

С.Р. Сарманаев<sup>1</sup>, Б.М. Десятков<sup>1</sup>, А.И. Бородулин<sup>1</sup>, В.А. Дыха<sup>2</sup>,  
О.Г. Мыслин<sup>2</sup>

## Применение методов моделирования рассеяния атмосферных примесей для принятия градостроительных решений

<sup>1</sup> НИИ аэробологии ГНЦ ВБ «Вектор», Кольцово Новосибирской обл.

<sup>2</sup> ОАО «Новосибгражданпроект», г. Новосибирск

Поступила в редакцию 28.11.2002 г.

Рассматривается модель описания рассеяния атмосферных примесей, в которой определение полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха производится с использованием замкнутой системы уравнений Навье—Стокса. В качестве практического примера рассматривается задача определения загрязненности проектируемого жилого микрорайона г. Оби выбросами транспорта от строящейся автомагистрали г. Новосибирск — аэропорт «Толмачево». Проведенный цикл расчетов позволил осуществить выбор оптимального градостроительного решения, сводящего к минимуму воздействие выхлопных газов автотранспорта на экологическую обстановку микрорайона.

Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» имеет многолетний опыт математического моделирования процесса рассеяния атмосферных примесей. Для решения «прямых» задач, когда по известным характеристикам источников требуется найти поля концентрации, нами используются подходы, основанные на применении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии [1]. Для этого в общем случае необходимо задавать поля скорости ветра, температуры и влажности воздуха, а также компоненты тензора коэффициентов турбулентной диффузии. Для расчетов распространения примесей над площадками с рельефом местности, не имеющим значительных перепадов высот, нами успешно используется численно-аналитический метод [2]. В этом случае определение полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха сводится к вычислениям по заданным в квадратурах аналитическим формулам. Определение компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии осуществляется в соответствии с гипотезой о пропорциональности последних соответствующим компонентам тензора вязких напряжений Рейнольдса, которая ранее была экспериментально обоснована нами в натуральных условиях [3]. Их определение осуществляется с помощью модели алгебраического типа [4, 5].

Развиваемые подходы использовались нами, например, для изучения закономерностей рассеяния атмосферных примесей над протяженными урбанизированными территориями [6, 7]. В общем случае характеристики рельефа (здания, жилые и зеленые массивы, водоемы и др.) учитывались заданием соответствующих параметров ше-

роховатости подстилающей поверхности. Для решения широкого круга прикладных экологических задач необходимо рассматривать распространение атмосферных примесей над пересеченной местностью и с более детальным учетом различных элементов рельефа, например, моделирование рассеяния атмосферных примесей с разрешением отдельных зданий и сооружений.

В данной статье представлена модель для описания рассеяния атмосферных примесей, в которой определение полей скорости ветра, температуры и влажности воздуха производится с использованием замкнутой системы уравнений Навье—Стокса, позволяющей достигнуть большего пространственного разрешения, чем использовавшиеся нами ранее методы. В качестве практического примера в работе рассматривается задача определения загрязненности проектируемого жилого микрорайона г. Оби выбросами транспорта от строящейся автомагистрали г. Новосибирск — аэропорт «Толмачево». Проведенный цикл расчетов позволил в данном случае осуществить выбор оптимального градостроительного решения, сводящего к минимуму воздействие выхлопных газов автотранспорта на экологическую обстановку в пределах указанного выше микрорайона.

Рассмотрим математическую постановку задачи и использованные уравнения. Основой модели является система нестационарных уравнений динамики сплошной среды в напряжениях, уравнений переноса тепла, влаги и концентрации загрязняющих примесей [8–11]:

$$\frac{Du_1}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{13}}{\partial x_3},$$

$$\begin{aligned} \frac{Du_2}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{23}}{\partial x_3}, \\ \frac{Du_3}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{33}}{\partial x_3} + \lambda \vartheta, \\ \frac{D\vartheta}{Dt} &= \frac{L}{c_p} \Phi + \frac{\partial H_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H_2}{\partial x_2} + \frac{\partial H_3}{\partial x_3} + J_\vartheta, \\ \frac{Dq}{Dt} &= -\Phi + \frac{\partial P_1}{\partial x_1} + \frac{\partial P_2}{\partial x_2} + \frac{\partial P_3}{\partial x_3} + J_q, \\ \frac{Dc}{Dt} &= \frac{\partial C_1}{\partial x_1} + \frac{\partial C_2}{\partial x_2} + \frac{\partial C_3}{\partial x_3} + J_c, \\ \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} &= 0, \\ \frac{D}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x_i}. \end{aligned}$$

В связи с развитием эффективных численных методов решения уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости и появлением мощных ЭВМ возникла возможность проведения непосредственного численного моделирования турбулентных движений. Как отмечено в [11], за последнее время большое развитие получили модели замыкания мелкомасштабных движений.

При таком подходе, основоположником которого является Дирдорф [9], осреднение процессов переноса турбулентности совершается лишь на тех масштабах движения, которые не разрешаются в явной форме при численной аппроксимации уравнений, большие масштабы рассчитываются непосредственно. Малые масштабы трактуются здесь с помощью статистической аппроксимации в процессе детального рассмотрения больших масштабов. Влияние неразрешимых малых масштабов на разрешаемые большие масштабы характеризуется с помощью коэффициентов турбулентной вязкости, куда входят полуэмпирические константы. Наиболее популярным оказался подход Смагоринского [8]. Следуя работам [8–11], тензор напряжения  $\tau_{ij}$  представим в виде функции, зависящей от тензора деформации  $D_{ij}$  среднего движения следующим образом:

$$\tau_{ij} = k_m D_{ij}; \quad D_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}; \quad H_i = k_H \delta_{ij} \frac{\partial \vartheta}{\partial x_j};$$

$$P_i = k_H \delta_{ij} \frac{\partial q}{\partial x_j}; \quad C_i = k_H \delta_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j};$$

$$k_m = \begin{cases} (k_0 \bar{\Delta})^2 |\text{Def}|, & \text{Ri} > 1 \\ (k_0 \bar{\Delta})^2 |\text{Def}| (1 - \text{Ri})^{1/2}, & \text{Ri} \leq 1 \end{cases}; \quad \frac{k_H}{k_m} = 3;$$

$$\text{Def}^2 = \frac{1}{2} (D_{11}^2 + D_{22}^2 + D_{33}^2) + D_{12}^2 + D_{13}^2 + D_{23}^2;$$

$\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  – объем ячейки разностного шаблона;  $k_0 = 0,21$ ;  $\text{Ri} = \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial z} / \text{Def}^2$  – число Ричардсона;  $\lambda$  – параметр конвекции;

$$\Phi = \begin{cases} \frac{c_p}{L} (\gamma_a - \gamma_b), & q \geq q_n; \\ 0, & q < q_n \end{cases}; \quad q_n = 0,622 \frac{E(\vartheta)}{p};$$

$$E(\vartheta) = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,63(9-273,2)}{9-248,3}};$$

$$\gamma_b = \gamma_a \frac{p + 0,622LE/(AR\vartheta)}{p + 0,622L^2E/(c_p AR\vartheta^2)};$$

$$A = (c_p - c_v)/R; \quad \gamma_a = Ag/c_p,$$

где  $x_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$  – декартовы координаты;  $x_3$  – вертикальная координата;  $u_i$  – компоненты скорости ветра;  $t$  – время;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность воздуха;  $J_\vartheta$ ,  $J_q$ ,  $J_c$  – члены, учитывающие источники тепла, влаги и концентрации примеси соответственно;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\Phi$  – скорость образования жидкой фазы;  $q_n$  – насыщающая удельная влажность;  $E(\vartheta)$  – насыщающее давление водяного пара;  $\gamma_a$  – сухоадиабатический градиент;  $\gamma_b$  – влажноадиабатический градиент;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $c_v$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $L$  – скрытая теплота конденсации (сублимации).

Граничные условия для выписанной системы уравнений ставятся следующим образом. На твердых поверхностях:

– для компонент скорости среды в направлении нормали к поверхности ставится условие непротекания  $u_n = 0$ , а по касательной – условие прилипания  $u_\tau = 0$ , где  $u_n$  и  $u_\tau$  – нормальная и касательная составляющие скорости среды соответственно;

$$\text{– для скалярных величин } \vartheta = \vartheta_n \text{ или } k_H \frac{\partial \vartheta}{\partial n} = \tau_\vartheta,$$

$\frac{\partial q}{\partial n} = \frac{\partial C}{\partial n} = 0$ , где  $\vartheta_n$  – температура поверхности,  $\tau_\vartheta$  – поток тепла.

На входе потока в расчетную область

$$u_n = u_{in}, \quad \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = 0, \quad \vartheta = \vartheta_{in}, \quad q = q_{in}, \quad C = C_{in}.$$

На выходе потока из расчетной области

$$\frac{\partial u_n}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial n} = \frac{\partial q}{\partial n} = \frac{\partial C}{\partial n} = 0.$$

Система уравнений решается методом расщепления по физическим процессам и пространственным переменным с привлечением метода фиктивных областей [10–12]. Метод решения проверялся на ставших классическими тестовых примерах движения вязкой несжимаемой жидкости: на движении

в двумерной и трехмерной кавернах, на задаче о трехмерном возвратном течении за уступом, задаче о стационарном конвективном движении между параллельными изотермическими плоскостями, нагретыми до разной температуры, задаче о движении под действием турбулентного теплового факела в стратифицированной среде [13–16] и др. Расчеты проводились, в том числе и на последовательности сгущающихся сеток, некоторые результаты изложены в [17].

Рассмотрим пример использования модели для выбора оптимального градостроительного решения. Строящаяся автомагистраль г. Новосибирск – аэропорт «Толмачево», проходя через г. Обь, дополнительно разделяет его селитебную территорию. Это привносит в город факторы, связанные с защитой селитебной территории от вредных выбросов автотранспорта. Наиболее неблагоприятная экологическая ситуация складывается к северу от строящейся автомагистрали в существующих жилых микрорайонах и кварталах, находящихся с подветренной стороны от автомагистрали при преобладающем в данном регионе юго-западном направлении ветров.

Вначале проектными организациями – разработчиками проекта – был предложен вариант снижения загрязнения придорожных территорий путем возведения защитного экрана, который в настоящее время нередко применяется в градостроительной практике. По оценкам проектировщиков, защитный экран высотой 5 м практически устраняет вредное воздействие на существующую застройку и оставляет необходимость сноса всего семи индивидуальных домов, попадающих в зону загрязнения с превышением концентрации выбросов автотранспорта более одного предельно допустимого значения концентрации (ПДК). С учетом того, что со строительством автомагистрали Новосибирск – аэропорт «Толмачево» г. Обь получает кратчайшую связь с областным центром и дальнейшие перспективы развития международного аэропорта «Толмачево», территория северной части г. Обь приобретает особую градостроительную ценность для застройки.

Однако наличие защитного экрана на протяжении всей селитебной территории вызывает вредное психологическое и визуальное действие и усугубляет разобщенность южной и северной частей данной территории. Поэтому проектными организациям было поручено рассмотреть альтернативные варианты защиты ряда жилых территорий г. Обь. Соответствующие расчеты были проведены нами с помощью описанной выше модели. Для расчетов были выбраны самые неблагоприятные, близкие к штилевым, стационарные метеорологические условия. Отметим, что с учетом розы ветров данные условия наблюдаются в г. Обь всего в 5% случаев.

В качестве исходных данных об интенсивности выбросов основных по вредному воздействию на человека соединений были использованы материалы по выбросам диоксида азота и диоксида серы, подготовленные ОАО «ЭкоНИИпроект» [18]. Разностная сетка составляла  $200 \times 100 \times 40$  расчетных

узлов, шаг по горизонтали соответствовал 4 м, по вертикали 1,5 м, шаг по времени выбирался в соответствии с условием Куранта [12]. Такой выбор пространственного разрешения, с одной стороны, позволяет достаточно реально описать существующую застройку микрорайона, с другой – определяет большой, но еще возможный для проведения, объем вычислительной работы.

Расчеты проводились в следующем порядке: ровная площадка без застройки и защитного экрана; застройка в соответствии с чертежами «Новосибгражданпроекта» без защитного экрана; застройка в соответствии с чертежами «Новосибгражданпроекта» с защитным экраном.

Первая серия расчетов фактически подтвердила оценки, полученные ОАО «ЭкоНИИпроект». В частности, было показано, что на расстоянии 200 м от автомагистрали будут наблюдаться значения концентрации диоксида азота, в два раза превышающие ПДК. Зона в 1 ПДК находится на расстоянии 750 м от дороги. При этом примесь концентрируется на уровне 1,5 от поверхности земли. На высоте 15 м концентрация диоксида азота не превышает 0,5 ПДК.

Вторая серия расчетов с учетом застройки, но без защитного экрана показала, что происходит уменьшение степени загрязнения на высоте 1,5 м. Зоны загрязнения сокращаются за счет перераспределения диоксида азота по вертикали. Значения, превышающие 2 ПДК, наблюдаются лишь вблизи зданий со стороны дороги. Незначительное проникновение вредных примесей внутрь микрорайона, превышающих 1 ПДК, происходит лишь в межкорпусных и арочных пространствах расположенных вдоль дороги многоэтажных (9–12 этажей) зданий. Значительное проникновение загрязняющих веществ в глубину микрорайона наблюдается только в области малоэтажной застройки (2–3 этажа) и вдоль подъездного железнодорожного пути, где значения концентрации достигают 1–2 ПДК. На рис. 1 представлены рассчитанные для этого случая поля концентрации диоксида азота на высоте 1,5 м.

Третья серия расчетов, проведенная для того же микрорайона с защитным экраном, показала, что его наличие не приводит к существенному изменению картины загрязнения внутри микрорайона. Значительные изменения поля концентрации наблюдаются лишь вблизи самого защитного экрана (рис. 2).

Проведенные расчеты и их анализ совместно со специалистами ОАО «Новосибгражданпроект» позволили сделать следующие выводы:

- наличие многоэтажной застройки в виде сплошной стены вдоль магистрали существенно изменяет картину загрязнения микрорайона и позволяет влиять на экологическую обстановку с помощью архитектурных решений;
- возведение защитного экрана экономически нецелесообразно;
- снижение уровня загрязнения воздуха в жилых внутренних помещениях зданий, образующих шумогазозащитный фронт вдоль магистрали, может

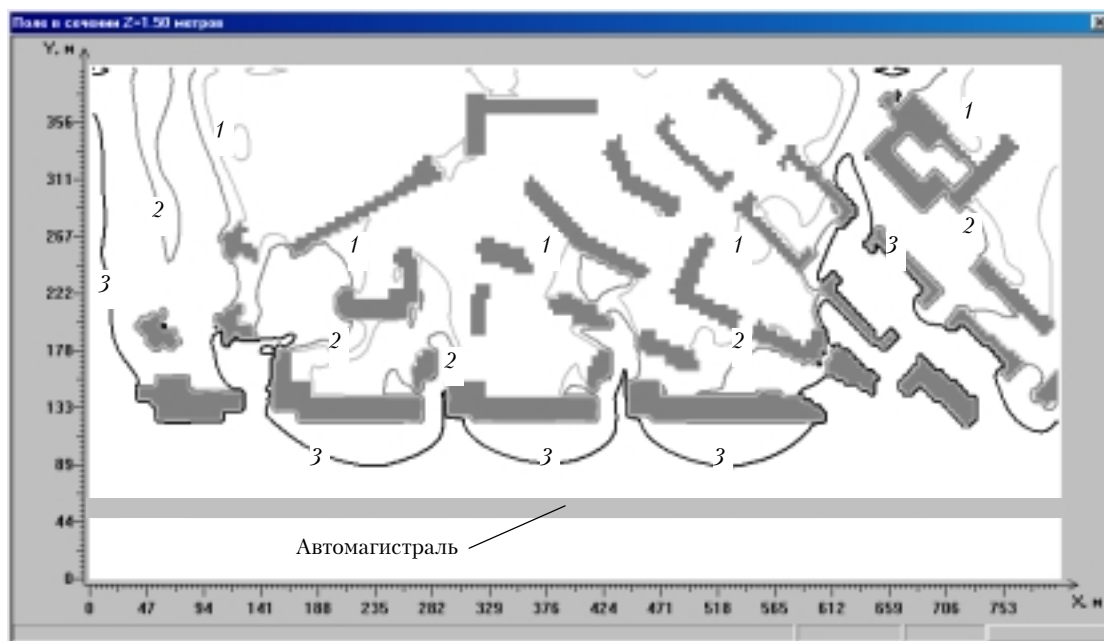


Рис. 1. Поля концентрации диоксида азота от автомагистрали без защитного экрана. Изолинии 1, 2 и 3 соответствуют концентрациям 0,5; 1 и 2 ПДК

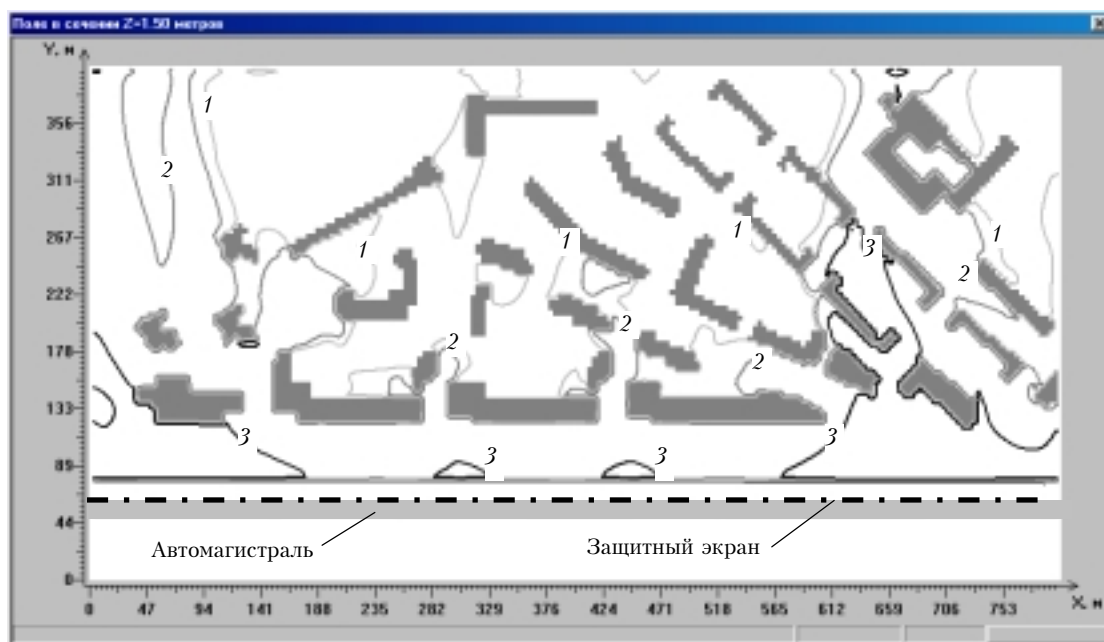


Рис. 2. Поля концентрации диоксида азота от автомагистрали с защитным экраном. Изолинии 1, 2 и 3 соответствуют концентрациям 0,5; 1 и 2 ПДК

быть достигнуто, благодаря планировке квартир с выходом на магистраль, минимуму жилых помещений, применению для заполнения оконных проемов стеклопакетов, а также кондиционеров или принудительной вентиляции в жилых помещениях, размещению на первых этажах нежилых помещений (предприятий соцкультбыта, офисов и др.).

В результате этого при выборе градостроительных решений застройки в северной части г. Обь областным градостроительным советом было принято

решение о нецелесообразности возведения защитного экрана в зоне будущей многоэтажной застройки.

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 720 с.
2. Десятков Б.М., Сарманов С.Р., Бородулин А.И. Численно-аналитическая модель переноса аэрозолей в термически стратифицированном пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 815–820.

3. *Бородулин А.И., Майстренко Г.А., Чалдин Б.М.* Статистическое описание процесса турбулентной диффузии аэрозолей в атмосфере. Метод и приложения. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. 124 с.
4. *Роди В.* Модели турбулентности окружающей среды: Сб. «Методы расчета турбулентных течений». М.: Мир, 1984. С. 227–321.
5. *Теверовский Е.Н., Дмитриев Е.С.* Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. М.: Энергоатомиздат, 1988. 160 с.
6. *Десятков Б.М., Сарманаев С.Р., Бородулин А.И.* Численное моделирование структуры аэрозольных «шапок» над промышленными центрами // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 573–580.
7. *Бородулин А.И., Десятков Б.М., Сарманаев С.Р.* Численное моделирование структуры аэрозольных «шапок» над городом от источников, находящихся вне его пределов // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 657–661.
8. *Smagorinsky J.* General Circulation Experiments With the Primitive Equations: 1. The Basic Experiment // Mon. Weather Rev. 1963. V. 91. N 2. P. 99–164.
9. *Deardorff J.W.* A Numerical Study of Three-dimensional Turbulent Channel Flow to Large Reynolds Numbers // J. Fluid Mech. 1970. V. 41. P. 453–480.
10. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
11. *Белоцерковский О.М.* Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Физматлит, 1994. 488 с.
12. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 456 с.
13. *Ghia U., Ghia K.N., Shin C.T.* High-Re Solution for Incompressible Flow the Navier–Stokes Equation and Multigrid Method // J. Comput. Phys. 1982. V. 48 P. 387–411.
14. *Oosterlee C.W., Ritzdorf H.* Flux Difference Splitting for Three-dimensional Steady Incompressible Navier–Stokes Equations in Curvilinear Coordinates // J. Numerical method in fluids. 1996. V. 23 P. 347–366.
15. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
16. *Davidson L.* Ventilation by Displacement in a Three-dimensional Rooms a Numerical Study // Build. and Environ. 1989. V. 24. № 4. P. 363–372.
17. *Сарманаев С.Р., Десятков Б.М., Бородулин А.И., Лебедев Р.В.* Моделирование микроклимата жилых и производственных помещений // Изв. вузов. Стр-во. 2002. № 1–2. С. 70–78.
18. *Эконишпроект.* Варианты организации санитарно-защитной зоны автомобильной дороги г. Новосибирск – аэропорт «Толмачево» в пределах селитебной территории г. Оби. Новосибирск, 2000. Инв. № 0011. 93 с.

*S.R. Sarmanayev, B.M. Desyatkov, A.I. Borodulin, V.A. Dyha, O.G. Myslin.* **Employment of atmospheric admixture diffusion modeling for town-planning decision-making.**

A model of atmospheric admixture diffusion, in which the fields of wind velocity, temperature, and air humidity are determined using a closed system of the Navier–Stokes equations, is considered determination of contamination of the anticipated residential microdistrict in the Ob town by motor exhausts from the highway Novosibirsk – Tolmachevo, which is under construction now, is considered as a practical example. The performed series of calculations has allowed us to choose the optimal town-planning solution to minimize the impact of motor exhausts on the ecological situation in the microdistrict.