

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, И.В. Калашников, В.В. Беляева, А.В. Берлов

## ЛОКАЛЬНАЯ ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© M. Biliaiev, I. Kalashnikov, V. Biliaieva, O. Berlov

## LOCAL PROTECTION OF ATMOSPHERE FROM POLLUTION

**Цель.** Целью работы является разработка математической модели для оценки эффективности применения экрана на крыше кафе для локального снижения на улице концентрации химически опасного вещества, которое поступило в атмосферу через вентиляционный выброс на крыше кафе.

**Методика исследований.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потенциала скорости, на базе которого определено поле скорости воздушного потока, и уравнение конвективно-диффузионного рассеивания химически опасного агента в атмосферном воздухе, выброшенного в случае теракта через систему вентиляции. При моделировании были учтены неравномерное поле скорости ветрового потока, атмосферная диффузия, интенсивность выброса химически опасного агента. При численном интегрировании уравнения для потенциала скорости использована локально – одномерная разностная схема. Для численного решения уравнения конвективно-диффузионного рассеивания примеси использована неявная попеременно-треугольная разностная схема расщепления.

**Результаты исследования.** На основе разработанной численной модели дана оценка эффективности применения экрана на здании для снижения концентрации опасного вещества и минимизации риска токсичного поражения людей на улице при инициированном выбросе химического агента. Построенная численная модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности, что позволяет широко использовать ее для решения задач рассматриваемого класса при разработке стратегии антитеррористического инжиниринга.

**Научная новизна.** Предложена эффективная математическая модель для расчета зоны поражения людей на улице при возможном теракте с использованием химического (биологического) агента. Модель также может быть применена для оценки эффективности некоторых защитных мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения воздушной среды при теракте.

**Практическое значение.** Разработанная численная модель может быть использована для организации защитных мероприятий возле социальных объектов возможной химической атаки террориста.

**Ключевые слова:** теракт; химическое загрязнение атмосферы; антитеррористический инжиниринг; численное моделирование.

**Вступление.** Одним из вариантов поступления химически опасного агента в атмосферу может быть его сброс в систему вентиляции различных кафе, которые располагаются на улицах городов. Для этого может быть использован сброс химического агента в вентиляционную трубу, куда поступают продукты горения печей на кухне. Эмиссия загрязненного воздуха из системы вентиляции кафе происходит на крыше зданий.

При таком выбросе химического агента через систему вентиляции за зданием может произойти быстрое загрязнение воздуха возле кафе, что приведет к токсичному поражению людей. В этой связи возникает важный вопрос о разра-

ботке методов защиты людей от поражения на улице путем снижения концентрации опасного вещества на улице.

Следует отметить, что на первом этапе решения задачи необходимо оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха при возможном теракте. Для этого можно использовать модель Гаусса. Но данная модель не позволяет учесть влияния здания и различных инженерных элементов на формирование зон химического заражения, т. е. их нельзя применять для оценки эффективности различных антитеррористических методов. Стандартные методики, используемые в Украине для решения задач по оценке размеров зон химического заражения (например, методика ОНД-86), по этой причине также не могут быть применены.

Наиболее эффективным методом решения задач данного класса является CFD-моделирование. На практике, для этого используются специализированные пакеты программ: «ANSYS Fluent», «FAST» и др. Данные пакеты программ представляют собой мощный инструмент решения разнообразных задач. Но стоимость лицензированных пакетов очень высока и поэтому доступ к таким пакетам ограничен. Для применения данных пакетов требуется использование мощных компьютеров [5]. Кроме этого на решении задач уходит десятки, сутки часов. Это является препятствием, для их широкого применения на практике.

**Целью** данной работы является разработка метода локального уменьшения концентрации химически опасного вещества на улице при инициированном его выбросе на крыше здания. Ставится задача создания модели для оценки эффективности применения экрана на крыше здания для локального уменьшения уровня загрязнения воздуха на улице.

**Постановка задачи.** Рассматривается выброс химически опасного вещества на крыше низкого здания. Ставится задача по снижению концентрации химического агента вблизи здания.

**Расчет концентрации химического агента в атмосфере.** Процесс переноса химического агента на улице может быть описан на базе следующего уравнения (профильная задача) [1, 2, 4, 6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C$  – осредненная концентрация химического (биологического) агента в атмосферном воздухе;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий распад агента в атмосфере;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu_x, \mu_y$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность эмиссии химического агента;  $\delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$  – обозначение дельта-функция Дирака;  $x_0, y_0$  – координаты источника эмиссии агента при теракте;  $t$  – время.

Краевые условия для уравнения (2) записывают так [1]: при  $t=0$ ,  $C=0$ . На границах, где воздушный поток входит в расчетную область,  $C=C_{in}$ , здесь  $C_{in}$  – известная величина. Мы принимаем, что  $C_{in}=0$ . На участке, где воздушный поток выходит из расчетной области, в численной модели ставят «мягкое» граничное условие вида:  $C_{i+1,j}=C_{i,j}$ , здесь  $C_{i+1,j}$  – концентрация загрязнителя в граничной (последней) ячейке.

**Расчет поля скорости воздушного потока.** Для применения уравнения (1) в случае рассеивания химического (биологического) агента при наличии здания необходимо знать неравномерное поле скорости ветрового потока. Для определения поля скорости ветрового потока  $u = f(x, y)$ ,  $v = f(x, y)$  будем использовать модель безвихревого течения идеальной жидкости [1, 3, 4]:

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

где  $P$  – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушного потока определяем зависимостью вида:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

Для уравнения (2) имеют место такие граничные условия:

– на твердых границах ставим условие вида:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ ,

где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к границе;

– на границе выхода воздушного потока из расчетной области ставим граничное условие  $P = \text{const}$ ;

– на тех границах, где происходит втекание воздушного потока, ставим граничное условие вида:  $\frac{\partial P}{\partial n} = V$ , где  $V$  – известная скорость ветрового потока.

**Численное решение задачи.** Для численного интегрирования моделирующих уравнений будем использовать конечно-разностные методы решения.

Проведем аппроксимацию производных, следуя [1, 2, 6]. Аппроксимацию производной по времени осуществляем так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Первые производные аппроксимируют соотношениями:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

где  $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$ ,  $u^- = \frac{u - |u|}{2}$ ,  $v^+ = \frac{v + |v|}{2}$ ,  $v^- = \frac{v - |v|}{2}$ .

Для аппроксимации первых производных используем формулы [2, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1} ; \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1} ; \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1} ; \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1} . \end{aligned}$$

Для аппроксимации вторых производных используем зависимости [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} , \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} . \end{aligned}$$

С учетом приведенных обозначений разностных операторов записываем разностный аналог уравнения (1):

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + Q_{ij} \delta_{ij} . \end{aligned} \quad (4)$$

Проведем расщепление разностного уравнения (4). Уравнения расщепления на каждом шаге записывают так:

– на первом шаге ( $k = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^{n+k} - C_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) , \end{aligned} \quad (5)$$

– на втором шаге ( $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$ ):

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) , \end{aligned} \quad (6)$$

– на третьем шаге ( $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$ ) применяем зависимость (6);

– на четвертом шаге ( $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$ ) применяем зависимость (5).

Искомое значение функции  $C$  на каждом дробном шаге (5), (6) определяем по формуле бегущего счета.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q\delta(x - x_0)\delta(y - y_0)$$

На последнем шаге решаем уравнение:

Для решения данного уравнения применяют метод Эйлера.

Для численного решения уравнения (2) используется локально - одномерная разностная схема. В этом случае уравнение Лапласа записывается в эволюционном виде и осуществляется геометрическое расщепление этого уравнения. На каждом шаге расщепления аппроксимация производных проводится так, чтобы расчет неизвестного параметра проводился по схеме бегущего счета.

Для программной реализации построенной численной модели был использован FORTRAN.

**Результаты.** Разработанная математическая модель была использована для решения следующей задачи. Рассматриваем выброс химического агента через систему вентиляции, выход из которой находится на крыше кафе. Схема расчетной области представлена на рис. 1.

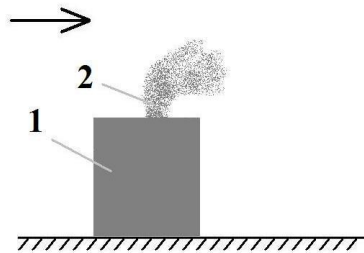


Рис. 1. Схема эмиссии химического агента на крыше кафе (нет элементов защиты): 1 – здание кафе; 2 – место эмиссии химического агента

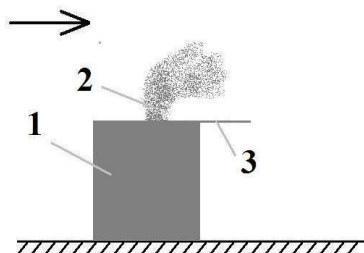


Рис. 2. Схема эмиссии химического агента на крыше кафе при наличии горизонтального экрана: 1 – здание кафе; 2 – место эмиссии химического агента; 3 – горизонтальный экран

Для уменьшения уровня загрязнения атмосферного воздуха возле кафе, в качестве антитеррористического метода, используем установку на крыше горизонтального экрана (рис. 2).

Ставится задача оценить эффективность применения экрана на минимизацию уровня загрязнения воздушной среды.

На рис. 3 представлено рассчитанное поле концентрации химического агента возле кафе при отсутствии экрана. На рис. 4. показана зона загрязнения при установке экрана на крыше.

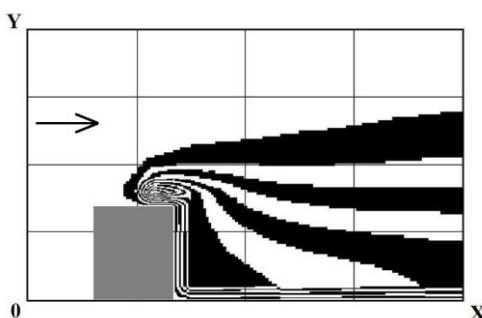


Рис. 3. Зона загрязнения возле кафе при отсутствии экрана

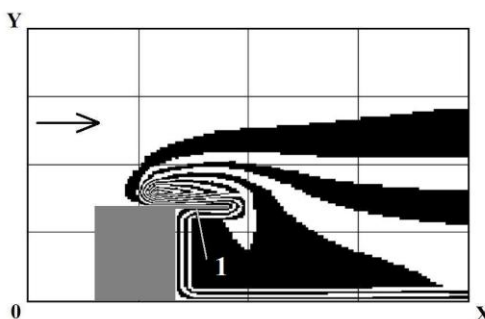


Рис. 4. Зона загрязнения возле кафе при отсутствии экрана

Для количественной оценки эффективности применения экрана в таблице представлено значение концентрации загрязнителя на различном расстоянии от здания, уровень 1,7 м – рост человека для всех рассматриваемых сценариев.

Таблица

Значение концентрации химического агента на различном расстоянии от здания

Расстояние от стенки здания	Концентрация (нет экрана)	Концентрация (есть экран)
2,5 м	1,26	1.08
4,5 м	1,16	1.07
5,5 м	1,12	1.04
9,5 м	1,02	0.94
11,5 м	0,98	0.91

Из таблицы видно, что использование экрана на крыше здания позволяет локально снизить концентрацию химически опасного вещества на улице. Такой подход позволяет минимизировать риск токсичного поражения людей при возможном теракте. Отметим, что время решения задачи составляет порядка 5 сек.

**Научная новизна и практическая значимость.** Разработана математическая модель, позволяющая определить эффективность применения экрана для минимизации уровня загрязнения воздушной среды на улице в случае инициированного химического загрязнения.

Модель основана на применении уравнения конвективно-диффузионного рассеивания химического агента совместно с уравнением для расчета поля скорости ветрового потока возле здания (модель потенциального течения). Особенностью модели является оперативность расчета. Методом вычислительного эксперимента показано, что применение горизонтального экрана на крыше здания позволяет снизить уровень загрязнения атмосферного воздуха в локально, возле здания.

**Выводы.** Предложена математическая модель для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха возле здания в случае выброса химического агента на его крыше. Модель позволяет оценить влияние экрана на локальную защиту атмосферы от загрязнения при таком выбросе. Решение задачи основывается на численном моделировании, путем решения уравнений, описывающих рассеивание примеси в атмосфере и аэродинамику возле объекта.

Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении разработки трехмерной численной модели, ориентированной на решение задач данного класса.

#### Перечень ссылок

1. Беляев, Н.Н., Гунько, Е.Ю., & Росточило, Н.В. (2014). *Защита зданий от проникновения в них опасных веществ*. Монография. – Д. : Акцент ПП.
2. Біляєв, М.М., Берлов, О.В., & Кириченко, П.С. (2017). *Математичне моделювання в задачах промислової безпеки та охорони праці*. Монографія. – Кривий Ріг : Вид. Р.А. Козлов.
3. Марчук, Г.И. (1982). *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва: Наука.
4. Згуровский, М.З., Скопецкий, В.В., Хрущ, В.К., & Беляев Н.Н. (1997). *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ: Наук. думка.
5. Anthony, M.B. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense. Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness. Ph.D. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania.*
6. Biliaiev, M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 87-91. [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)

#### АНОТАЦІЯ

**Мета.** Метою роботи є розробка математичної моделі для оцінки ефективності застосування екрану на даху кафе для локального зниження на вулиці концентрації хімічно небезпечної речовини, яке надійшло в атмосферу через вентиляційний викид на даху кафе.

**Методика досліджень.** Для вирішення поставленого завдання використано рівняння для потенціалу швидкості, на базі якого визначено поле швидкості повітряного потоку, і рівняння конвективно-дифузійного розсіювання хімічно небезпечного агента в атмосферному повітрі, викинутого в разі теракту через систему вентиляції. При моделюванні були враховані нерів-

номірне поле швидкості вітрового потоку, атмосферна дифузія, інтенсивність викиду хімічно небезпечного агента. При чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості використана локально - одновимірна різницева схема. Для чисельного рішення рівняння конвективно-дифузійного розсіювання домішки використана неявна поперемінно-трикутна різницева схема розщеплення.

**Результати дослідження.** На основі розробленої чисельної моделі дана оцінка ефективності застосування екрану на будівлі для зниження концентрації небезпечної речовини та мінімізації ризику токсичного ураження людей на вулиці при ініційованому викиді хімічного агента. Побудована чисельна модель може бути реалізована на комп'ютерах малої і середньої потужності, що дозволяє широко використовувати її для вирішення завдань даного класу при розробці стратегії антитерористичного інжинірингу.

**Наукова новизна.** Запропоновано ефективну математичну модель для розрахунку зони зараження людей на вулиці при можливий теракт з використанням хімічного (біологічного) агента. Модель також може бути застосована для оцінки ефективності деяких захисних заходів, спрямованих на зниження рівня забруднення повітряного середовища під час теракту.

**Практичне значення.** Розроблена чисельна модель може бути використана для організації захисних заходів біля соціальних об'єктів можливої хімічної атаки терориста.

**Ключові слова:** теракт; хімічне забруднення атмосфери; антитерористичний інжиніринг; чисельне моделювання.

#### ABSTRACT

**Purpose.** The purpose of the work is to develop a mathematical model for evaluating the effectiveness of the screen on the roof of a cafe for local reduction in the street of the concentration of a chemically hazardous substance that has entered the atmosphere through ventilating exhaust on the roof of a cafe.

**Methodology.** To solve this problem, we used the equation for the velocity potential, on the basis of which the velocity field of the air flow was determined, and the equation of convective-diffusion dispersion of a chemically dangerous agent in atmospheric air emitted in case of a terrorist attack through the ventilation system. The simulation took into account the uneven velocity field of the wind flow, atmospheric diffusion, emission rate of a chemically dangerous agent. In the numerical integration of the equation for the velocity potential, a locally one-dimensional difference scheme is used. For the numerical solution of the equation of convective-diffusion dispersion of an impurity, an implicit alternating-triangular difference splitting scheme is used.

**The results.** On the basis of the developed numerical model, an assessment was made of the effectiveness of using a screen on a building to reduce the concentration of a hazardous substance and minimize the risk of toxic damage to people on the street during an initiated release of a chemical agent. The constructed numerical model can be implemented on low and medium power computers, which allows it to be widely used for solving the problems of the class under consideration when developing an antiterrorism engineering strategy.

**Scientific novelty.** An effective mathematical model for calculating the zone of infection of people on the street during a possible terrorist attack using a chemical (biological) agent has been proposed. The model can also be applied to assess the effectiveness of some protective measures aimed at reducing the level of air pollution during a terrorist attack.



**Practical significance.** The developed numerical model can be used for the organization of protective actions near social objects of a possible chemical attack by a terrorist.

**Keywords:** terrorist attack; chemical pollution of the atmosphere; anti-terrorism engineering; numerical simulation.

УДК 622.457:519.6

© М.М. Біляєв, Т.І. Русакова

## СПОСОБИ ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ІНТОКСИКАЦІЇ ПРАЦІВНИКІВ В РОБОЧИХ ЗОНАХ БІЛЯ АВТОМАГІСТРАЛІ

© M. Biliaiev, T. Rusakova

### WAYS OF REDUCING THE INTOXICATION LEVEL OF EMPLOYEES IN WORK AREAS NEAR THE ROAD

**Мета дослідження.** Розробка способу зменшення інтоксикації робітників виносної торгівлі в робочих зонах на відкритих майданчиках біля автомагістралей за допомогою пристрою з подвійним відбором забруднюючих речовин вихлопних газів автотранспорту. Оцінка ризику виникнення хронічних захворювань в залежності від рівня концентрації шкідливих речовин. Розробка методики чисельного розрахунку процесу відбору газів, що враховує кількість отворів відборів газу, їх розміри та взаємне розташування.

**Методика.** Метод фізичного експерименту відносно відбору газів включає дослідження якісної картини зміни зони забруднення та кількісного значення концентрації оксиду вуглецю. Методика чисельного розрахунку ґрунтується на вирішенні рівняння Лапласа для потенціалу швидкості газового потоку методом Лібмана та рівняння масопереносу для оксиду вуглецю кінцево-різницеvim методом.

**Результати.** Проведено фізичний експеримент відносно двох ситуацій: відсутності відбору газів та наявності двох патрубків для відбору газів. Встановлено, що робота верхнього відсосу проявляється на початку відбору, тоді як нижній відсос постійно виконує відбір газів. Встановлено закономірності зміни концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні на рівні органів дихання робітника. Створено комп'ютерну програму чисельного розрахунку поля швидкості повітряного потоку, концентрації оксиду вуглецю в наслідок дії джерела емісії, ризику виникнення хронічних захворювань у робітників виносної торгівлі біля автомагістралі. Проведено обчислювальні експерименти відносно різної висоти розташування патрубків відбору та різної швидкості відбору.

**Наукова новизна.** Встановлено закономірності зміни концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні поблизу джерела емісії відносно системи відбору газів відсосами.

**Практична значимість.** Розраховано ризики виникнення хронічних захворювань у робітників, що знаходяться в робочій зоні, яка безпосередньо попадає в область забруднення при роботі автотранспорту. Встановлено, що відбувається зниження ризику на 10 % по відношенню до базового варіанту розрахунку, коли відбір газів відсутній.

**Ключові слова:** концентрація забруднення, автомагістраль, відбір газів, поле швидкості, ризик хронічних захворювань.

**Вступ.** Як відомо, люди, які перебувають значну частину часу в робочій зоні, що знаходиться в межах 200 м від шосе, зазнають значного техногенного навантаження, тобто попадають у зону підвищеного ризику для здоров'я. До