

5  
Б 61

АВТОМОБИЛЬ  
ЭВЕРЕСТ

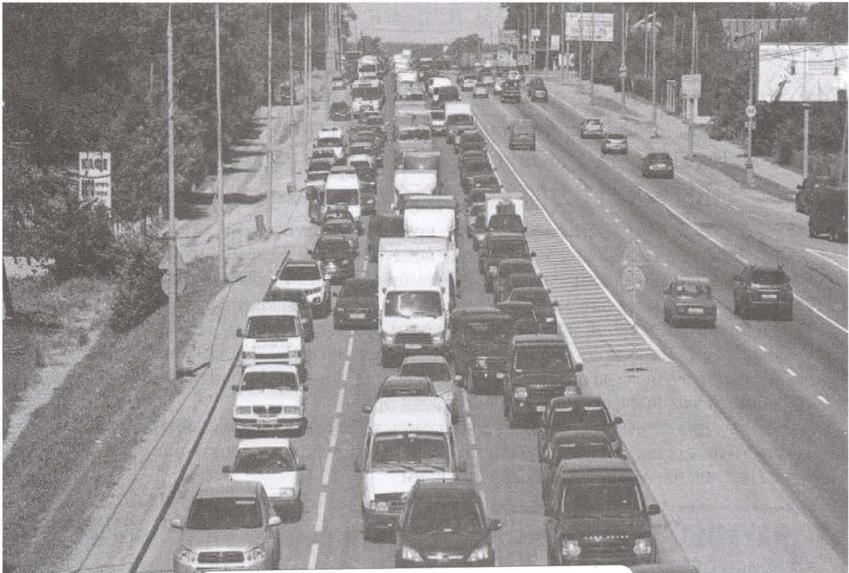
Н. Н. Беляев  
Т. И. Русакова  
П. С. Кириченко

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА НА УЛИЦАХ ГОРОДОВ



Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, П. С. Кириченко

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА НА УЛИЦАХ ГОРОДОВ



НТБ ДІТУ



000858487

ВНЛ

Днепропетровск, 2014

УДК 502.3:504.5:629.33

ББК 20.1:39.3

М 74

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *Л. С. Савин* (ПГАСА)

д-р техн. наук, проф. *В. Д. Петренко* (ДИИТ)

д-р техн. наук, проф. *С. З. Полищук* (ПГАСА)

*Рекомендовано к печати Ученым советом  
Днепропетровского национального университета железнодорожного  
транспорта имени академика В. Лазаряна*

**Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, П. С. Кириченко**

М 74 Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами  
автотранспорта на улицах городов [Текст] / Н. Н. Беляев,  
Т. И. Русакова, П. С. Кириченко. Д.: Акцент ПП, 2014. – 159 с.

ISBN 978-617-7109-51-7

В монографии рассмотрены новые математические модели для экспертной оценки уровня загрязнения воздушной среды выбросами автотранспорта. Математическое моделирование процесса аэродинамики ветрового потока на улицах осуществляется с помощью метода дискретных вихрей и модели вихревых течений идеальной жидкости с использованием неявных разностных схем. На основе разработанных математических моделей проведен ряд вычислительных экспериментов для решения комплекса прикладных задач в области экологической безопасности.

Для студентов, аспирантов, научных работников и специалистов в области экологической безопасности, гидродинамики, прикладной математики.

Лт. 92. Табл. 7 Библиогр.: 144 найм.

УДК 502.3:504.5:629.33

ББК 20.1:39.3

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА**  
ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ISBN 978-617-7109-51-7

© Беляев Н. Н., Русакова Т. И.,  
Кириченко П. С., 2014

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. Анализ состояния проблемы по загрязнению атмосферного воздуха в городах</b> .....	7
1.1 Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта.....	7
1.2 Анализ литературных источников по загрязнению атмосферного воздуха выбросами автотранспорта.....	18
<b>2. Моделирование качества атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в условиях городской застройки</b> .....	43
2.1 Метод дискретных вихрей для расчета скорости ветрового потока для схемы «уличный каньон».....	43
2.2 Модель рассеивания загрязняющих веществ автотранспорта в условиях городской застройки.....	55
2.3 Модель химической трансформации загрязнителей в атмосфере при выбросах автотранспорта .....	57
2.4 Расчет поля скорости ветрового потока для схемы «уличный каньон» на базе отрывных течений невязкой жидкости.....	60
2.5 Физические параметры, необходимые для реализации математических моделей по оценке уровня загазованности воздушной среды в условиях городской застройки.....	62
<b>3. Численное интегрирование уравнений математических моделей</b> .....	72
3.1 Численное интегрирование уравнений гидродинамики.....	72
3.2 Численное интегрирование уравнения переноса загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.....	77
3.3 Алгоритм решения задачи по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха в условиях городской застройки.....	82

<b>4. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов.....</b>	<b>83</b>
4.1 Исследование динамики обтекания зданий по схеме «уличный каньон»	83
4.2 Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта для схемы «уличный каньон.....	95
4.3 Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта в микрорайонах города.....	108
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>141</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>142</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в городах автомобильный транспорт является одним из наиболее интенсивных источников выброса вредных веществ в атмосферу, а в Украине, следует заметить, наблюдается тенденция к увеличению общего количества автомобильных средств. Поэтому крайне важной становится задача по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города. В зарубежной литературе эту задачу называют «urban safety», т.е. задачей, решение которой связано с безопасностью урбосистемы. При проектировании и эксплуатации автомобильных магистралей необходимо применение методов прогнозного инженерного расчета зон экологически неблагоприятного загрязнения. Важность решения данной задачи очевидна в случае реконструкции микрорайонов города, при проектировании и строительстве новых автомагистралей, изменении в структуре транспортных потоков внутри города: создание транспортных развязок на разных уровнях, магистралей-дублеров, кольцевых дорог, размещение автостоянок. Кроме этого, Закон Украины «Про охорону атмосферного повітря» требует разработки комплекса мероприятий по снижению опасного влияния автомобильных выбросов на воздушный бассейн. Для разработки эффективных мероприятий по обеспечению требуемого уровня экологической безопасности в городах необходимо заранее уметь вычислять уровень загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта. Модели, используемые в настоящее время на практике в Украине

для этих целей, не учитывают влияния зданий на процесс рассеивания выбросов от автомобилей, поскольку разработаны для случая однородной поверхности. Важно подчеркнуть, что неучет такого важного фактора приводит к неверной оценке масштаба загрязнения. В монографии рассматривается комплекс научно обоснованных математических моделей, позволяющих оперативно получать прогнозную информацию о динамике загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта в условиях городской застройки.

## **ГЛАВА 1**

### **Анализ состояния проблемы по загрязнению атмосферного воздуха в городах**

В данном разделе представлены результаты обзора научных работ, посвященных изучаемой проблеме загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомобильного транспорта в условиях городской застройки.

#### **1.1 Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта**

Автотранспорт является основным антропогенным источником загрязнения воздушной среды в городах. Как известно, выбросы от автомобильного транспорта содержат большое количество вредных веществ. Практически во всех странах сохраняется тенденция роста количества автомобилей. В настоящее время в мире производится примерно 60 млн автомобилей в год [83, 33]. Общее количество автомашин в мире составляет примерно 400 млн. Один автомобиль в среднем поглощает ежегодно 4 т кислорода и выбрасывает с выхлопными газами примерно 800 кг оксида углерода, около 40 кг оксидов азота и почти 200 кг различных углеводородов.

Выбросы выхлопных газов – одна из основных причин превышения допустимых концентраций токсичных веществ и канцерогенов в атмосфере крупных городов, образования смогов. Количество выделяемых в атмосферу автомобилями загрязняющих веществ

определяется массовыми выбросами газов и составом выхлопных газов. Количество этих газов в основном определяется массовым расходом топлива автомобиля. Расход по расстоянию нормируется и обычно указывается производителями (одна из потребительских характеристик). Один килограмм сжигаемого бензина приводит к образованию 16 кг смеси различных газов.

Основными выбросами автомобиля являются выхлопные газы, картерные газы и топливные испарения [5, 25, 42]. Выхлопные газы содержат углеводороды, окись углерода, окислы азота ( $\text{NO}_x$ ), бенз(а)пирен, альдегиды и сажу. Картерные газы – смесь части выхлопных газов, проникшей через неплотности поршневых колец в картер двигателя с парами моторного масла. Топливные испарения попадают в атмосферный воздух из системы питания двигателя: стыков, шлангов и т.д. В таблице 1.1 представлен состав выхлопных газов автомобилей [3, 5].

**Таблица 1.1 – Состав выхлопных газов автомобилей**

Вид загрязнителя	Бензиновые двигатели	Дизели
$\text{N}_2$ , об. %	74–77	76–78
$\text{O}_2$ , об. %	0,3–8,0	2,0–18,0
$\text{H}_2\text{O}$ (пары), об. %	3,0–5,5	0,5–4,0
$\text{CO}_2$ , об. %	0,0–16,0	1,0–10,0
$\text{CO}$ , об. %	0,1–5,0	0,01–0,5
Окислы азота, об. %	0,0–0,8	0,0002–0,5
Углеводороды, об. %	0,2–3,0	0,09–0,5
Альдегиды, об. %	0,0–0,2	0,001–0,009
Сажа, $\text{г/м}^3$	0,0–0,04	0,01–1,10
Бенз(а)пирен-3,4 $\text{г/м}^3$	$10\text{--}20 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$

Наибольшую опасность представляют оксиды азота, которые в 10 раз более опасны, чем угарный газ, доля токсичности альдегидов относительно невелика и составляет 4 – 5% от общей токсичности выхлопных газов. Токсичность углеводородов сильно отличается. Непредельные углеводороды в присутствии диоксида азота фотохимически окисляются, образуя ядовитые кислородосодержащие соединения – составляющие смогов. Обнаруженные в газах полициклические ароматические углеводороды – сильные канцерогены. Среди них наиболее изучен бенз(а)пирен, кроме него обнаружены производные антрацена. При использовании сернистых бензинов в выхлопные газы могут входить оксиды серы, при применении этилированных бензинов – свинец, бром, хлор и их соединения.

Образование тех или иных токсичных веществ при работе двигателей автомобилей обусловлено целым рядом факторов: типом топлива, температурой в камере сгорания, условиями теплоотвода и т.д. Например, окись углерода образуется на поверхности поршня и на стенке цилиндра, в котором активация не происходит вследствие интенсивного теплоотвода стенки, плохого распыления топлива и диссоциации  $\text{CO}_2$  на  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  при высоких температурах. Выброс оксидов азота зависит от температуры среды. С увеличением нагрузки на двигатель автомобиля возрастает температура в камере сгорания и увеличивается выброс оксидов азота. Гидроводороды образуются в камере сгорания двигателя, когда пламя гаснет в очень богатой смеси, где не хватает воздуха, при плохом распылении топлива и невысокой температуре. Особенно возрастает выброс углеводорода, когда двигатель работает в режиме холостого хода. Образование

дыма связано с неполным сгоранием топлива и последующей конденсацией. Присутствие дыма показывает, что температура недостаточна для полного сгорания топлива. Черный дым от двигателя включает в себя сажу. Образование сажи зависит от температуры, давления в камере сгорания, типа топлива, отношения топливо-воздух. Образование альдегидов происходит, когда топливо сжигается при низких температурах и возникает окисление слоя масла на стенке цилиндра.

Токсичность выбросов от автомобильного транспорта для здоровья человека – очевидна: длительное взаимодействие со средой, отравленной выхлопными газами автомобилей, вызывает общее ослабление организма – иммунодефицит. Кроме того, газы сами по себе могут стать причиной различных заболеваний: дыхательной недостаточности, гайморита, ларинготрахеита, бронхита, бронхопневмонии, рака легких. Также выхлопные газы вызывают атеросклероз сосудов головного мозга, могут стать причиной нарушения работы сердечнососудистой системы.

Законодательное регулирование: контролируется качественный состав изготавливаемого и реализуемого топлива; предусмотрен контроль за состоянием и регулировками автомобилей; вводятся повышенные ставки транспортного налога на мощность двигателя автомобиля; топливо облагается специальными акцизами; предусмотрены нормативы на выпускаемые автомобили. Приняты стандарты ЕВРО, задающие как токсичность, так и количественные показатели, например: по ЕВРО-3 выбросы: СН до 0,2 г/км, СО до 2,3 г/км, NO<sub>x</sub> до 0,15 г/км; по ЕВРО-4 выбросы: СН до 0,1 г/км, СО до 1,0 г/км, NO<sub>x</sub> до 0,08 г/км. В некото-

рых регионах вводятся ограничения на движение большегрузного автотранспорта.

Центральная геофизическая обсерватория Украины опубликовала рейтинг самых экологически загрязненных городов. Эта государственная организация отслеживает состояние воздуха в 53 украинских городах (табл.1.2).

**Таблица 1.2 – Рейтинг городов Украины по уровню загрязнения воздуха**

№ п/п	Город	Область	Индекс загрязнения атмосферы	Уровень загрязнения воздуха
1	Мариуполь	Донецкая	16,5	очень высокий
2	Ужгород	Закарпатская	14,4	очень высокий
3	Горловка	Донецкая	14,3	очень высокий
4	Одесса	Одесская	14,3	очень высокий
5	Ровно	Ровенская	14,2	очень высокий
6	Славянск	Донецкая	13,9	высокий
7	Запорожье	Запорожская	12,9	высокий
8	Макеевка	Донецкая	12,8	высокий
9	Донецк	Донецкая	12,8	высокий
10	Лисичанск	Луганская	12,4	высокий
11	Днепродзержинск	Днепропетровская	12,1	высокий
12	Армянск	АР Крым	12,1	высокий
13	Красноперекопск	АР Крым	11,5	высокий
14	Днепропетровск	Днепропетровская	11,4	высокий
15	Кривой Рог	Днепропетровская	11,2	высокий
16	Рубежное	Луганская	11,0	высокий
17	Краматорск	Донецкая	10,8	высокий
18	Луганск	Луганская	10,3	высокий
19	Дзержинск	Донецкая	10,2	высокий
20	Енакиево	Донецкая	10,2	высокий
21	Северодонецк	Луганская	10,1	высокий
22	Николаев	Николаевская	9,2	высокий
23	Луцк	Волынская	8,6	высокий

24	Ялта	АР Крым	7,8	высокий
25	Алчевск	Луганская	6,9	повышенный
26	Киев	Киевская	6,8	повышенный
27	Херсон	Херсонская	6,3	повышенный
28	Черкассы	Черкасская	5,9	повышенный
29	Львов	Львовская	5,6	повышенный
30	Светловодск	Кировоградская	5,4	повышенный
31	Сумы	Сумская	5,4	повышенный
32	Кировоград	Кировоградская	5,3	повышенный
33	Хмельницкий	Хмельницкая	5,2	повышенный
34	Кременчуг	Полтавская	4,9	низкий
35	Черновцы	Черновицкая	4,8	низкий
36	Винница	Винницкая	4,5	низкий
37	Полтава	Полтавская	4,4	низкий
38	Житомир	Житомирская	4,2	низкий
39	Керчь	АР Крым	4,2	низкий
40	Тернополь	Тернопольская	3,9	низкий
41	Севастополь	АР Крым	3,8	низкий
42	Харьков	Харьковская	3,6	низкий
43	Симферополь	АР Крым	3,6	низкий
44	Измаил	Одесская	3,5	низкий
45	Белая Церковь	Киевская	3,5	низкий
46	Александрия	Кировоградская	3,4	низкий
47	Ивано-Франковск	Ивано- Франковская	3,4	низкий
48	Украинка	Киевская	3,1	низкий
49	Чернигов	Черниговская	3,1	низкий
50	Бровары	Киевская	2,9	низкий
51	Обухов	Киевская	2,9	низкий
52	Григорьевка	Киевская	2,6	низкий
53	Комсомольск	Полтавская	2,5	низкий

Выбросы от автотранспорта в городах являются основным источником загрязняющих веществ в атмосфере, они постоянно растут как в Украине, так и во всем мире. К тому же выбросы от автотранспорта являются наиболее трудно регулируемыми. Следует от-

метить, что общая тенденция в мире – снижение доли перевозок грузов железнодорожным транспортом, который, как известно, осуществляет значительно меньше выбросов в атмосферу по сравнению с автомобильным. Это связано с тем, что автомобильный транспорт, в отличие от железнодорожного, позволяет доставить груз непосредственно на объект. Совершенно очевидно, что такая тенденция будет иметь место и в Украине. Это значит, что интенсивность автомобильного транспорта будет увеличиваться. На территории Днепропетровска находится около 1500 автохозяйств, государственного транспорта насчитывается около 27 тысяч единиц, в личном пользовании граждан находится около 123000 автомобилей.

В Днепропетровске размещен комплекс стационарных постов наблюдения за качеством воздушной среды (табл. 1.3). Данные посты осуществляют постоянный мониторинг уровня загрязнения воздушной среды различными вредными веществами.

**Таблица 1.3 – Автоматические посты контроля атмосферного воздуха г. Днепропетровска**

Пост №1	пр. Калинина, 77
Пост №10	парк им. Шевченко
Пост №11	пл. Островского
Пост №13	ул. Философская, 94
Пост №19	ул. Краснопольская, 11
Пост №20	ул. Петровского, 38
Пост №23	ул. Каруны, 125
Пост №24	ул. Б. Хмельницкого, 20
Пост №25	пр. Героев, 21
Пост №26	ж.м. Левобережный

Так, на рис. 1.1 представлены данные с поста № 1 (проспект Калинина, г. Днепропетровск) по величине концентрации оксида углерода за период времени с 25.06.12 по 01.02.14.

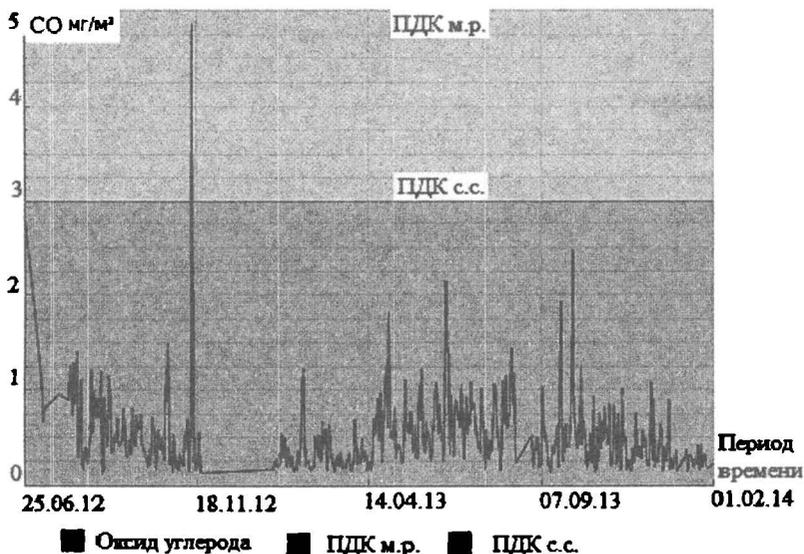


Рисунок 1.1 – Изменение концентрации оксида углерода за период времени с 25.06.12 по 01.02.14

Анализируя данные рис. 1.1, следует отметить, что показания данного поста не позволяют оценить влияние автотранспорта на уровень загрязнения атмосферного воздуха, поскольку он размещен на определенном расстоянии от автомагистрали.

Анализ статистических данных по качеству воздушной среды в городе Днепропетровске показал, что в ряде районов (площадь Островского, проспект Газеты Правда, площадь Ленина) наблюдается превышение предельно допустимых норм уровня загазованности по оксиду углерода (CO) и углеводороду (CH). Наибольший уровень загрязнения воздуха отмечен на

площади Островского – одной из транспортных развязок Днепропетровска. Одной из причин загрязнения воздуха являются отработанные газы автотранспорта. Для снижения влияния автомобильного транспорта на экологическое состояние Днепропетровска управление по экологии города проводит работу по следующим направлениям: переоборудование автотранспортных средств на сжатый природный газ; улучшение экологических свойств топлива путем проверки его модификации; проведение контроля и регулирования топливной аппаратуры на токсичность выхлопных газов

Был выполнен анализ интенсивности эмиссии загрязняющих веществ от автотранспорта в Днепропетровской области. Для анализа использовались данные Главного управления статистики в Днепропетровской области.

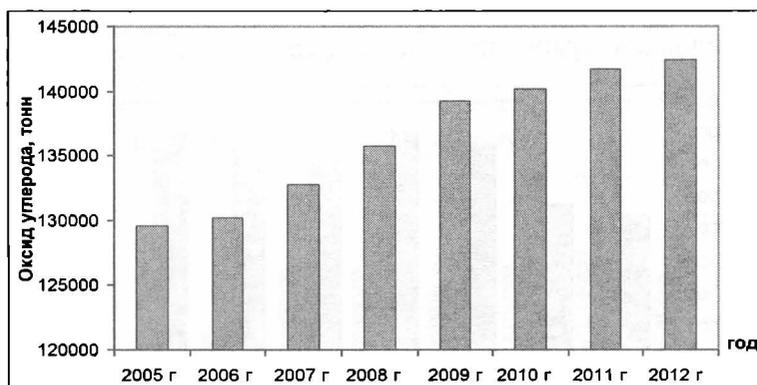


Рисунок 1.2 – Величина выбросов загрязняющих веществ (кроме оксида углерода) от всех видов автотранспорта в атмосферу

Предоставленные данные были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 1.2–1.7), которые

дают возможность проанализировать динамику выбросов от автотранспорта по Днепропетровской области за период с 2005 года по 2012 год, как по общим выбросам, так и по отдельным их составляющим: оксиду углерода, диоксиду азота, оксиду азота, диоксиду серы, сажи. Как видно, эти показатели постоянно увеличиваются.

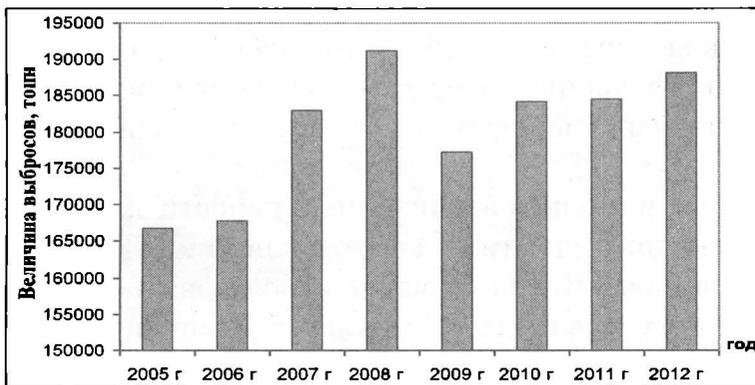


Рисунок 1.3 – Величина выбросов оксида углерода от всех видов автотранспорта в атмосферу

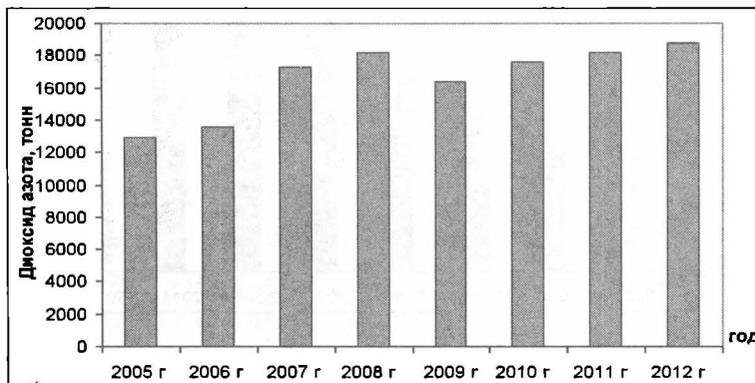


Рисунок 1.4 – Величина выбросов диоксида азота от всех видов автотранспорта в атмосферу

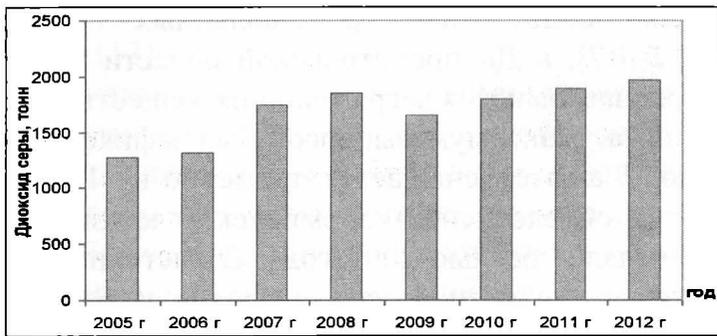


Рисунок 1.5 – Величина выбросов диоксида серы от всех видов автотранспорта в атмосферу

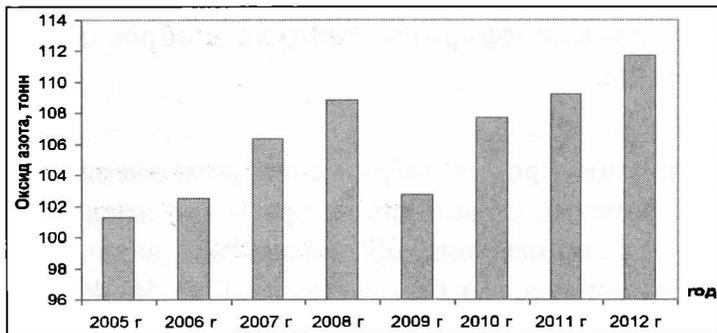


Рисунок 1.6 – Величина выбросов оксида азота от всех видов автотранспорта в атмосферу

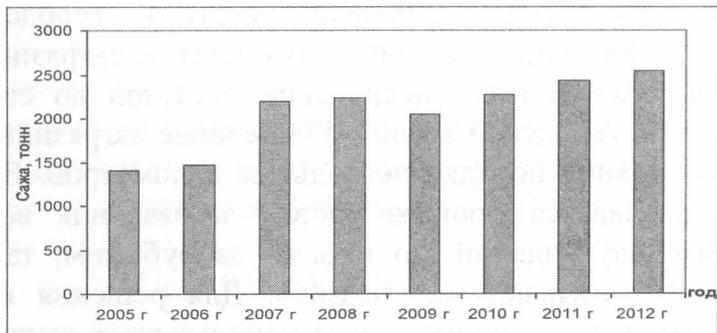


Рисунок 1.7 – Величина выбросов сажи от всех видов автотранспорта в атмосферу

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА  
 ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
 УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
 ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Как видно из представленных графиков (рис. 1.2–1.7), в Днепропетровской области наблюдается большая эмиссия загрязняющих веществ от автотранспорта. Максимум выбросов был зафиксирован в 2008 году, а затем снижается примерно на 12 %, что, очевидно, обусловлено экономическим кризисом, который начался осенью 2008 года. В настоящее время происходит увеличение всех выбросов загрязнителей от автотранспорта.

## **1.2 Анализ литературных источников по загрязнению атмосферного воздуха выбросами автотранспорта**

Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города является важнейшей задачей в области экологической безопасности [22, 46–49, 83, 97, 99, 102, 109, 110, 113–117, 129, 131, 133, 134]. Как правило, прогноз загрязнения атмосферного воздуха при выбросах от автотранспорта рассматривают в двух масштабах: локальный (local) и городской (urban). Локальный прогноз – это перенос загрязнителя на расстояние от нескольких десятков до сотен метров, а городской масштаб – перенос загрязнителя на расстояния порядка нескольких километров. Если рассматривается прогноз уровня загрязнения возле одного, двух зданий, то иногда, за рубежом, такой масштаб называют «microscale». Для решения прогнозных задач данного класса используются эмпирические, аналитические, численные модели [1, 3, 4, 20,

*Наукове видання*

**Біляєв Микола Миколайович  
Русакова Тетяна Іванівна  
Кириченко Павел Сергійович**

**МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО  
ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ НА  
ВУЛИЦЯХ МІСТ**

*Монографія*

*Російською мовою*

*Матеріал друкується в авторській редакції*

Формат 60x84/16. Умовн. друк. арк. 9,3  
Тираж 300 пр. Зам №6376

Видавництво ТОВ «Акцент ПП»  
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052  
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*

Віддруковано в ТОВ «Акцент ПП»  
вул. Ларіонова, 145, м. Дніпропетровськ, 49052  
тел. (056) 794-61-04(05)

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4766 від 04.09.2014.*