

Біляєв М. М.,*Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту**ім. академіка В. Лазаряна,**(вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна; e-mail: water.supply.treatment@gmail.com)***Русаківа Т. І.***Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара,**(проспект Гагаріна, 72, Дніпро, 49000, Україна, e-mail: rusakovati1977@gmail.com)*

ЗМЕНШЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ У ВИХЛОПНИХ ГАЗАХ АВТОТРАНСПОРТУ

Реконструкція міської забудови, збільшення площі житлових масивів та чисельності населення, зростання його мобільності обумовлює актуальність проблеми забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Оксид вуглецю, що є продуктом неповного згоряння палива, належить до отруйних газів. Метою дослідження є вивчення процесу зменшення концентрації оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації водяною паром при відборі вихлопних газів автотранспорту в районі розташування світлофору. Розроблено математичну модель для дослідження процесу нейтралізації оксиду вуглецю, яка враховує параметри його надходження, а також нейтралізатора (водяної пари). Оцінено динаміку зміни концентрації в результаті впливу нейтралізатора (водяної пари): виявлено ділянки, де відбувається повна нейтралізація або наявні «застійні зони». Запропоновано методику чисельного розрахунку концентрації оксиду вуглецю під дією нейтралізатора (водяної пари), що заснована на спільному розв'язанні гідродинамічної задачі для визначення швидкості рухомого газового потоку всередині камери та задачі масопереносу для оксиду вуглецю та водяної пари. На основі розробленої чисельної моделі проведено ряд обчислювальних експериментів. Показано зміну поля концентрації оксиду вуглецю у випадку різних способів подачі нейтралізатора. Здійснено порівняльний аналіз і встановлено закономірності зміни концентрації оксиду вуглецю, що міститься у вихлопних газах автотранспорту і накопичується в районах функціонування світлофору. Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку процесів гідродинаміки і масопереносу в установці для нейтралізації. Модель дозволяє врахувати важливі фактори: форму камери, місце розташування отворів для надходження оксиду вуглецю і форсунок для подачі водяної пари. Отримані результати можуть бути застосовані для забезпечення екологічних норм відносно потрапляння оксиду вуглецю в атмосферне повітря.

Ключові слова: викиди автотранспорту, оксид вуглецю, водяна пара, нейтралізація, концентрація.

Вступ. Вихлопні гази є основним джерелом токсичних речовин двигунів внутрішнього згоряння. Вони представляють собою неоднорідну суміш газоподібних речовин із різноманітними хімічними і фізичними властивостями. Ця суміш складається з продуктів повного і неповного згоряння палива, надлишкового повітря, аерозолів і різних мікродомішок (як газоподібних, так і у вигляді рідких і твердих частинок), що надходять із циліндрів двигунів в його випускную систему. Основними нормованими токсичними компонентами вихлопних газів двигунів є оксиди вуглецю, азоту та вуглеводні. Оксид вуглецю (СО, чадний газ) – прозорий, отруйний газ, що не має запаху, трохи легший за повітря, погано розчинний у воді. Оксид вуглецю – продукт неповного згоряння палива,

він утворюється при незадовільному розпилюванні палива та його згорянні з нестачею кисню, а також внаслідок дисоціації діоксиду вуглецю при високих температурах. При подальшому згорянні під час розширення можливе горіння оксиду вуглецю при наявності кисню з утворенням діоксиду вуглецю, що триває у випускному трубопроводі. При експлуатації дизелів концентрація СО у вихлопних газах невелика (приблизно 0,1 – 0,2%), тому концентрацію СО визначають для бензинових двигунів. Окислення СО в СО₂ відбувається у випускній трубі, а також за рахунок нейтралізаторів, які встановлюються на сучасних автомобілях, у зв'язку з необхідністю виконання норм токсичності. Міський автомобільний транспорт є одним із джерел надходження забруднюючих речо-

вин у навколишнє середовище. Норми викидів CO згідно з екологічним стандартом, що регулює вміст шкідливих речовин у вихлопних газах, наступні: Євро3 – 2,3 г/км, Євро4 – 1 г/км, Євро5 – 0,8 г/км. Багато досліджень показали, що від автотранспорту надходить понад 40% оксиду вуглецю, що впливає на стан та якість атмосферного повітря [7, 9, 10, 13–14]. Оцінка якості повітря – процес визначення характеру забруднення атмосферного повітря, моніторинг та застосування додаткових методів дослідження. Наприклад, математичне моделювання дозволяє перевірити результати місцевих даних моніторингу, розширює інформацію про рівень забруднення, є ефективним інструментом для розробки заходів та методів контролю за станом атмосферного повітря з інтенсивним рухом автотранспорту [8, 11–12]. Збільшення площі житлових масивів та чисельності населення потребує модернізації транспортно-дорожньої інфраструктури при комплексній реконструкції міської забудови [3]. Актуалізовано проблему забруднення атмосферного повітря придорожніх населених пунктів внаслідок використання різного типу двигунів і застосування різних видів палива [5].

Існують різні способи захисту атмосферного повітря від викидів автомобільного транспорту: застосування рослинності, встановлення захисних екранів, застосування поглинаючого покриття на дорогах. Одним із активних методів являється відбір (відсос) забруднюючих речовин біля дороги рис. 1. Як відомо, для нейтралізації відведеного забрудненого повітря можуть використовуватися каталізатори в системі відводу, але вони є дорогими.

Метою даної роботи є дослідження процесу зменшення концентрації оксиду вуглецю за рахунок його нейтралізації водяною парою при відборі вихлопних газів автотранспорту в районі розташування світлофору, проведення обчислювальних експериментів, виявлення «застійних» зон в камерах проведення реакцій та застосування заходів їх ліквідації.

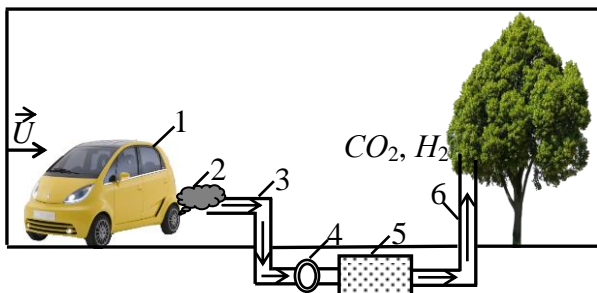


Рис. 1. Схема відбору вихлопних газів: 1 – автотранспорт, 2 – джерело викиду, 3 – газопідвід, 4 – відбираючий пристрій, 5 – камера реакції, 6 – газопідвід

Матеріали і методи досліджень. В даній роботі пропонується для нейтралізації оксиду вуглецю у вихлопних автомобільних газах використовувати подачу водяної пари до камери реакції рис. 2-3. Установка може працювати як у проточному режимі, коли вхідний і вихідний клапани відкриті, так у режимі типу «усереднювач», коли вихідний клапан закритий, газ накопичується в камері, а потім відбувається нейтралізація, отримується усереднена концентрація.

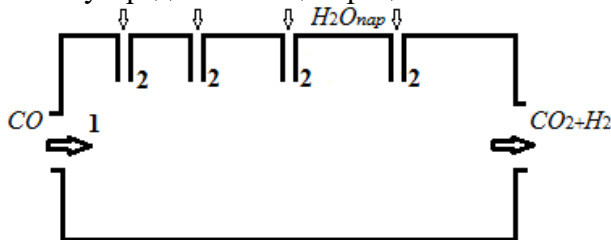


Рис. 2. Камера нейтралізації оксиду вуглецю: 1 – підвід оксиду вуглецю, 2 – подача водяної пари

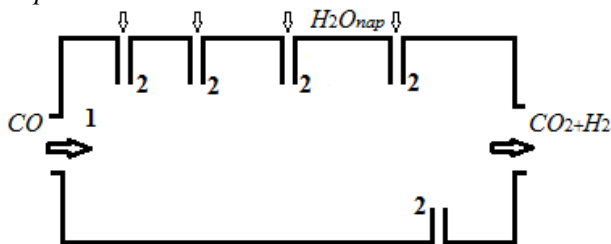
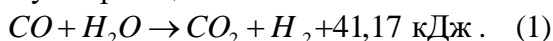


Рис. 3. Камера нейтралізації оксиду вуглецю: 1 – підвід оксиду вуглецю, 2 – подача водяної пари

В цьому випадку буде відбуватися наступна реакція



При застосуванні такого підходу необхідно мати інформацію про ефективність роботи камери змішування. Складність оцінки полягає в тому, що надходження CO в ка-

меру нерівномірне, тому доцільно перед камерою розмішувати датчик рівня CO та згідно з його показниками подавати відповідну кількість водяної пари. Процес розрахунку виконується на основі підходу, що був розглянутий раніше [1–2]. Математичне моделювання процесу нейтралізації оксиду вуглецю водяною парою здійснюється послідовно: по-перше, розраховується поле швидкості газового потоку всередині камери, що є основою розв’язку гідродинамічної задачі; по-друге, виконується розв’язання задачі масопереносу для оксиду вуглецю та водяної пари.

Записується рівняння для потенціалу швидкості P газового потоку

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Ставляться відповідні граничні та початкові умови з урахуванням того, що вісь Y напрямлена вертикально вгору: на стінках камери ставиться гранична умова непротікання $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де \vec{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки; на границі входу газового потоку із патрубка подачі газу $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, де V_n – відоме значення швидкості газового потоку; на границі, де газовий потік виходить із камери (рис. 2) $P = P_0 + const$, де P_0 – деяке число (умова Діріхле).

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа (2) використовується метод Лібмана [6]. В цьому випадку апроксимоване рівняння має вид:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (3)$$

Значення потенціалу швидкості визначається залежністю:

$$P_{i,j} = \frac{(P_{i+1,j} + P_{i-1,j})\Delta y^2 + (P_{i,j+1} + P_{i,j-1})\Delta x^2}{2(\Delta y^2 + \Delta x^2)}. \quad (4)$$

Для того, щоб розпочати процес розрахунку по методу Лібмана необхідно задати «початкове» наближення для потенціалу швидкості в розрахунковій області. Розрахунок ітераційного процесу закінчується при виконанні умови $|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon$, де ε – точність розрахунків, n – номер ітерації.

Знайдені значення потенціалу швидкості дозволяють розрахувати компоненти вектора швидкості газового потоку на гранях різницьових комірок в кожний момент часу:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (5)$$

Процес розповсюдження оксиду вуглецю та водяної пари всередині камери виконується на основі рівняння масопереносу, яке вирішується як для оксиду вуглецю, так і для водяної пари [1–2, 4].

$$\begin{aligned} \frac{\partial[CO]}{\partial t} + \frac{\partial u[CO]}{\partial x} + \frac{\partial v[CO]}{\partial y} &= \\ &= \text{div}(\mu \text{grad}[CO]) + Q_0 \delta(x - x_0)(y - y_0) \\ \frac{\partial[H_2O]_{\text{нар}}}{\partial t} + \frac{\partial u[H_2O]_{\text{нар}}}{\partial x} &+ \\ + \frac{\partial v[H_2O]_{\text{нар}}}{\partial y} &= \text{div}(\mu \text{grad}[H_2O]_{\text{нар}}) + \\ + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), & \quad (7) \end{aligned}$$

де $[CO]$ $[H_2O]_{\text{нар}}$ – концентрація оксиду вуглецю (водяної пари); u, v – компоненти вектора швидкості; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнт турбулентної дифузії; Q_0, Q_i – інтенсивність подачі оксиду вуглецю (водяної пари); $\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)$, $\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функція Дірака для дії джерела подачі оксиду вуглецю (водяної пари); (x_0, y_0) , (x_i, y_i) – координати розташування джерела подачі оксиду вуглецю (водяної пари); t – час.

Для розв’язання рівнянь (6–7) ставляться наступні граничні умови [1–2]: на ділянці входу оксиду вуглецю (водяної пари) в розрахункову область виконується гранична умова виду $[CO]|_{\text{вх}}$ $[H_2O]_{\text{нар}}|_{\text{вх}}$ в момент часу $t=0$; на ділянці, де нейтралізований газ відводиться з розрахункової області, в чисельній моделі виконується «м’яка» гранична умова виду $[CO]_{i+1,j} = [CO]_{i,j}$, $[H_2O]_{\text{нар},i+1,j} = [H_2O]_{\text{нар},i,j}$; на твердих стінках реалізується умова непротікання.

Чисельне інтегрування рівнянь (6–7) проводиться на прямокутній різницьовій сітці

за допомогою неявної різницевої схеми розщеплення [6].

Алгоритм розв'язання задачі передбачає наступну послідовність: у початковий момент часу камера заповнена оксидом вуглецю, вирішується гідродинамічна задача і визначається поле швидкості газового потоку всередині камери; розв'язується рівняння (6) для визначення концентрації оксиду вуглецю всередині камери на новий момент часу; розв'язується рівняння (7) для визначення концентрації водяної пари всередині камери на новий момент часу; в кожному різницевому осередку виконується перерахунок концентрації оксиду вуглецю та водяної пари внаслідок їх хімічної взаємодії, що визначається стехіометричними співвідношеннями. Вважається, що хімічна реакція протікає на часовому проміжку Δt .

У результаті обчислюються нові значення концентрації оксиду вуглецю та водяної пари, розрахунок повторюють, починаючи з другого кроку.

Результати дослідження. На основі розробленої математичної моделі та чисельної її реалізації було створено програмний пакет «Neutralization CO», який дозволяє проводити ряд обчислювальних експериментів. На наступних рис. 4 – 7 показано результати чисельних розрахунків. Процес нейтралізації відбувається таким чином, що спочатку в камеру надходять вихлопні гази, які містять оксид вуглецю в момент часу t_0 , потім подається водяна пара. Геометричні розміри задано в співвідношенні довжини та ширини 2:1, $\mu_x = \mu_y = 0,7 \text{ м}^2/\text{с}$, $\Delta t = 0,1 \text{ с}$. На рис. 4-6 наведено розподіл концентрації оксиду вуглецю в різні моменти часу для випадку, коли водяна пара подається лише зверху рис. 2.

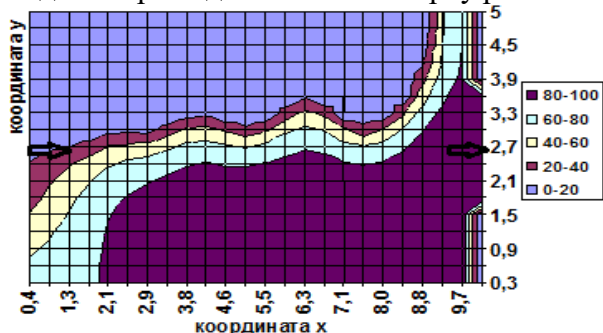


Рис. 4. Розподіл концентрації оксиду вуглецю $t=1\text{с}$, $C_{\text{max}}=2,67 \text{ мг/м}^3$

Значення концентрації оксиду вуглецю представлено у відсотках від максимального значення в камері нейтралізації. Зменшення концентрації відбувається за напрямком руху потоку, в зоні розташування форсунок подачі водяної пари цей процес відбувається дуже швидко, але в нижньому правому куті дія нейтралізатора проявляється повільніше, спостерігається наявність застійних зон, тому пропонується в цілях прискорення даного процесу розмістити ще одну форсунку подачі водяної пари знизу рис. 3.

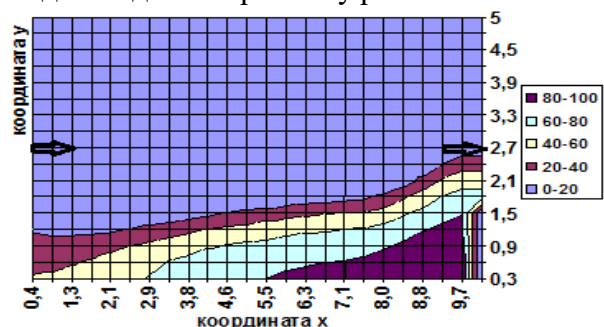


Рис. 5. Розподіл концентрації оксиду вуглецю $t=1,6\text{с}$, $C_{\text{max}} = 2,42 \text{ мг/м}^3$

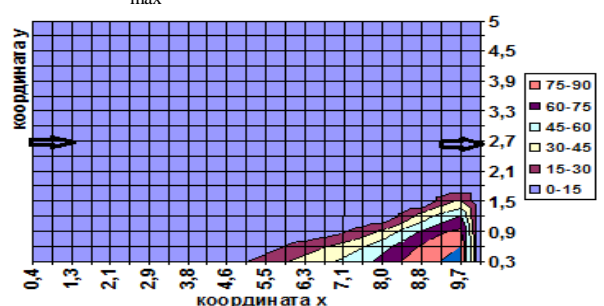


Рис. 6. Розподіл концентрації оксиду вуглецю $t=2\text{с}$, $C_{\text{max}} = 1,56 \text{ мг/м}^3$

Розподіл концентрації оксиду вуглецю в різні моменти часу та динаміка зміни для другого випадку наведено на рис. 7-8. На момент часу 2 с концентрація оксиду вуглецю складає менше 5 %.

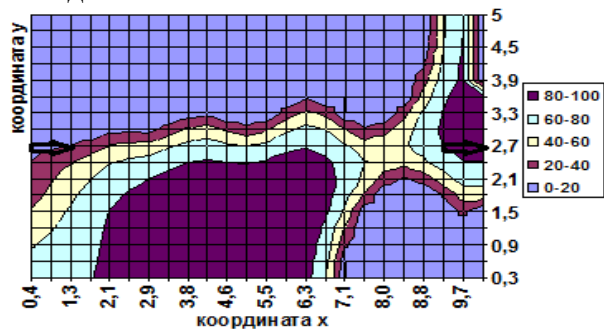


Рис. 7. Розподіл концентрації оксиду вуглецю $t=1\text{с}$, $C_{\text{max}} = 2,64 \text{ мг/м}^3$

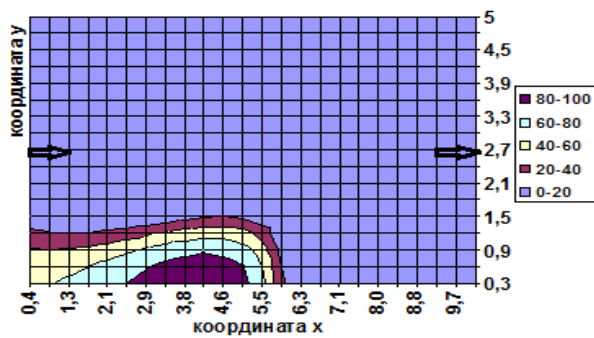


Рис. 8. Розподіл концентрації оксиду вуглецю $t=1,6с$, $C_{max} = 1,71 \text{ мг/м}^3$

Висновки. В результаті виконаного дослідження було отримано наступні результати: обчислено поле швидкості оксиду вуглецю в камері змішування при розв'язку гідродинамічної задачі; досліджено динаміку зміни концентрації оксиду вуглецю та водяної пари при розв'язку задачі масопереносу; виявлено, що в камері нейтралізації можуть утворюватися «застійні» зони; розглянуто способи їх уникнення. Створено програмне забезпечення, що дозволяє проводити оперативні обчислювальні експериментів по дослідженню зміни концентрації оксиду вуглецю з урахуванням форми камери, розташування форсунок подачі водяної пари, потужності джерел та їх місця знаходження.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Беляев, Н.Н. Исследование изменения концентрации кислых сточных вод в процессе их нейтрализации [Текст] / Н.Н. Беляев, Т.И. Русакова // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Механіка». – 2017. – Вип.21, Т. 25 №5. – С. 53–61.
2. Беляев, Н.Н. Численное моделирование процессов массопереноса при нейтрализации сточных вод [Текст] / Н.Н. Беляев, Т.И. Русакова // Науковий вісник будівництва. – 2017. – Т. 87, №1. – С. 159–165.
3. Ковальов, В.В. Організація модернізації транспортно-дорожньої інфраструктури при комплексній реконструкції міської забудови / В.В. Ковальов // Науковий вісник будівництва. – 2018. – Т. 92, №2. – С. 167–172.
4. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Угненко Є.Б. Розрахунок питомих рівнів платежів (екокомпенсацій) за викиди в атмосферу шкідливих речовин автотранспортними засобами [Текст] / Є.Б. Угненко, О.

- М.Ужвієва // Науковий вісник будівництва. – 2015. – Т. 82, №4. – С. 211–213.
6. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
7. Allen A.G. Size distribution of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom [Text] / A.G. Allen, E. Nemitz, J.P. Shi, R.M. Harrison, J.C. Greenwood // Atmospheric Environment. – 2001. – No. 35. – P. 4581–4591.
8. Bellasio R. Size distribution of trace metals in atmospheric aerosols in the United Kingdom [Text] / R. Bellasio // Atmospheric Environment. – 1997. – No. 31. – P. 1539–1551.
9. Harrison R.M. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment [Text] / R.M. Harrison, R. Tilling, M.S.C. Romero, S. Harrad, K. Jarvis // Atmospheric Environment. – 2003. – No. 31. – P. 2391–2402.
10. Monaci F. Biomonitoring of airborne metals in urban environments: new tracers of vehicle emission, in place of lead [Text] / F. Monaci, F.Moni, E. Lanciotti, D. Grechi, R. Bargagli // Environmental Pollution. – 2000. – No. 107. – P. 321–327.
11. Simmons W.A. Estimations of primary nitrogen dioxide exhaust emissions from chemiluminescence NOx measurements in a UK road tunnel [Text] / W.A. Simmons, P.W. Seakins // Science of the Total Environment. – 2012. – No. 438. – P. 248–259.
12. Szabo G. Methods of modelling the pollutant emissions from the line emitters used in Slovak Republik [Text] / Szabo G., J. Macala, L. Kozakova // Acta Montanistica Slovaca. – 2005. – No. 10(1). – P. 236–245.
13. Takuchev B.N. Dispersion modeling of the air pollution, emitted by the traffic in the transport tunnel under the old town of plovdiv [Text] / B.N. Takuchev, I. Vasileva, Petrova S. // Ecologia balkanica. – 2014. – No. 6(1). – P. 73–86.
14. Wählin P. Characterization of traffic generated particulate matter in Copenhagen [Text] / P. Wählin,
15. Berkowicz R., Palmgren F. // Atmospheric Environment. – 2006. – No. 40. – P. 2151–2159.

Беляев Н. Н., Русакова Т. И. УМЕНЬШЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА УГЛЕРОДА В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ АВТОТРАНСПОРТА. Реконструкция городской застройки, увеличение площади жилых массивов и численности населения, рост его мобильности ставит актуальной проблему загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта. Оксид углерода, является продуктом неполного сгорания топлива, относится к ядовитым газам. Целью исследования является изучение процесса уменьшения концентрации оксида углерода за счет его нейтрализации водяным паром при отборе выхлопных газов автотранспорта в районе расположения светофора. Разработана математическая модель для исследования процесса нейтрализации оксида углерода, которая учитывает параметры его поступления, а также нейтрализатора (водяного пара). Выполнена оценка динамики изменения концентрации в результате воздействия нейтрализатора (водяного пара): обнаружены участки, где происходит полная нейтрализация или образуются «застойные зоны». Предложена методика численного расчета концентрации оксида углерода под действием нейтрализатора (водяного пара), основанная на совместном решении гидродинамической задачи по определению компонент скорости подвижного газового потока внутри камеры и задачи массопереноса для оксида углерода и водяного пара. На основе разработанной численной модели проведен ряд вычислительных экспериментов. Показано изменение поля концентрации оксида углерода в случае различных способов подачи нейтрализатора. Выполнен сравнительный анализ и установлены закономерности изменения концентрации оксида углерода, который содержится в выхлопных газах автотранспорта и накапливается в районах действия светофора. Предложена эффективная численная модель для расчета процессов гидродинамики и массопереноса в установке для нейтрализации. Модель позволяет учесть важные факторы: форму камеры, место расположения отверстий для поступления оксида углерода и форсунок для подачи водяного пара. Полученные результаты могут быть целесообразными для обеспечения экологических норм относительно поступления оксида углерода в атмосферный воздух.

Ключевые слова: выбросы автотранспорта, оксид углерода, водяной пар, нейтрализация, концентрация.

Biliaiev M. M., Rusakova T. I. REDUCTION OF CARBON MONOXIDE IN THE EXHAUST GASES OF MOTOR TRANSPORT. Reconstruction of urban building, increasing of residential areas and population, its mobility makes a problem of atmospheric air pollution by emissions of motor transport relevant. Carbon monoxide, a product of incomplete combustion of fuels, refers to toxic gases. The purpose is to study the process of reducing the concentration of carbon monoxide due to its neutralization by water vapor during the selection of vehicle exhaust gases in the vicinity of the traffic light. A mathematical model has been developed to study the process of carbon monoxide neutralizing, which takes into account the parameters of its intake, as well as neutralizer (water vapor). An assessment of the dynamics of change in concentration as a result of the action of the neutralizer (water vapor) was performed: areas where complete neutralization occurs or "stagnant zones" are formed. There was proposed a technique for calculating the concentration of carbon monoxide under the action of neutralizer (water vapor). It is based on the joint solution of the hydrodynamic problem of determining the components of the velocity of mobile gas flow inside the chamber and the mass transfer problem for carbon monoxide and water vapor. Based on the developed numerical model, a number of computational experiments were carried out. The change in the carbon monoxide concentration field is shown in the case of different ways of supplying the neutralizer. A comparative analysis has been performed and the regularities of the change in the concentration of carbon monoxide contained in the exhaust gases of motor vehicles have been established and accumulate in the areas of the traffic light operation. An effective numerical model is proposed for calculating the processes of hydrodynamics and mass transfer in an installation for neutralization. The model allows to take into account the important factors: the shape of the chamber, the location of the openings for the intake of carbon monoxide and nozzles for supplying water vapor. The obtained results may be appropriate for ensuring environmental standards for the intake of carbon monoxide in the atmospheric air.

Key words: emissions of motor vehicles, carbon monoxide, water vapor, neutralization, concentration.