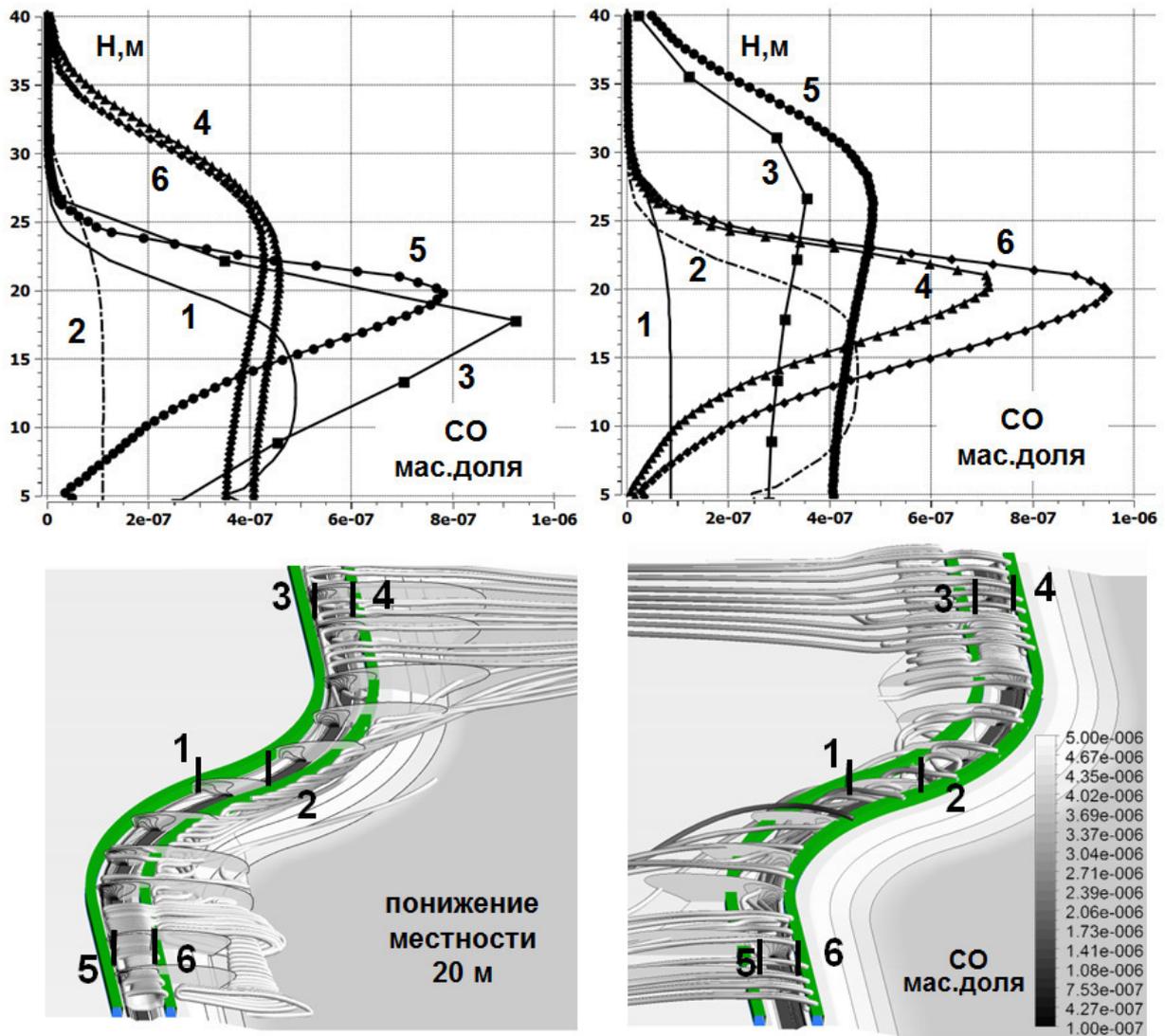


Рис. 9. Влияние понижения местности вдоль участка. Линии тока в модели участка Б (слева), Б*(справа); изолинии массовой доли примеси в сечениях, и распределение примеси по высоте в точках 1–6

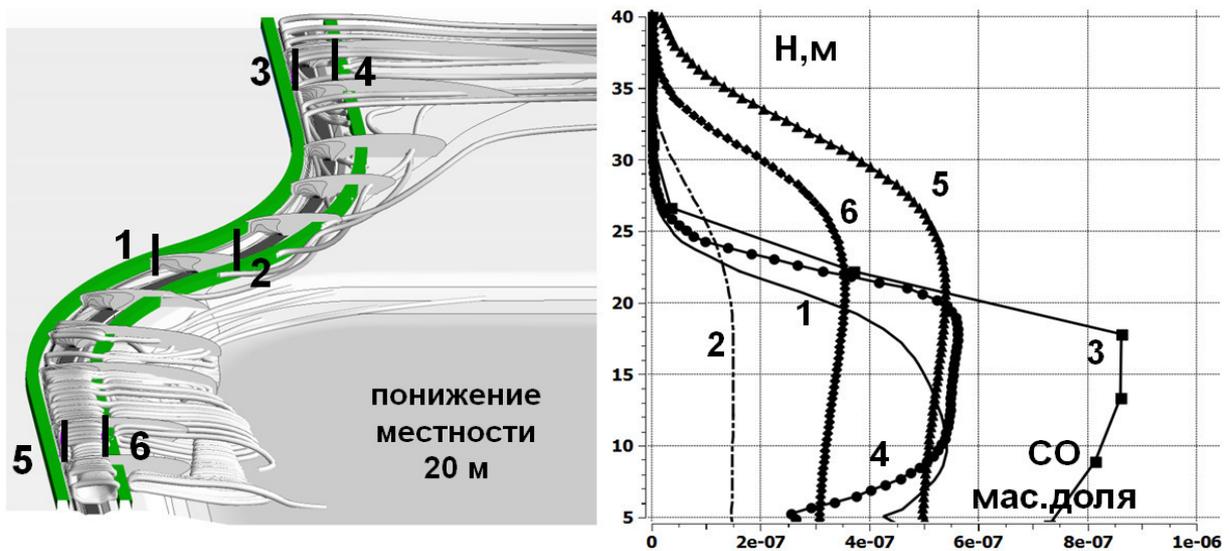


Рис. 10. Влияние локального понижения местности. Линии тока в модели участка Б1, изолинии массовой доли примеси в сечениях (слева), распределение примеси вдоль высоты в точках 1–6 (справа)

Максимальные значения концентрации примеси на участках Б, Б1, Б2 определяются в основном структурой насаждений. Сравнение участков Б, Б* (рис. 9) указывает лишь на локальное воздействие разрывов насаждений на изгибе дороги на концентрацию придорожной примеси. Случай Б существенно не отличается от случая А.

При высокой плотности растительности основная часть ветрового потока огибает насаждения, за которыми возникает вихревое течение в направлении, противоположном направлению ветра, аналогично обтеканию уступа с противотоком (рис. 5–7). Обратные токи за насаждениями подсасывают примесь, которая поднимается с восходящими потоками воздуха и переносится с основной частью ветрового потока над насаждениями. Схема течения аналогична обтеканию уличных каньонов городов [9, 16].

Скос линий тока по отношению к осевой линии автодороги приводит к возникновению продольной составляющей вектора скорости (рис. 5–7), что способствует сносу примеси вдоль автодороги, при этом интенсивность завихренности между насаждениями снижается в сравнении с двумерной моделью (эффект анализировался в [13]).

Расчеты моделей показывают, что для разреженных насаждений линии тока практически не отклоняются от первоначального направления за исключением области тонкого приземного слоя, где динамическое давление ветра мало. Для плотных насаждений эффект отклонения линий тока от начального направления является существенным, что проявляется в снижении концентрации примеси в случае ветра с выпуклой стороны изгиба автодороги, либо в повышении концентрации примеси при ветре с вогнутой стороны изгиба по сравнению с плоской моделью.

Вихреобразования, возникающие при обтекании плотных насаждений, искажают эпюру скорости набегающего потока, повышают уровень кинетической энергии турбулентности. При равной плотности посадок и фиксированной скорости ветра двусторонняя ограниченность пространства автодороги по сравнению с односторонней существенно (в 2–4 раза) ухудшает проветривание придорожного пространства. В этой связи наличие разрыва насаждений на изгибе автодороги улучшает проветривание придорожного пространства вне зависимости от направления ветра.

Распределения примеси вдоль высоты в характерных точках 1–6 (рис. 8–10) для вариантов участков указывают на подъем примеси (до 30 м) при фронтальном обтекании насаждений

Выводы

Разработаны и исследованы модели переноса примеси в приземном слое автомобильной дороги в условиях боковой ветровой эпюры, переменного рельефа прилегающей местности и придорожных насаждений различной плотности.

Применение трехмерной модели распространения примеси является оправданным на участках автодороги, содержащих сложные изгибы при наличии плотных насаждений. Эффективность проветривания проезжей части может быть достигнута за счет разрывов насаждений на изгибах автодороги.

Результаты могут быть полезными для анализа течений в городских уличных каньонах и лесопарковой зоне. Для уточнения модели необходимы более высокая точность измерений на местности и нормирование плотности насаждений. Работа выполнялась в рамках проекта, финансируемого МОН Украины.

Литература

1. Говорущенко Н.Я., Филиппов В.В., Величко Г.В. Проблемы и методы оценки экологического и энергетического качества автомобильных дорог // Автоматизированные технологии CREDO. № 9. 2000. Минск. С. 45–51.
2. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований). Харьков: ХНАДУ, 2011. 290 с.
3. Optimization of tree canopy model for CFD application to local area wind energy prediction / A. Mochida, A. Kimura, H. Youshino, S. Murakami, T. Iwata // NATO ASI 980064. Flow and Transport Processes in complex obstructed geometries. May 4–15, 2004. IHM NAS, Kyiv. Ukraine. P. 139–141
4. Emission and dispersion modeling of Lisbon air quality at local scale / C. Borrego, O. Tchepel, A. Costa, J. Amorim, A. Miranda // Atmospheric Environment, 2003. Vol. 37. P. 5197–5205
5. Thykier-Nielsen S., Roed J. Dispersion as consequence of a detonation of a dirty bomb in an urban area // NKS Conference on «Radioactive contamination in urban areas», Riso, Roskilde, Denmark. May 7–9, 2003. 135 p.
6. CFD prediction of flow over complex terrain using Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) / S. Murakami, K. Otsuka, H. Mochida, H. Kataoka, S. Kato // Proc. of 11th Int.

- Conf. On Wind Engineering, Texas. Vol. 2. 2003. P. 2821–2828.
7. Numerical Simulation of the Air Pollutants Dispersion Emitted by CHP Using ANSYS CFX / O. Mărunțalu, G. Lăzăroiu, E. Manea, D. Bondrea, L. Robescu // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering. Vol. 9. № 9. 2015. P. 1058–1064.
 8. Hiraoka H. Modeling a Microclimate within Vegetation. NATO ASI 980064. Flow and Transport Processes in complex obstructed geometries. May 4–15, 2004. IHM NAS, Kyiv, Ukraine. 2004. P. 142–145.
 9. Flow and transport with complex Obstructions / Applications to Cities. Vegetative Canopies and Industry / Editors Ye. Gayev, Julian Hunt. Springer Publ. 2007. 414 p.
 10. Лыков А.В., Берковский Б.М. Конвекция и тепловые волны. Москва: Энергия, 1974. 336 с.
 11. Солодов В.Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей. Харьков: ХНАДУ, 2011. 167 с.
 12. Математичне моделювання забруднення атмосферного повітря придорожного простору / В.Г. Солодов, В.В. Філіппов, В.К. Жданюк, І.В. Кияшко // Автошляховик України. 2009. № 3. С.42–47.
 13. Солодов В.Г., Авершин А.Г. Модель переноса атмосферных загрязнений в полосе насаждений возле автомобильной дороги // Автомобиль и электроника. Современные технологии. 2018. Вып. 12. С. 98–107.
 14. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В. Научно-прикладной программный комплекс MTF5[®] для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. Сертификат гос. регистр. авт. прав, УГААСП. № 5921. 07.16.2002.
 15. Merkle C., Venkateswaran S., Deshpande M. Convergence Acceleration of the Navier-Stokes Equations through Time-Derivative Preconditioning // AGARD-CP578-NATO. 1995. P. 1–10.
 16. Солодов В.Г. Моделирование переноса примеси в структуре улиц-каньонов центральной части г. Харькова // Научн. труды межд. н.-т. конф. «Автомобільний транспорт і автомобілебудування», октябрь 2018 г. Харьков: ХНАДУ, 2018. С. 321–324.
 17. Солодов В.Г. Задача об аэродинамическом взаимодействии транспортных потоков // Научн. труды межд. н.-т. конф. «Автомобільний транспорт і автомобілебудування», октябрь 2018 г. / Харьков: ХНАДУ, 2018. С. 312–316.
 - ways / CREDO automated technologies. № 9. 2000. Minsk, P. 45–51 (in Russian).
 2. Govorushchenko N.Ya. Systems Engineering of Automobile Transport (calculated methods of research). Kharkiv, publishing house HNADU, 2011. 290 p. (in Ukrainian)/
 3. Mochida A., Kimura A., Youshino H., Murakami S., Iwata T. Optimization of Tree Canopy Model for CFD Application to Local Area Wind Energy Prediction. NATO ASI 980064. Flow and Transport Processes in Complex Obstructed Geometries. May 4–15, 2004. IHM NAS, Kyiv, Ukraine. p.139–141.
 4. Borrego C., Tchepel O., Costa A., Amorim J., Miranda A. Emission and Dispersion Modeling of Lisbon Air Quality at Local Scale // Atmospheric Environment, 2003. Vol. 37. P. 5197–5205.
 5. Thykier-Nielsen S., Roed J. Dispersion as Consequence of a Detonation of a Dirty Bomb in an Urban Area. In: NKS Conference on «Radioactive contamination in urban areas». Riso, Roskilde, Denmark. May 7–9, 2003. P. 135–137.
 6. Murakami S., Otsuka K., Mochida H., Kataoka H, Kato S., CFD Prediction of Flow over Complex Terrain using Local Area Wind Energy Prediction System (LAWEPS) // Proc. of 11th Int. Conf. On Wind Engineering, Texas. Vol. 2. 2003. P. 2821–2828.
 7. Mărunțalu O., Lăzăroiu G., Manea E., Bondrea D., Robescu L Numerical Simulation of the Air Pollutants Dispersion Emitted by CHP Using ANSYS CFX // World Academy of Science, Engineering and Technology Int. Journ. of Environmental and Ecological Engineering. Vol. 9. № 9. 2015. P. 1058–1064.
 8. Hiraoka H. Modeling a Microclimate within Vegetation. NATO ASI 980064. Flow and Transport Processes in complex obstructed geometries. May 4–15, 2004. IHM NAS, Kyiv, Ukraine. 2004. P. 142–145.
 9. Flow and Transport with Complex Obstructions / Applications to Cities. Vegetative Canopies and Industry / Editors: Ye. Gayev, Julian Hunt. Springer Publ. 2007. 414 p.
 10. Lykov A.V., Berkovsky B.M. Convection and Heat Waves. M.: Energy, 1974. 336 p. (in Russian).
 11. Solodov V. Turbulent Flow Modeling. Large Eddy Simulation. Kharkiv: HNADU, 2011. 167 p. (in Ukrainian)
 12. Solodov V., Filippov V., Zhdanyuk V., Kyashko I. Mathematical Modeling of Atmospheric Air Pollution in the Roadside Space // Autoroadster of Ukraine. 2009. № 3. P. 42–47 (in Ukrainian).
 13. Solodov V.G., Avershin A.G. Model of Atmospheric Pollution Transfer in the Belt of Plantings near the Highway // Car and Electronics. Modern technology. 2018. Vol. 12. P. 98–107 (in Russian).
 14. Solodov V., Starodubtsev Yu. The Scientific Application Software MTF5[®] for Calculation of 3D Viscous Turbulent Liquid and Gas Flows in Arbi-

References

1. Govorushchenko N.Ya., Filippov V.V. Velichko G.V. Problems and Methods for Assessing the Environmental and Energy Quality of High-

- trary Shape Domains, Certificate of State Registration, Ukrainian State Agency of Copyrights and Related Rights. № 5921. 07.16.2002 (in Ukrainian).
15. Merkle C., Venkateswaran S., Deshpande M. Convergence Acceleration of the Navier-Stokes Equations through Time-Derivative Preconditioning // AGARD-CP578-NATO. 1995. P. 1–10.
 16. Solodov V.G. Modeling the Transfer of Impurities in the Structure of Streets-canyons of the Central Part of Kharkov // Proc. the Int. Scientific and Techn. Conf. «Automobile Transport and Automotive Industry», October 2018. Kharkiv: KhNADU, 2018. P. 321–324 (in Ukrainian).
 17. Solodov V.G. The Problem of the Aerodynamic Interaction of Traffic Flows // Proc. the Int. Scientific and Techn. Conf. «Automobile Transport and Automotive Industry», October 2018. Kharkiv: KhNADU, 2018. P. 312–316 (in Ukrainian).

Солодов Валерій Григорьевич, проф., докт. техн. наук, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, 61002, тел. +38057 707-37-30, solodov.v@gmail.com

Деякі особливості перенесення домішки в приземному шарі поблизу автомобільної дороги

Анотація. На основі розробленого програмного забезпечення MTFs[®] поставлено завдання про дослідження перенесення домішки окису вуглецю в приземному шарі автомобільної дороги в умовах бічної вітрової епюри, змінного рельєфу прилеглої місцевості і придорожніх насаджень. Використовується система рівнянь перенесення, що містить рівняння Нав'є-Стокса, осереднені за Рейнольдсом, рівняння перенесення пасивного скаляра й рівняння двопараметричної $k-\epsilon$ моделі турбулентності в наближенні нестисливого середовища. Система рівнянь перенесення дискретизується на гексагональному сітковому описанні розрахункової ділянки. Розглянуто моделі довгої прямолінійної автодороги в межах двовимірної моделі розповсюдження домішки й криволінійної автодороги з варіаціями насаджень і геометрії місцевості. Насадження моделюються як пористе середовище із змінним опором на основі застосування додаткових членів у рівняннях руху. На основі аналізу складу та інтенсивності автотранспортного потоку задавалася постійна витрата окису вуглецю 5e-6 кг/сек на погонний метр осевої лінії. Наведені дані про проведені натурні дослідження на різних типах рельєфу і насаджень. Зіставлення розрахункових даних і результатів вимірювань для випадку довгої прямолінійної автодороги з незмінними насадженнями на узбіччях вказує на задовільну відповідність. Дискутується можливість провітрювання придорожного простору шляхом утворення розривів насаджень на вигинах автодороги.

Ключові слова: автомагістраль, придорожні насадження, перенесення забруднень, чисельне моделювання, натурні виміри на місцевості.

Солодов Валерій Григорьевич, проф., докт. техн. наук, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, тел. +38057 707-37-30, solodov.v@gmail.com

Some features of transfer of pollution in the surface layer near the road

Abstract. Problem and goal. On the basis of the developed MTFs[®] software, the task was to study the characteristics of the carbon dioxide admixture transfer in the surface layer of the road under conditions of the lateral wind stream, variable relief of the adjacent terrain and roadside plantations of different density. **Methodology.** The system of transfer equations is used, which includes the Reynolds averaged Navier-Stokes equations, the transfer equation of the passive scalar and the equations of the high-Reynolds two-parameter $k-\epsilon$ turbulence model. In the simulations, the model of an incompressible medium was used. The system of transfer equations is approximated on the hexahedral mesh description of the computational domain. Solver, integrating the system of equations, is based on an implicit algorithm with splitting of the transfer equations by the method of variable directions based on the TVD scheme of the second order accuracy with the compressibility correction. The models of the long straight road are considered within the framework of the two-dimensional impurity distribution model and the curvilinear road with variations of plantings and terrain geometry. The plantings are modeled as a porous medium with variable resistance based on the use of additional terms in the equations of motion and transport of turbulent pulsations. The flow outside the computational domain was assumed completely turbulent, which was determined by the input wind velocity profile using the boundary layer. **Results.** Based on the analysis of the composition and intensity of the traffic flow, a constant flow rate of carbon monoxide of 5e-6 kg/s per linear meter of the centerline was set. The data on carrying out field studies on various types of terrain, relief and plantings are given. **Originality.** Comparisons of calculated data and measurements for the case of a long straight road show satisfactory compliance. On road models with a curved axial line, the effect of the angle between the free-stream velocity vector and the direction of the axial line on the airing of the roadside is shown. **Practical value.** The possibility of airing the roadside space by organizing planting gaps on the bends of the road is discussed.

Keywords: highway, roadside spaces, pollution transport, numerical simulation, field measurements near the ground.

Solodov V.G., Prof., Dr. Sci. tel. +38057 707-37-30, solodov.v@gmail.com
Kharkiv National Automobile and Highway University (Ukraine).