

## **МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ПОЛОСЕ НАСАЖДЕНИЙ ВОЗЛЕ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

**Солодов В. Г.<sup>1</sup>, Авершин А. Г.<sup>1</sup>,**

**<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

***Аннотация.** Разработаны и исследованы модели переноса примеси в приземном слое автомобильной дороги в условиях боковой ветровой эюры, переменного рельефа прилегающей местности и придорожных насаждений разной плотности. Показано влияние угла скоса между вектором скорости набегающего потока и направлением осевой линии автодороги на проветривание придорожного пространства.*

***Ключевые слова:** автомагистраль, насаждения, приземный слой, перенос загрязнений.*

### **Введение**

Работа посвящена моделированию распространения загрязнений в приземном слое автомобильной дороги общего назначения. До настоящего времени основным источником таких знаний являлись натурные исследования, а именно, замеры на местности, примыкающей к автодороге. Вместе с тем опытные данные существенно зависят от многих факторов: интенсивности движения, качественного и количественного состава транспортных средств, состояния атмосферы, рельефа местности, наличия и конфигурации зеленых насаждений, солнечной радиации, качества и поглощающей способности дорожного покрытия. Учет всех перечисленных и других факторов не представляется возможным, и, поэтому, данные замеров на местности не несут универсальных знаний.

### **Анализ исследований и публикаций**

В мировой практике существуют два направления исследования данной проблемы: построение на основе многолетних наблюдений корреляционных зависимостей, учитывающих основные факторы влияния [1], и численное моделирование различных сценариев с целью выявления скрытых зависимостей, тенденций в дисперсии примесей в приземном слое, моделирования некоторых основных параметров состояния окружающей среды [2-9]. Оба направления являются содержательными и дополняют друг друга.

Первое направление [1] усредняет действие различных факторов и отражает основные тенденции без детального анализа пространственных и временных факторов и их

связей в частных случаях. Второе направление, получившее развитие за рубежом в последнее десятилетие [2-9], позволяет моделировать в деталях различные частные сценарии дисперсии на местности с учетом ее рельефа, растительности и метеофакторов. Одно из преимуществ второго подхода следует из невозможности в отдельных случаях осуществления экспериментальных исследований, например, в случаях прогноза катастрофических событий, либо оценки проектируемых решений.

В проблеме предсказания дисперсии выбросов примеси вдоль автодороги важным является влияние рельефа прилегающей местности, геометрии и плотности зеленых насаждений [2, 5], поглощающих свойств дорожного покрытия. Для оценки дисперсии должны приниматься во внимание такие факторы как роза ветров для данной местности, сезонные уровни влажности, тепловой поток от дорожного полотна, альbedo прилегающей местности. Выходными параметрами исследования должны быть уровни концентрации компонентов выхлопа в окрестности автодороги для установившегося автотранспортного потока, степень влияния нерегулярной типовой застройки прилегающей местности и насаждений и т.д.

### **Постановка задачи моделирования**

В работе на основе уравнений Навье-Стокса, уравнений переноса примеси, осредненных по Рейнольдсу и моделей турбулентности [10] в приближении несжимаемой среды разработана численная модель реального участка автомобильной дороги и иссле-

дугается распространение в приземном слое атмосферы следа линейного источника примеси, вследствие стационарного выделения окиси углерода (CO) вдоль осевой линии двухполосной автомобильной дороги.

Исследование является частным случаем решения задачи распространения примесей, включающих оксиды различных веществ, частиц сажи от выхлопов автотранспортных средств на автомобильных дорогах общего назначения.

В литературе известны примеры моделирования распространения следов от точечных и линейных источников загрязнения на модельных массивах регулярной структуры [2,6,7], однако характеристики рассеяния точечного источника в реальной условиях могут существенно отличаться от характеристик рассеяния в регулярных рядах модельных структур.

В качестве модели рассматривается длинный участок автодороги с придорожным рельефом местности и насаждений. Вдоль осевой линии автодороги предполагается линейный источник, выделяющий постоянный во времени расход примеси вдоль дороги.

Уравнение неразрывности представляется в виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = Q_i$$

Уравнения движения сплошной среды представляются в виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{2}{3} k \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v_i \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right\} - F_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Уравнение переноса примеси имеет вид:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_i}{\partial x_k} = - \frac{\partial (c_i u_k)}{\partial x_k} + S_i + R_i.$$

Для моделирования турбулентных эффектов переноса в качестве базовой использована двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности  $k-\varepsilon$  с пристенными функциями. Уравнения переноса для  $k$  и  $\varepsilon$  параметров модели могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_i}{\sigma} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon + F_k,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_i}{\sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \varepsilon) + F_\varepsilon,$$

где производство турбулентности определяется членом:

$$P_k = v_i \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_j}.$$

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:

$$F_i = -C_0 |u|^{(C_1-1)} u_i$$

В соответствии с экспериментальными данными [3] для плотной субтропической листвы константы модели составляют соответственно  $C_0 = 10$ ,  $C_1 = 1$ . Для разреженных насаждений и зимнего времени года (отсутствие листвы) коэффициент  $C_0$  уменьшался на два порядка. Согласно рекомендациям [2] в уравнение переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  внедрялся источниковый член типа  $F_k = u_i F_i$ , в уравнение переноса  $\varepsilon$  - источниковый член типа  $F_\varepsilon = C_k \varepsilon / k F_k$ . Данная модель интерпретирует влияние растительности как однородное изотропное сопротивление объема, добавочные члены в уравнениях модели турбулентности увеличивают производство турбулентности.

### Обсуждение результатов исследований

Исследование проведено с использованием программного комплекса *MTFS*<sup>®</sup> [11], в котором базовый неявный алгоритм обеспечен расщеплением по методу переменных направлений и TVD схемой 2/3-го порядка точности. Расчеты выполнены методом установления течения от заторможенного состояния к развитому установившемуся в среднем течению.

Течение вне расчетной области предполагалось полностью турбулентным, что определялось входными граничными условиями. Входной профиль скорости ветра использо-

вался с учетом погранслоя. Вдоль осевой линии автодороги предполагался линейный источник с выделением постоянного расхода примеси во времени и вдоль дороги на высоте около 0.5 метра с температурой, равной температуре набегающего потока. На основе анализа транспортного потока [1] задавался постоянный расход CO около  $5e-6$  кг/сек на погонный метр осевой линии. Средняя скорость CO в момент выделения принята равной 0.

### Исследования на прямом участке дороги

В [13] авторами рассматривался длинный прямолинейный участок автодороги с неизменным придорожным рельефом местности и насаждений. В этих условиях допустимо сведение трехмерной задачи о распространении примеси к менее затратной двумерной задаче в поперечной плоскости, перпендикулярной осевой линии автодороги.

На данном участке проведено сопоставление с экспериментальными данными при условии адиабатичности, т.е. в отсутствие теплового потока от дорожного покрытия.

Температура поверхности дороги принята совпадающей с температурой воздуха. Моделирование проводилось для условий типичного рабочего дня недели зимой и летом с 10 до 12 часов дня. Погодные условия определялись на месте наблюдения с помощью психрометра, чашечного анемометра и барометра-анероида. Измерения проводились на высоте 1.5 - 2 метра от поверхности земли. Геометрические параметры участка автодороги даны на рис.1. Окись углерода на основании этих данных является менее плотной и испытывает тенденцию к всплыванию в воздухе, но данный эффект мал.

Моделирование придорожной растительности основывалось на модели частичной проницаемости занимаемых объемов [3]. Высота насаждений в примерах составляла 10м; листва моделировалась с высоты 0.5м. При сопоставлении распределений CO в расчетах подбиралась плотность листвы по известной геометрии насаждений до полного совпадения результатов расчета и измерений в точке 4. По результатам расчетов сопоставлялись расчетные и опытные данные в точке 5.

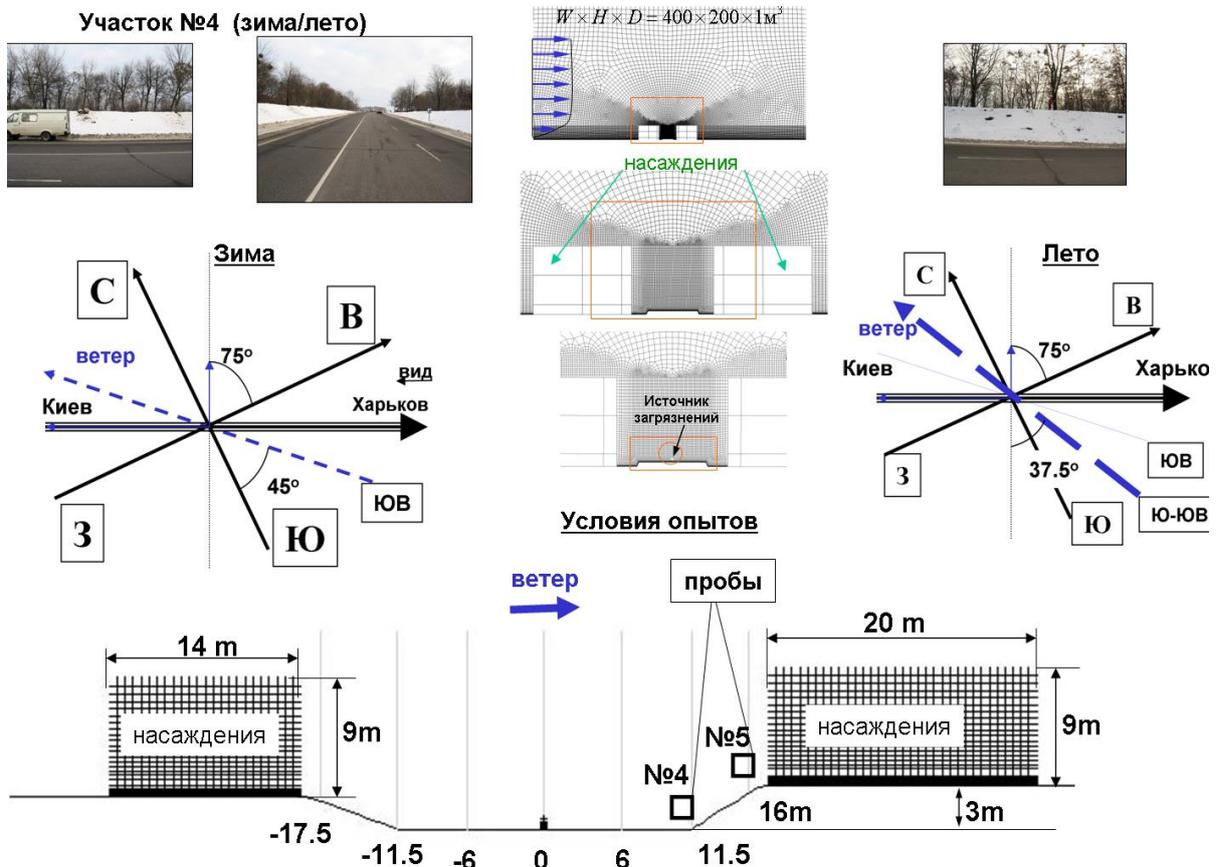


Рис.1. Метеоусловия и модель участка №4 автомобильной дороги

**Сопоставление для зимних условий.** По данным наблюдений на основе анализа со-

става автотранспортного потока задавался постоянный расход CO  $5e-6$  кг/сек на погонный

метр осевой линии. Основные результаты сопоставления приведены на рис. 2, где даны графики распределений СО вдоль вертикали в характерных точках. Из результатов следует, что для разреженных насаждений и зимнего времени года наиболее приемлемой является величина пористости  $C_0 = 0.087$ , которая обеспечивает удовлетворительное совпадение с данными эксперимента в точке измерений №5, и может быть обоснована зимним периодом, характером насаждений и отсутствием листвы.

**Сопоставление для летних условий.** По данным наблюдений и на основе анализа состава автотранспортного потока задавался постоянный расход СО 6е-6 кг/сек на погонный метр осевой линии. Результаты сопоставления приведены на рис. 2, где даны графики массовой концентрации СО. Таким образом, для разреженных насаждений и летнего времени года наиболее приемлемой является величина пористости  $C_0 = 0.15$  по всей высоте, которая обеспечивает удовлетворительное совпадение с данными эксперимента в точке измерений №5, и может быть обоснована характером насаждений, низкой плотностью листвы, температурой дорожной поверхности.

#### Исследования на участках №1, 2 с

#### существенно пространственной структурой переноса примеси

Рассмотрены варианты (1) участков длиной около 1000м с неизменным дорожным профилем, постоянной вдоль дороги плотностью и конфигурацией насаждений, а также варианты (2) с переменным вдоль автодороги придорожным рельефом местности.

Вдоль осевой линии на поверхности автодороги предполагался линейный источник примеси (СО) с постоянным расходом во времени и вдоль дороги около 5е-6 кг/м<sup>3</sup>сек на высоте около 0.5 метра при температуре набегающего потока. Скорость примеси в момент выделения считалась равной 0. В этих условиях численно рассмотрен процесс переноса примеси в придорожном пространстве при воздействии ветра.

Основные метеорологические факторы для всех участков даны в табл. 4. Типовая вычислительная область помещалась в прямоугольник в плане с размерами  $6L \times 6L \times L$ , где  $L$  - высота области. В типовом расчете размер  $L$  составлял 200м. Течение вне расчетной области предполагалось полностью турбулентным. Входной профиль скорости ветра принимался с учетом пограничного слоя.

Таблица 1 – Свойства окиси углерода и воздуха [12]

| Вязкость СО при давлении 1атм и Т К=300, (Па*сек) | Теплопроводность при давлении 1бар и Т°К=300, вт/м*град | Плотность при давлении 1бар и Т°К=300, кг/м <sup>3</sup> | Теплоемкость Ср, Дж/кг*град | Молекулярный вес |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|
| 1765*10-8                                         | 232,6*10-4                                              | 1.1233                                                   | 1043                        | 28,011           |
| Вязкость воздуха                                  | Теплопроводность                                        | Плотность                                                | Теплоемкость Ср,            | Молекулярный вес |
| 1846*10-8                                         | 26,2*10-3                                               | 1.16144                                                  | 1007                        | 28,96            |

Таблица 2 – Основные метеофакторы в момент измерений в зимнее/летнее время [13]

| Атмосферное давление | Температура Т°С | Направление ветра | Скорость, м/с |
|----------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| 746/748, мБ          | +5.5/23.4 град  | ЮВ/Ю-ЮВ           | 4/1.5         |

Таблица 3 – Расположение точек измерения на участке №4 [13]

| Точка        | Точка 0 метров | точка 6 метров           | точка 11 м – (точка измерения №4)      | точка 16 м – (точка измерения №5)    |
|--------------|----------------|--------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| Расположение | Осевая линия   | 6 метров от осевой линии | 11,5 м от осевой линии в сторону ветра | 16 м от осевой линии в сторону ветра |

Таблица 4 – Основные параметры атмосферы для криволинейных участков №1,2 (табл.5)

| Атмосферное давление | Темп. воздуха Т°К | Темп. дорожного покрытия Т°К | Расход источника СО, кг/сек на погонный метр    | Влажность, %   | Скорость ветра, м/с |
|----------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|---------------------|
| 101325Па             | 288 °К            | 288 °К                       | Равномерная эпюра вдоль оси, 5 <sub>10</sub> -6 | Не учитывалась | 1.0                 |

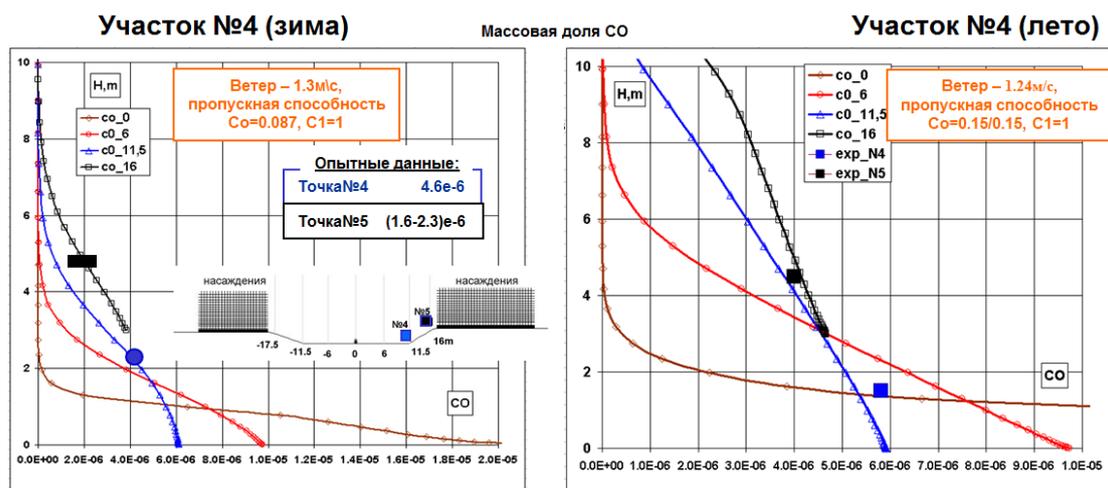


Рис. 2. Массовая доля CO вдоль высоты на участке №4: сопоставление с данными измерений

Параметры профиля дороги и рельефа представлены на рис. 3. На участке №1 дорожное полотно шириной 15м поднято, либо опущено на 1м по отношению к уровню местности. На участке №2 дорожное полотно опущено на 5м ниже уровня местности, на которой расположены насаждения. Высота насаждений в примерах выбрана равной ширине полосы насаждений 15м для всех участков. Рассматривалось два типа насаждений по плотности.

**Зимний вариант** плотности (разреженный) принят со значениями коэффициентов  $C_0=0.1$ ,  $C_1=1$ . Данный набор констант хорошо себя зарекомендовал при сопоставлении с экспериментальными данными для зимних условий и полосы шириной около 15 м.

**Летний вариант** плотности (плотный) со значениями коэффициентов  $C_0=1$ ,  $C_1=1$ . Таким образом, растительность моделировалась

как неинерционная пористая среда (легкий лист) с сопротивлением плотности и с однородными свойствами в пространстве. Это соответствовало высоким массивам придорожной растительности с наличием кустов в нижнем поясе насаждений.

Направление ветра задавалось горизонтальным в плоскости симметрии участка. Рассматривались варианты распространения примеси при направлении ветра с выпуклой и вогнутой сторон участка. Сравнительная двумерная модель отражала сечение автодороги плоскостью симметрии. В табл. 5 приведена матрица численного эксперимента для вариантов участка №1, при этом максимальное значение массовой концентрации примеси регистрировалось в произвольной точке расчетной области, в основном вдоль дорожного полотна.

Таблица 5 – Матрица численного эксперимента для участка №1

| Участок                                         | Участок №1А             |         |                         |                       | Участок №1Б             |         |                         |         |
|-------------------------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
|                                                 | С выпуклой стороны<br>← |         | С вогнутой стороны<br>→ |                       | С выпуклой стороны<br>← |         | С вогнутой стороны<br>→ |         |
| Плотность Насаждений                            | Разреженная             | Плотная | Разреженная             | Плотная               | Разреженная             | Плотная | Разреженная             | Плотная |
| Макс. значение концентрации CO на участке       | 7.7e-6                  | 4.2e-5  | 6.12e-5                 | 1.58 <sub>10</sub> -5 | 6.23e-6                 | 4.6e-5  | 6.0e-6                  | 1.3e-5  |
| Макс. значение концентрации CO в плоской модели | 6.8e-6                  | 1.2e-5  | 6.8e-6                  | 1.15e-5               | 5.22e-6                 | 1.1e-5  | 5.22e-6                 | 1.1e-5  |

По результатам исследования обнаружены следующие закономерности. Интенсивность крупномасштабной завихренности до насаждений, между насаждениями и за насаждениями незначительна при низкой плотности, что соответствует переносу примеси в нижнем слое насаждений. При более высокой плотности насаждений основная часть ветрового потока огибает плотные

насаждения, за которыми возникает вихревое течение в направлении, противоположном направлению ветра, аналогичное обтеканию уступа с противотоком. Обратные токи за насаждениями подсасывают примесь, которая поднимается с восходящими потоками воздуха и уносится с основной частью ветрового потока над насаждениями (рис. 4).

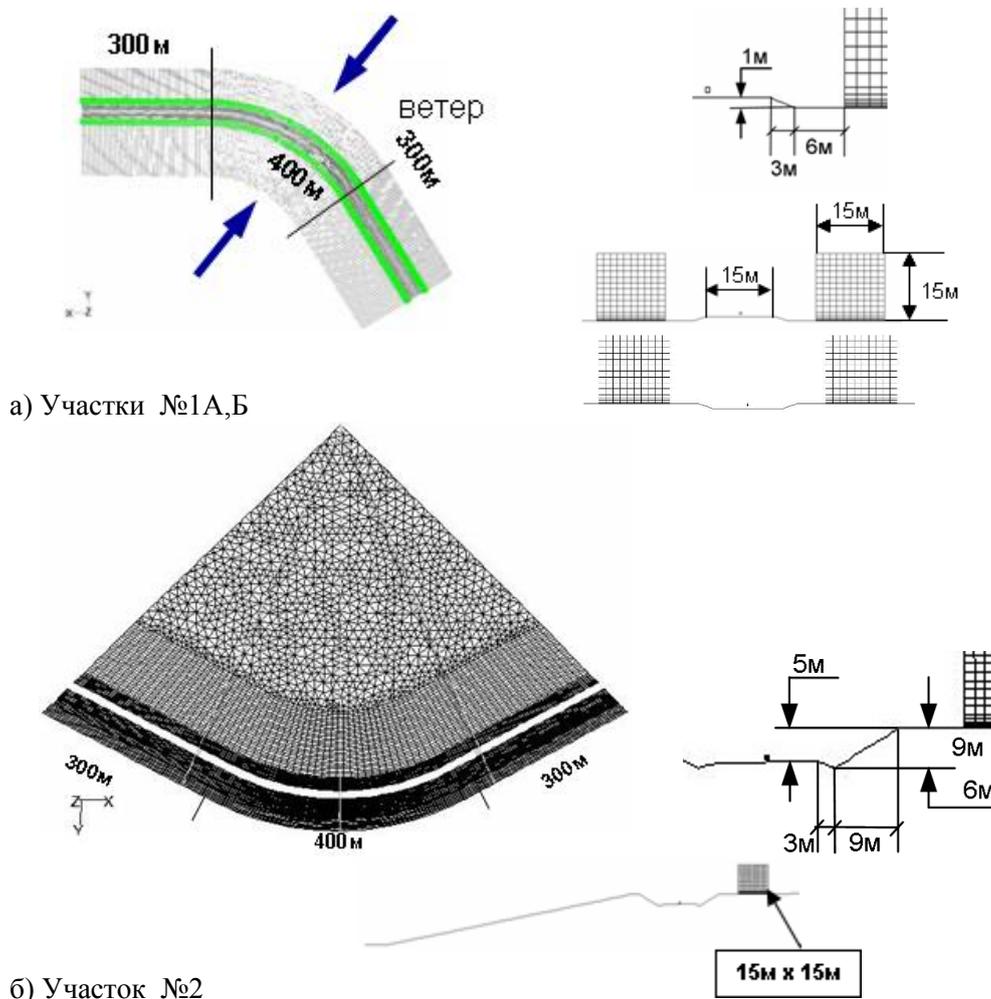


Рис. 3. Рельеф, профиль и сеточная структура криволинейных участков №1А,Б (а), №2 (б)

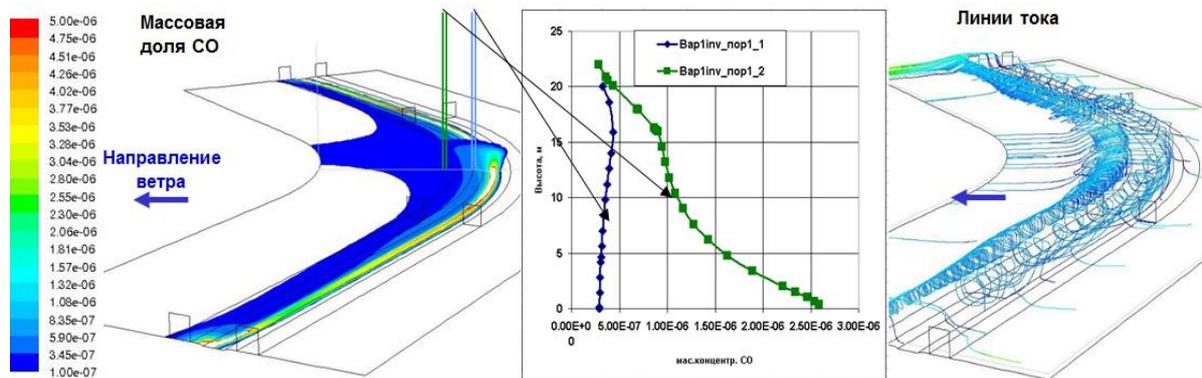


Рис. 4. Массовая доля CO вдоль высоты на обочинах в плоскости симметрии на участке 1А

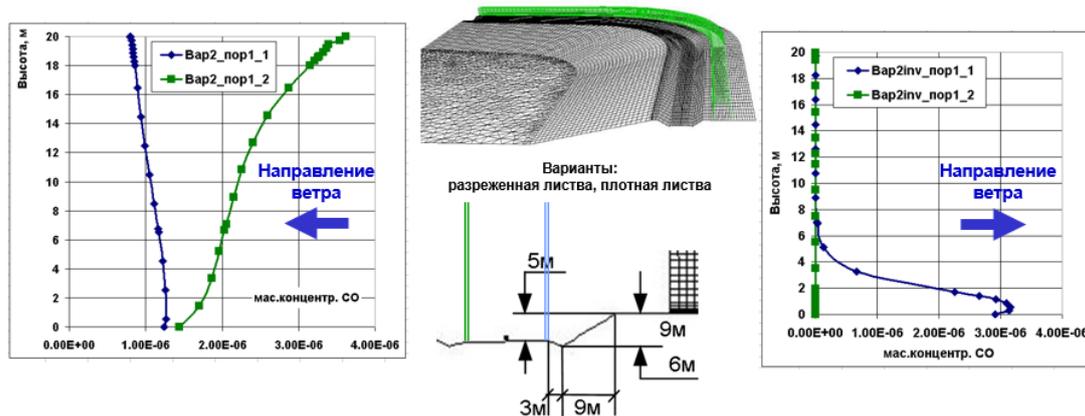


Рис. 5. Массовая доля CO вдоль высоты на обочинах плоскости симметрии в зависимости от плотности листвы и направления ветра на участке №2

Таблица 6 – Матрица численного эксперимента для участка №2

| Направление ветра (1м/с)                        | С выпуклой стороны участка |                            | С вогнутой стороны участка  |                            |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                                                 | Разреженная                | Плотная                    | Разреженная                 | Плотная                    |
| Макс.значен. концентрации CO, кг/м <sup>3</sup> | <b>1.38<sub>10-5</sub></b> | <b>9.65<sub>10-5</sub></b> | <b>5.234<sub>10-6</sub></b> | <b>8.97<sub>10-6</sub></b> |
| То же в плоскости симметрии                     | <b>6.36<sub>10-6</sub></b> | <b>7.16<sub>10-6</sub></b> | <b>4.71<sub>10-6</sub></b>  | <b>7.90<sub>10-6</sub></b> |
| Макс.значен. концентрации CO на плоской модели  | <b>9.57<sub>10-6</sub></b> | <b>7.24<sub>10-6</sub></b> | <b>4.86<sub>10-6</sub></b>  | <b>1.02<sub>10-5</sub></b> |

Скос линий тока по отношению к осевой линии автодороги способствует сносу примеси вдоль автодороги, при этом интенсивность завихренности между насаждениями снижается в сравнении с двумерной моделью.

При направлении ветра в плоскости симметрии с выпуклой стороны примесь разносится от плоскости симметрии в стороны за счет острого угла скоса потока по отношению к осевой линии. При направлении ветра с вогнутой стороны примесь концентрируется в плоскости симметрии со сторон автодороги за счет тупого угла скоса потока по отношению к осевой линии автодороги. Угол скоса – угол между вектором скорости набегающего потока и направлением осевой линии автодороги. В этом заключается принципиальное различие в конвективном распространении примеси между трехмерной моделью и плоской моделью в плоскости симметрии участка автодороги.

Для разреженных насаждений эффект скоса мал, и линии тока практически не отклоняются от начального направления за исключением линий тока в тонком (около 1м) приземном слое, где динамический напор ветра мал. Для плотных насаждений эффект отклонения линий тока от начального направления является существенным, что проявляется в

понижении концентрации примеси в случае ветра с выпуклой стороны изгиба автодороги, либо в повышении концентрации примеси при ветре с вогнутой стороны изгиба в сравнении с плоской моделью.

В рассмотренных примерах возвышение либо занижение насыпи дороги на 1м составляет 1/15 высоты насаждений. Поэтому влияние возвышения насыпи дороги или занижения на 1м при величине склона 1:3 на концентрацию примеси в приземном слое оказывается несущественным, как в зависимости от направления ветра, так и для разреженных, либо плотных насаждений. Вихреобразования, возникающие при обтекании плотных насаждений, существенно искажают эпюру скорости набегающего ветра и линии тока, повышают уровень кинетической энергии турбулентности. При равной плотности посадок и фиксированной скорости ветра двусторонняя поперечная ограниченность пространства автодороги в сравнении с односторонней существенно (в 2-4 раза) ухудшает проветривание придорожного пространства.

**О влиянии понижения местности** на распространение примеси в приземном слое (на примере участка №2). Направление ветра определялось плоскостью симметрии участка

№2. Рассматривались варианты распространения примеси при направлении ветра с выпуклой и вогнутой сторон участка. Матрица численного эксперимента и основные данные приведены в табл.6. Характерной чертой профиля участка является существенное углубление автодороги сравнимое с высотой насаждений (-20м при склоне 1:5). Насаждения существуют только с выпуклой стороны участка.

По результатам моделирования для участка №2 можно сделать следующие выводы.

Воздействия ветра с выпуклой стороны и с вогнутой стороны на конфигурацию участка №2 принципиально различны вследствие: а) несимметричности придорожного рельефа; б) отсутствия насаждений с вогнутой стороны участка автодороги, в) асимметрии скоса дороги по отношению к направлению ветра в плоскости симметрии. По этим причинам сравнительный количественный анализ воздействия ветровой нагрузки с разных сторон участка не имеет смысла.

При воздействии ветра с выпуклой стороны участка №2 тенденции, отмеченные при обтекании участка №1, сохраняются. Именно, при разреженных насаждениях концентрация примеси вблизи дорожного полотна заметно ниже, чем при густых насаждениях.

При воздействии ветра с выпуклой стороны участка трехмерная модель в сопоставлении с плоской моделью в плоскости симметрии дает меньшие значения концентрации примеси вследствие скоса ветрового потока и растекания воздушных масс вдоль дорожного полотна. Линии тока в трехмерной модели отклоняются от плоскости симметрии из-за скоса, улучшают вентиляцию изгиба дорожного полотна, и максимальные значения концентрации примеси достигаются вне плоскости симметрии.

Воздействие ветра с вогнутой стороны на конфигурацию участка №2 определяется склоном и повышением местности к дорожному полотну, углублением дорожного полотна, полосой насаждений. Склон поднимает воздушную массу и примесь, оказывая положительное влияние на вентиляцию места изгиба автодороги.

На изгибах автодорог при наличии углубления дорожного полотна и плотных насаждений трехмерная и плоская модели отличаются существенно. Кроме того, при использовании плоской модели дополнительно теряется информация о концентрации примеси вне рассматриваемой плоскости.

На изгибе дороги сопротивление пропорционально синусу угла скоса, т.е. уменьшается при появлении скоса. Сопротивление ветровой нагрузке дополнительно уменьшается за счет увеличения эффективного расстояния между насаждениями вследствие скоса. Двумерная модель непригодна для моделирования распространения примеси в плоскости симметрии участков типа 1,2.

### Выводы

Разработаны и исследованы модели переноса примеси в приземном слое автомобильной дороги в условиях боковой ветровой эпюры, переменного рельефа прилегающей местности и придорожных насаждений разной плотности. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчетов с данными измерений на местности на примере прямолинейного участка.

Двумерная модель непригодна для моделирования распространения примеси в плоскости симметрии участков типа 1,2. Применение трехмерной модели распространения примеси оправдано на участках автодороги, содержащих изгибы при наличии плотных насаждений.

Показано влияние угла скоса между вектором скорости набегающего потока и направлением осевой линии автодороги на проветривание придорожного пространства. Для уточнения модели необходимы более высокая точность измерений на местности и база данных по геометрии рельефа, насаждений.

Работа выполнялась в рамках проекта, финансируемого правительством Украины.

### Литература

1. Говорущенко Н.Я. Проблемы и методы оценки экологического и энергетического качества автомобильных дорог/ Н.Я.Говорущенко, В.В.Филиппов, Г.В. Величко / Автоматизированные технологии CREDO'2000. - С.45-51
2. Mochida A. 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
3. Borrego C. Emission and dispersion modeling of Lisbon air quality at local scale / C.Borrego, O.Tchepele, A.Costa, J.Amorim, A.Miranda / Atmospheric Environment, 2003.- Vol. 37.- P. 5197-5205
4. Thykier-Nielsen S. Dispersion as consequence of a detonation of a dirty bomb in an urban area / S.Thykier-Nielsen, J.Roed / In: NKS Conference on "Radioactive contamination in urban areas",

- Riso, Roskilde, Denmark, May 7-9, 2003/ - P. 135
5. Murakami S. 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 / in: Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Conf. On Wind Engineering, Texas. Vol.2. – 2003. - P.2821-2828
  6. Mărunțălu O. Numerical Simulation of the Air Pollutants Dispersion Emitted by CHP Using ANSYS CFX / O.Mărunțălu, G.Lăzăroiu, E.Manea, D.Bondrea, L.Robescu / World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering Vol:9, No:9, 2015. - PP.1058-1064
  7. 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
  8. Flow and transport with complex Obstructions/ Applications to Cities. Vegetative Canopies and Industry/ Editors Ye. Gayev, Julian Hunt. Springer Publ.- 2007. - 414p.
  9. Addepalli B. "Investigation of the Flow Structure in Step-Up Street Canyons—Mean Flow and Turbulence Statistics"/ B.Addepalli, E.Pardyjak / Boundary-Layer Meteorology. -V.148. -2013. P.133–155
  10. Солодов В.Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей. Харків, вид-во ХНАДУ, 2011. -167с
  11. Солодов В.Г. Научно-прикладной программный комплекс МТФС® для расчета трехмерных вязких турбулентных течений жидкостей и газов в областях произвольной формы. / В.Г.Солодов, Ю.В.Стародубцев / Сертификат гос. регистр. авт. прав, УГААСП, №5921, 07.16.2002
  12. Варгафтик В.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. -720с.
  13. Солодов В.Г. 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
  - Lisbon air quality at local scale / Atmospheric Environment, 2003.- Vol. 37.- P. 5197-5205
  4. 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
  5. 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). In: Proc. of 11th Int. Conf. On Wind Engineering, Texas. Vol.2. – 2003. - P.2821-2828
  6. Mărunțălu 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 International Journal of Environmental and Ecological Engineering Vol:9, No:9, 2015. - PP.1058-1064
  7. 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
  8. Flow and transport with complex Obstructions/ Applications to Cities. Vegetative Canopies and Industry/ Editors Ye. Gayev, Julian Hunt. Springer Publ.- 2007. - 414p.
  9. Addepalli B., E.Pardyjak Investigation of the Flow Structure in Step-Up Street Canyons—Mean Flow and Turbulence Statistics. Boundary-Layer Meteorology. -V.148. -2013. P.133–155
  10. Solodov V. Turbulent flow modeling. Large Eddy Simulation. Kharkiv, HNADU publ., 2011. -167p
  11. Solodov, V., Starodubtsev, Yu. The Scientific Application Software MTFS® for Calculation of 3D Viscous Turbulent Liquid and Gas Flows in Arbitrary Shape Domains, Certificate of State Registration, Ukrainian State Agency of Copyrights and Related Rights, No.5921, 07.16.2002
  12. Vargaftik V.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. M.: Nauka, 1972. - 720p.
  13. Solodov V., Filippov V., Jdaniuk V. Kiyasko I. Matematичне моделювання забруднення атмосферного повітря придорожного простору. Avtoshlahovik Ukraini - 2009. -№3. P.42-47

### References

1. Govorushenko N.Ya., Filippov V.V., Velichko G.V. Problemi i metodi otsenki ekologicheskogo i energeticheskogo kachestva avtomobilnix dorog / Avtomatizirovanie tehnologii CREDO'2000. P. 45-51
2. 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
3. Borrego C., Tchepel O., Costa A., Amorim J., Miranda A. Emission and dispersion modeling of

*Поступила (received) 12.06.2018 р.*

**Солодов Валерий Григорьевич**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. каф. теоретической механики и гидравлики, тел. : + 38057-707-3730, solodov.v@gmail.com,

**Авершин Андрей Геннадьевич**<sup>1</sup>, к.т.н., ассистент, каф. теоретической механики и гидравлики, <sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

**The model of transfer of atmosphere pollution in roadside vegetation near the highway**

**Abstract.** The work is devoted to the development of

a model and investigation of the process of pollution transfer in the ground layer of a general-purpose motor road with plantations and terrain. As the basis of the model, a long section of a road with a roadside terrain and plantings is considered. Along the axial line of the road, a linear source is assumed, which releases constant impurity consumption along the road. The impurity is transported in the surface layer of the highway in the conditions of the lateral wind curve, alternating relief of the adjacent terrain and roadside plantations of different densities. The model is based on a grid description of the three-dimensional region under consideration. The motion of air continuous medium is described by the Reynolds averaged Navier-Stokes equations. The air continuous medium is assumed to be incompressible, multicomponent, and chemically nonreactive. To model the turbulent transport effects, two-parameter differential turbulence model with wall functions is used as the basis. Simulation of blocking of leaf space and tree branches is performed on the basis of blocking with a porous medium. The Navier-Stokes equations, as well as transport equations for the parameters of the turbulence model, contain source terms in the right-hand parts in the form of a power-law dependence of the velocity modulus in the porosity regions. This model interprets the influence of vegetation as a homogeneous isotropic resistance of a low-inertial volume; the additional terms in the equations of the turbulence model increase the production of turbulence. The study was carried out using the author's software package MTFS®, in which the basic implicit algorithm is provided by the method of variable directions and TVD scheme of 2/3-th order accuracy. The calculations were performed by the method of establishing the flow from a retarded state to a developed steady-state flow in the middle. The flow outside the calculated region was assumed to be completely turbulent, which was determined by the input boundary conditions. The input wind speed profile was used with allowance for the boundary layer. Simulation of impurity distribution for a long rectilinear section was performed and a satisfactory agreement with experimental data was obtained. A study was carried out in areas with a substantially spatial impurity transport structure. It is shown that the slope of the current lines with respect to the axial line of the road facilitates the demolition of the impurity along the road, while the intensity of the vorticity between the plantations decreases in comparison with the two-dimensional model.

**Key words:** Highway, roadside vegetation, boundary layer, transfer of pollutants

**Solodov V.**<sup>1</sup>, D.Sc., Prof., solodov.v@gmail.com,

**Avershin A.**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof.,

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslav Mudry street, Kharkiv, 61002, Ukraine.

**Модель перенесення атмосферних забруднень в смугі насаджень навколо автомобільної дороги**  
**Анотація.** Робота присвячена розробці моделі і дослідженню процесу перенесення забруднюючих речовин в приземному шарі автомобільної дороги

загального призначення при наявності насаджень і рельєфу місцевості. В якості основи моделі розглядається довга ділянка автодороги з придорожнім рельєфом місцевості і насаджень. Уздовж осьової лінії автодороги передбачається лінійне джерело, що виділяє постійну в часі витрату домішки вздовж дороги. Домішка переноситься в приземному шарі автомобільної дороги в умовах бічної вітрової епюрі, змінного рельєфу прилеглої місцевості и придорожніх насаджень різної щільності. Модель заснована на сітковому описі даної тривимірної області. Рух повітряного суцільного середовища описується рівняннями Нав'є-Стокса, усередненими за Рейнольдсом. Суцільне середовище приймається як нестисливе, багатоконпонентне і хімічно нейтральне. Для моделювання турбулентних ефектів перенесення в якості базової використовується високореінольдсова двохпараметрична диференціальна модель турбулентності з пристінними функціями. Моделювання захарашень простору листям і гілками дерев виконується на основі захарашення пористого середовища. Рівняння Нав'є-Стокса, а також рівняння переносу для параметрів моделі турбулентності містять джерельні члени в правих частинах у вигляді ступеневої залежності модуля швидкості в областях пористості. Дана модель інтерпретує вплив рослинності як однорідний ізотропний опір малоінерційного об'єму, додаткові члени в рівняннях моделі турбулентності збільшують виробництво турбулентності. Дослідження проведено з використанням авторського програмного комплексу MTFS®, в якому базовий неявний алгоритм забезпечений розщепленням за методом змінних напрямків і TVD схемою 2/3-го порядку точності. Розрахунки виконані методом встановлення течії від загальмованого стану до розвиненої сталої в середньому течії. Течія поза розрахунковою областю передбачається повністю турбулентною, що визначається вхідними граничними умовами. Вхідний профіль швидкості вітру використовувався з урахуванням прикордонного шару. Виконано моделювання поширення домішки для довгої прямолінійної ділянки і отримано задовільний збіг з експериментальними даними. Проведено дослідження на ділянках з істотно просторовою структурою перенесення домішки. Показано, скіс ліній струму по відношенню до осьової лінії автодороги сприяє знесенню домішки вздовж автодороги, при цьому інтенсивність завіхреності між насадженнями зменшується в порівнянні з двовимірною моделлю.

**Ключові слова:** Автомагістраль, насадження приземний шар, перенесення забруднень

**Солодов Валерій Григорович**<sup>1</sup>, д.т.н., проф. каф. теоретичної механіки і гідравліки, тел.: +38057-707-3730, solodov.v@gmail.com,

**Авершин Андрій Геннадійович**<sup>1</sup>, к.т.н., асистент, каф. теоретичної механіки і гідравліки, тел.: +38057-707-3730,

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.