

С.П. Ильенко*, А.И. Исакова*, С.Т. Пенин, Л.К. Чистякова

Компьютерная система прогноза газовых шлейфов в атмосфере, обусловленных техногенными и литосферными источниками

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

** Томский государственный институт систем управления и радиоэлектроники*

Поступила в редакцию 1.03.2001 г.

Описывается разработанная авторами компьютерная система, реализующая возможность расчета распространения выбросов промышленных предприятий на основе различных моделей, дающих наиболее достоверные данные о пространственно-временном распределении в атмосфере вредных примесей. Описан интерфейс компьютерной системы, и показано, что она позволяет оперативно производить расчеты поведения примесей при различных атмосферных условиях, а также сравнительный анализ результатов расчетов с целью выбора наиболее оптимальной модели для конкретных условий выброса.

Введение

Загрязнение атмосферы характеризуется большой пространственно-временной неоднородностью, обусловленной расположением источников выбросов, их мощностью, а также изменением условий погоды и режима выбросов в атмосферу. Поскольку процессы в атмосфере сложны и многообразны, а число определяющих факторов достаточно велико, наряду с организацией сети наблюдений за загрязнением воздуха значительное развитие получило математическое моделирование процессов распространения загрязняющих атмосферу веществ от их источников на основе теории турбулентной диффузии [1, 2]. На его основе осуществляется выбор места строительства предприятий, рационального размещения производственных и жилых сооружений, нормирования вредных выбросов для обеспечения необходимых гигиенических и экологических условий.

В этой связи весьма актуальной является разработка автоматизированной системы прогноза загрязнения атмосферы на основе моделей распространения выбросов промышленных предприятий, дающих наиболее достоверные данные о пространственно-временном распределении в атмосфере вредных примесей. Такая система должна удовлетворять нескольким основным требованиям:

а) быть платформенно-независимой, т.е. легко переноситься на компьютеры с разной операционной системой;

б) обладать дружественным интерфейсом, позволяющим специалистам с разным уровнем компьютерной подготовки использовать эту систему;

в) позволять использовать в расчетах различные модели распространения примесей в атмосфере, каждая из которых имеет свои особенности, свою область применимости и т.д.

В данной статье описывается разработанная авторами компьютерная система, реализующая возможность расчета распространения примеси на основе различных моделей, описанных ниже.

1. Обзор моделей прогноза загрязнения атмосферы

Кратко рассмотрим основные модели распространения примесей в атмосфере, используемые в описываемой компьютерной системе. Одна из них связана в основном с эмпирико-статистическим анализом распространения загрязняющих веществ в атмосфере с помощью интерполяционных моделей, большей частью гауссова типа (диффузионная гауссова модель). Вторая использует решение уравнения турбулентной диффузии (диффузионная модель Берлянда). Третья основана на статистической теории турбулентной диффузии (региональная траекторная модель).

1.1. Гауссова модель (ГМ)

Для описания распространения примесей в атмосфере широко используются формулы гауссова распределения концентрации, полученные на статистической основе. Одна из первых работ принадлежит Сэттону, в которой концентрация примеси в точке (x, y, z) от источника, расположенного в начале координат, в общем случае выражается функцией [2]:

$$P_y = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp(-y^2/2\sigma_y^2) \quad (1)$$

и аналогичными функциями P_x и P_z , относящимися к координатам x и z . Здесь σ_y^2 – дисперсия распределения примеси в направлении y . Задавая определенный

вид лагранжевой корреляционной функции для концентраций и используя теорему Тейлора о связи этой функции с σ_i , Сэттон получил $\sigma_i = \frac{1}{2} r_i^2 (\bar{u}, t)^{2-n}$, где r_i – некоторые коэффициенты ($i = 1, 2, 3$ соответствуют x, y, z); \bar{u} – средняя по высоте скорость ветра. Для мгновенного источника t – время после начала действия источника, а для непрерывно действующего источника полагается $t = x/\bar{u}$. Сэттон показал также, что при избранном им виде корреляционной функции должен выполняться степенной закон для изменения скорости ветра с высотой.

В настоящее время наиболее распространенной в США и странах Западной Европы является инженерная методика, представляющая собой дальнейшее развитие метода Сэттона [2]. Согласно [2] распределение примеси от точечного источника производительностью M , г/(м² · с), находящегося на высоте H в точке $(0, 0, H)$, имеет вид

$$C(x, y, z) = \frac{M}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (2)$$

где $\sigma_y = \sigma_y(x)$; $\sigma_z = \sigma_z(x)$ – горизонтальная и вертикальная дисперсии примеси.

Входными параметрами в данной методике являются стандартные отклонения (дисперсии) смещения частиц примеси в поперечных относительно ветра направлениях σ_y, σ_z и скорость ветра u (м/с) на высоте источника H (м). Для определения параметров σ_y, σ_z обычно используются классификации устойчивости приземного слоя воздуха. Согласно Пэсквиллу [4] принимается шесть классов: 1, 2, 3-й классы относятся соответственно к сильной, умеренной и слабой неустойчивости; 4-й – к равновесному (или безразличному) состоянию; 5-й, 6-й – к слабой и умеренной устойчивости. Каждому классу соответствуют определенные значения скорости ветра, степени инсоляции и времени суток (табл. 1). Значения дисперсий в зависимости от продольной координаты часто представляются

Таблица 1

Классы устойчивости по Пэсквиллу [1, 4]					
Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Степень инсоляции днем			Облачность ночью, балл	
	сильная	умеренная	слабая	10 (общая) или > 5 (нижняя)	< 4 (нижняя)
< 2	1	1-2	2	–	–
2-3	1-2	2	3	5	6
3-5	2	2-3	3	4	5
5-6	3	3-4	4	4	4
> 6	3	4	4	4	4

в графическом виде и носят название кривых Пэсквилла–Гиффода [2]. Эти кривые регулярно пересмат-

риваются Агентством по охране окружающей среды США с учетом новых теоретических и экспериментальных данных.

Значения $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$ для $10^2 < x < 10^4$ м выражаются в следующей форме (соотношения Бриттса):

$$\sigma_y = a_1 x(1 + b_1 x)^{-1/2}, \quad \sigma_z = a_2 x(1 + b_2 x)^{c_2}.$$

Далее в табл. 2 приведены значения соответствующих коэффициентов a_i, b_i ($i = 1, 2$) и c_2 для вычисления значений $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$ при условии ровной подстилающей поверхности [1].

Таблица 2
Значения коэффициентов a_i, b_i ($i = 1, 2$) и c_2

Класс по Пэсквиллу	$\sigma_y, \text{ м}$		$\sigma_z, \text{ м}$		
	a_1	b_1	a_2	b_2	c_2
1	0,22	10^{-4}	0,20	0	0
2	0,16	10^{-4}	0,12	0	0
3	0,11	10^{-4}	0,08	$2 \cdot 10^{-4}$	0,5
4	0,08	10^{-4}	0,06	$15 \cdot 10^{-4}$	0,5
5	0,06	10^{-4}	0,03	$3 \cdot 10^{-4}$	-1
6	0,04	10^{-4}	0,016	$3 \cdot 10^{-4}$	-1

Для условий города значения коэффициентов a_i, b_i ($i = 1, 2$) и c_2 при $10^2 < x < 10^4$ м приведены в табл. 3 [1].

Таблица 3
Значения коэффициентов a_i, b_i ($i = 1, 2$) и c_2 для города

Класс по Пэсквиллу	$\sigma_y, \text{ м}$		$\sigma_z, \text{ м}$		
	a_1	b_1	a_2	b_2	c_2
1-2	0,32	$4 \cdot 10^{-4}$	0,24	10^{-3}	0,5
3	0,22	$4 \cdot 10^{-4}$	0,20	0	0
4	0,16	$4 \cdot 10^{-4}$	0,14	$3 \cdot 10^{-4}$	-0,5
5-6	0,11	$4 \cdot 10^{-4}$	0,08	$1,5 \cdot 10^{-4}$	-0,5

При исследовании распространения примесей, выбрасываемых из источников, например из труб промышленных предприятий, следует иметь в виду, что вследствие наличия у выбросов начального импульса и действия архимедовых сил примесь будет поднята на некоторую дополнительную высоту ΔH . Это означает, что в расчетных соотношениях для рассеяния примесей следует использовать некоторую эффективную высоту источника, представляющую собой сумму $H + \Delta H$.

Для расчета начального подъема факела ΔH существует приближенная формула [4]:

$$\Delta H = \frac{3,75 \omega_0 R_0}{U} + \frac{1,6 g V_1 \Delta T}{T_a U^3},$$

где ω_0 – начальная скорость выхода газа; R_0 – радиус устья трубы источника, м; T_a – температура окружающего воздуха, К; ΔT – разность температур выброса и окружающего воздуха, К; $V_1 = \pi R_0^2 \omega_0$ – объем уходящих газов в единицу времени; U – скорость ветра на высоте флюгера (10 м); g – ускорение свободного падения, м/с.

Для случая равновесных условий стратификации атмосферы (4-й класс устойчивости) используют формулу

$$\Delta H = \frac{1,5 \omega_0 R_0}{u} \left(2,5 + \frac{3,3 g R_0 \Delta T}{T_a u^2} \right).$$

Например, в случае устойчивых условий (5-й, 6-й классы) применяются следующие расчетные формулы:

а) при ветре (> 2 м/с) $\Delta H = 2,6 \left(\frac{F_0}{uS} \right)^{1/3}$,

б) при штиле $\Delta H = 5,3 F_0^{1/4} S^{3/8} - R_0$,

где

$$S = \frac{g}{T_a} + \left(\frac{DT_a}{dz} + 0,01 \right),$$

в данной формуле величина $\frac{dT_a}{dz}$ – высотный градиент температуры, К/м; $F_0 = (g\Delta T/T_a)\omega_0 R_0^2$.

Наличие инверсии атмосферной температуры (т.е. рост температуры воздуха с высотой) определяется как устойчивая стратификация (классы устойчивости 5–6-й) и предполагает использование соотношений Бриггса для различных атмосферных условий.

1.2. Модель Берлянда (МБ)

Это направление является более универсальным, по сравнению с первым, так как позволяет исследовать распространение примесей от источников различного типа при разных характеристиках среды. Модель можно использовать только в предположении о дельта-коррелированности процесса флуктуаций скорости ветра.

В общем случае задача прогноза загрязнения воздуха может быть определена математически как решение при определенных начальных и граничных условиях дифференциального уравнения [3, 4]:

$$\frac{\partial \bar{u}_\alpha q}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial k_{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \left(\frac{\partial q}{\partial x_\beta} \right), \quad (3)$$

где $x_{\alpha\beta}$ – обобщенные координаты; \bar{u}_α и $k_{\alpha\beta}$ – составляющие средней скорости перемещения примеси и коэффициента турбулентного обмена, $\alpha, \beta = 1, 2, 3$.

В случае

$$k_z(z) = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad k_y(z) = k_0 u(z),$$

где u_1 – скорость ветра на высоте z_1 ; k_1 – коэффициент турбулентного обмена на высоте z_1 ; k_0 определяется из условия $k_y(h) \approx k_z(h)$, h – высота приземного слоя, получено аналитическое решение уравнения (3) [3]:

$$q(x, y, z) = \frac{M(zH)^{(1-m)/2} z_1^m}{2(2+n-m) k_1 \sqrt{\pi k_0} x^3} \exp \left[-\frac{y^2}{4k_0 x} \right] \times \exp \left[\frac{u_1 z_1^{m-n} (z^{2+n-m} + H^{2+n-m})}{k_1 (2+n-m)x} \right] I_{\frac{1-m}{(2+n-m)}}(Z);$$

$$Z = \left(\frac{2u_1 (zH)^{(2+n-m)/2} z_1^{m-n}}{(2+n-m)^2 k_1 x} \right), \quad (4)$$

где $I_{\frac{1-m}{(2+n-m)}}(Z)$ – модификационная функция Бесселя.

В нашей стране для расчета загрязнения воздуха используется в основном уравнение (4), при этом параметры k_1 и h не задаются средними значениями, а определяются в зависимости от температурной стратификации. Эта модель использует аппроксимацию среднестатистических профилей $k_z(z)$, $k_y(z)$, $u(z)$ степенными зависимостями, т.е.

$$u(z) = u_1(z) \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad k_y(z) = k_0 u(z);$$

$$k_z(z) = \begin{cases} k_1 z/z_1; & z < h, \\ k_1 h/z_1; & z \geq h. \end{cases}$$

Входными параметрами для модели являются z_0 , L ; z_1 – высота, на которой скорость ветра равна u_1 , а для определения k_1 , h , k_0 будем пользоваться формулами [4]:

$$k_1 = \frac{\chi^2 u_1}{\ln(z_1/z_0)} LJ(z_1/L), \quad \chi = 0,4;$$

$$J(x) = \begin{cases} x(1 + 0,54|x|^{0,8}); & x < 0, \\ \frac{x}{1 + 0,9x}; & 0 < x < 1, \\ 0,53; & x \geq 1; \end{cases}$$

$$h = \frac{0,05k_1}{z_1 10^{-4}}; \quad k_0 = \frac{k_z(h)}{u(h)}; \quad L = \frac{0,1T_a u_1 \ln(z_3/z_2)}{g\Delta T \ln(z_1/z_0)}$$

– масштаб Монина–Обухова.

Степень n выбираем по табл. 4 [4], используя класс устойчивости и значение шероховатости подстилающей поверхности z_0 .

Таблица 4

z_0 , м	Класс устойчивости					
	1	2	3	4	5	6
0,01	0,05	0,06	0,06	0,12	0,32	0,53
0,1	0,08	0,05	0,11	0,16	0,34	0,54
1,0	0,17	0,17	0,2	0,27	0,38	0,61
3,0	0,27	0,28	0,31	0,37	0,47	0,65

Для расчета концентрации этим методом используют формулу (4).

1.3. Региональная траекторная модель переноса примесей (РМ)

Современный этап развития экологических исследований природной среды характеризуется все более усиливающимся вниманием к проблеме оптимального оценивания пространственного распространения вредных загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу в результате промышленных аварий. Наиболь-

шую опасность при этом представляют выбросы в атмосферу продуктов атомного распада радионуклидов, которые возникают чаще всего при авариях на атомных электростанциях, на радиохимических заводах и хранилищах радиоактивных отходов. Важным отличием этих аварий является возможность выхода радионуклидов в атмосферу в виде залповых выбросов.

Поскольку существующая сеть экологических станций из-за своей малой плотности не позволяет осуществлять на требуемом уровне мониторинг атмосферных загрязнений, то для обеспечения экологической безопасности необходимо уметь рассчитывать распространение примесей от мест выбросов (источников) и их концентрацию в разных точках пространства. С этой целью обычно используются различные теоретические модели переноса примесей, реализуемые с помощью ЭВМ. Далее рассматривается одна из подобных моделей, а именно траекторная модель переноса примесей.

Уравнение модели для пограничного слоя атмосферы получается путем интегрирования по высоте от $z = 0$ до $z = H$ уравнения переноса примеси [2, 4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + w \frac{\partial s}{\partial z} + \frac{\partial w_a^s}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} k_1 \frac{\partial s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_1 \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial s}{\partial z} + \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (5)$$

при условиях на границе:

$$\text{при } z = 0 \quad (z = z_0) \quad k \frac{\partial s}{\partial z} - w_a^s = \beta s - f_0, \quad (6)$$

$$\text{при } z = H(H_1) \quad w = w_H, \quad k = k_H,$$

где s – объемная концентрация примеси; w_a – собственная вертикальная скорость примеси a ; β – скорость сухого поглощения примеси земной поверхностью; k_1 – коэффициент турбулентности при перемещениях по горизонтали; k – коэффициент турбулентности при перемещениях по вертикали; k_H и w_H – коэффициент турбулентности и вертикальная скорость воздуха на высоте $z = H$; ε_0 – скорость образования или уничтожения примеси в пограничном слое, обусловленная выбросом примеси источниками в слое, выпадением примеси с атмосферными осадками и химическими превращениями; f_0 – скорость выброса примеси в атмосферу наземными источниками.

В результате интегрирования уравнения переноса примеси (5) с учетом граничных условий (6) после введения средних для пограничного слоя величин решение ищется в виде

$$s(x, y, t) = P(x, y, t) s'(x, t).$$

Для P принято

$$P(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi d_0 x}} \exp(-y^2/4d_0 x),$$

где d_0 – постоянная [$d_0 = k_1(y)/u(y)$]. Уравнение для s' решается численно путем замены интегрирования по времени интегрированием по траектории. Аппроксимируем это уравнение следующим образом:

$$s'^{(n)} = s'^{(n-1)} - \Delta t \sigma s'^{(n, n-1)} + \Delta t \frac{1}{P} \varphi^{(n, n-1)},$$

где n – номер шага по времени ($n = 1, 2, \dots$); Δt – шаг по времени; $s'^{(n-1)}$ – значение s' в момент времени $n - 1$; $s'^{(n)}$ – в последующий момент времени n .

Эти моменты соответствуют начальной и конечной точкам траектории в течение шага по времени Δt . По неявной схеме расчета

$$s'^{(n)} = \frac{1 - \sigma \Delta t / 2}{1 + \sigma \Delta t / 2} s'^{(n-1)} + \frac{\Delta t / 2}{1 + \sigma \Delta t / 2} \left[\frac{\varphi^{(n)}}{P} + \frac{\varphi^{(n-1)}}{P} \right];$$

$$\varphi = \varphi(x, y, t) = F(x, y, t) + \frac{1}{H} f_0(x, y, t);$$

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6.$$

Здесь F – скорость выброса примеси высотными источниками; $\sigma_1 = \alpha_0 \beta / H$; $\sigma_2 = \alpha^* I$, где I – интенсивность осадков; α^* – коэффициент; σ_3 – коэффициент, с помощью которого учитываются химические превращения примесей; $\sigma_4 = (\alpha_0 - \alpha_H) k_H / H^2$; $\sigma_5 = \alpha_H w_H / H$; $\sigma_6 = \alpha_H w_a / H$ ($\alpha_0 = s_0 / s$; $\alpha_H = s_H / s$, где s_0 и s_H – значения s при $z = 0$ и $z = H$) – полуэмпирические коэффициенты, определяемые на основе данных о вертикальном профиле загрязнений.

2. Состав и структура компьютерной системы

Компьютерная система ориентирована на непрофессионального пользователя и работает на персональном компьютере IBM PC под управлением операционной системы WINDOWS 95/98/NT. Программное обеспечение компьютерной системы реализовано с помощью объектно-ориентированного языка программирования Delphi 5.0. Использование этой среды программирования позволило обеспечить систему удобным графическим интерфейсом с системой меню, возможностью графического и табличного представления результатов расчетов, доступом к файлам данных, высокой скоростью математических вычислений, возможностью дальнейшего расширения и изменения алгоритмов вычислений.

Компьютерная система позволяет:

- выбирать тип производимых расчетов для каждой модели; вводить, корректировать входные параметры для вычислений, выбирать входные параметры из таблицы, используемой по умолчанию;
- рассчитывать приземную концентрацию примеси, а также концентрацию примеси в горизонтальной плоскости на произвольной высоте, рассчитывать концентрацию примеси в атмосферном столбе на

произвольном расстоянии от источника выброса (для гауссовой модели и модели Берлянда);

- рассчитывать распределение максимальной концентрации примеси в атмосфере (для гауссовой модели и модели Берлянда);

- рассчитывать распределение концентрации примеси на траектории ее распространения с шагом по времени (для региональной модели);

- представлять результаты расчетов в графическом виде (для всех моделей);

- сохранять в файл, копировать в буфер обмена, распечатывать графическое представление результатов расчета (для всех моделей);

- изменять масштаб графиков по оси абсцисс;

- вычислять максимальное значение концентрации примеси, расстояние и высоту, на которой

оно достигается (для гауссовой модели и модели Берлянда);

- представлять результаты расчетов в табличном виде и сохранять их в рабочий файл (для региональной модели).

На рис. 1 представлена структурная схема программной оболочки компьютерной системы, отображающая основные подсистемы и процедуры.

2.1. Описание работы компьютерной системы

Для запуска программы служит загрузочный модуль POLUTION.EXE.

На рис. 2 представлено рабочее окно программной оболочки после запуска компьютерной системы.

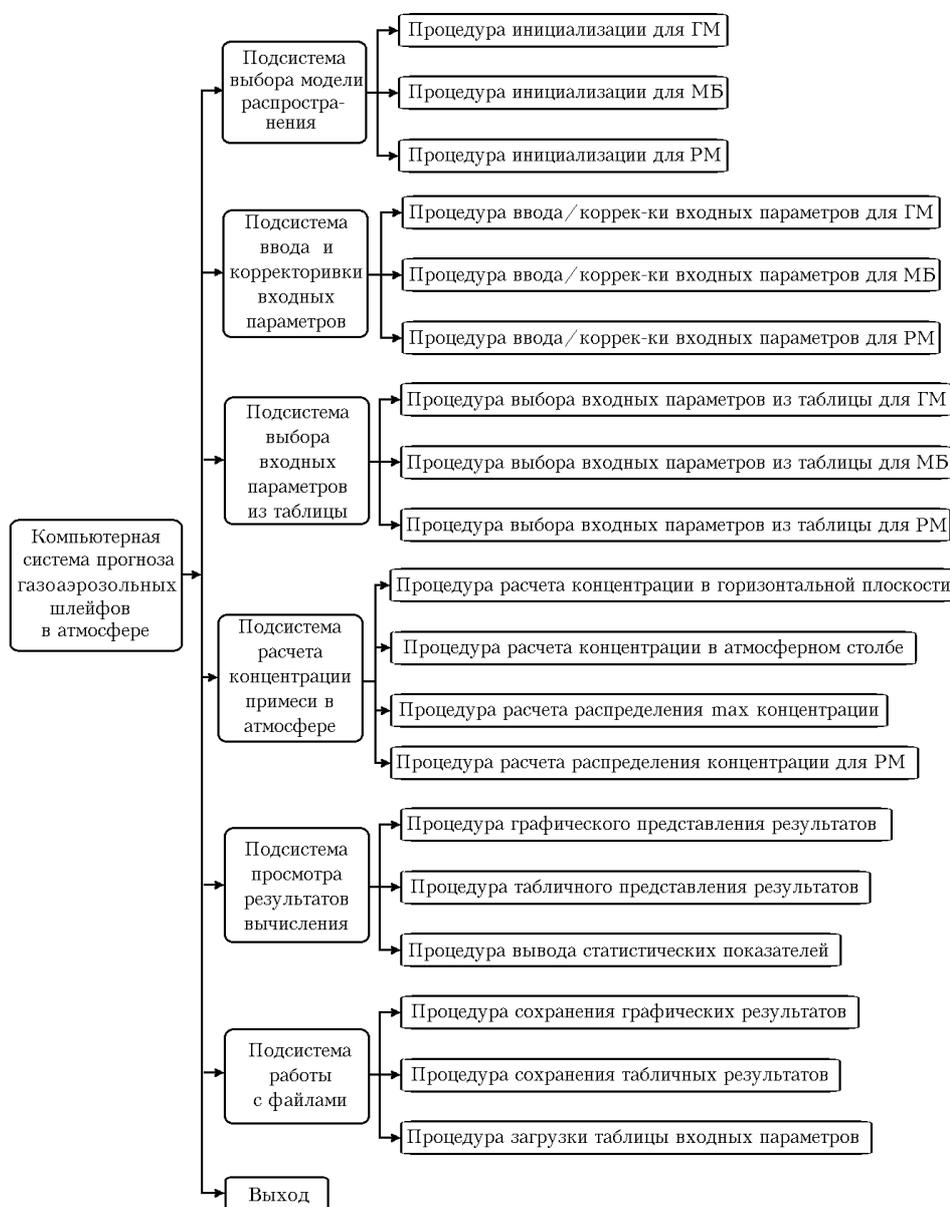


Рис. 1. Структурная схема компьютерной системы

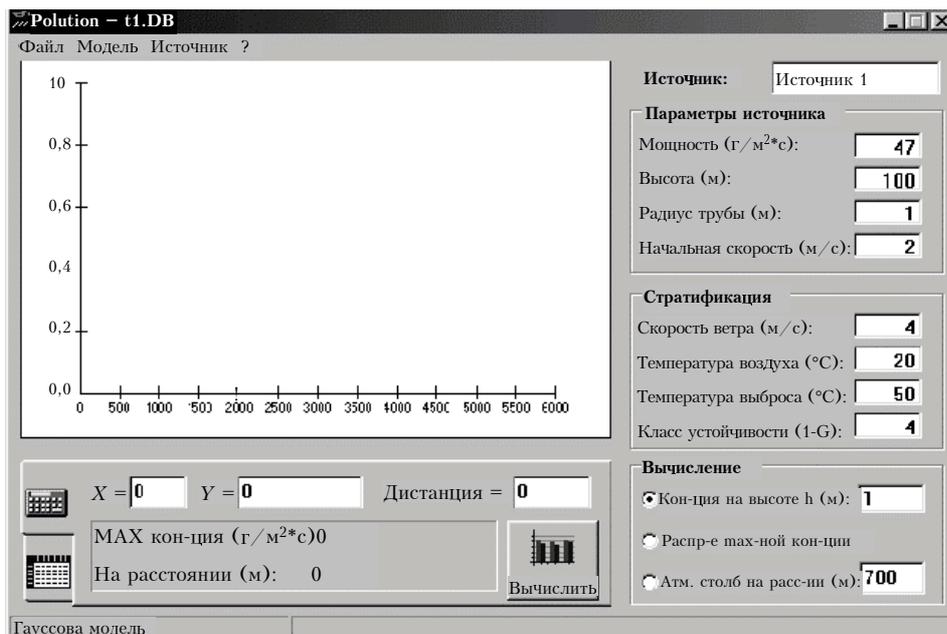


Рис. 2. Рабочее окно программной оболочки, где расстояния задаются в метрах

После загрузки программы осуществляются следующие процедуры:

- инициализация, производящая выбор метода, с помощью которого будут производиться расчеты (по умолчанию используется гауссова модель);
- загрузка таблицы входных параметров для работы метода расчета (по умолчанию таблица T1.Db);
- присвоение входным параметрам конкретных значений (по умолчанию значения параметров считываются из первой записи открытой таблицы параметров);
- выбор типа вычислений (по умолчанию проводится расчет приземной концентрации примеси).

Кнопка «Вычислить» (см. рис. 2) служит для начала вычислительного процесса, в результате которого выводятся график, значение максимума концентрации и расстояние от источника, на котором оно достигается. Редактируемое поле «Дистанция» служит для точного указания расстояния, до которого будет производиться вычисление. Если значение этого поля не изменено (по умолчанию присвоено значение 0), то программа производит расчет до максимально возможного расстояния 6000 м. Далее представлено рабочее окно программы после вычисления приземной концентрации примеси с помощью гауссовой модели (результат получен нажатием кнопки «Вычислить» непосредственно после загрузки программы без внесения каких-либо изменений).

В редактируемом поле напротив выбранного типа производимого вычисления задается высота горизонтальной плоскости, на которой проводятся расчеты (в данном случае значение равно 1). Выбор типа производимых вычислений осуществляется нажатием соответствующей «радиокнопки» в разделе «Вычисление» в правом нижнем углу окна приложения. На рис. 3–6 представлены окна приложений после проведения вычислений высотного распределения концентраций примесей в атмосфере различными методами.

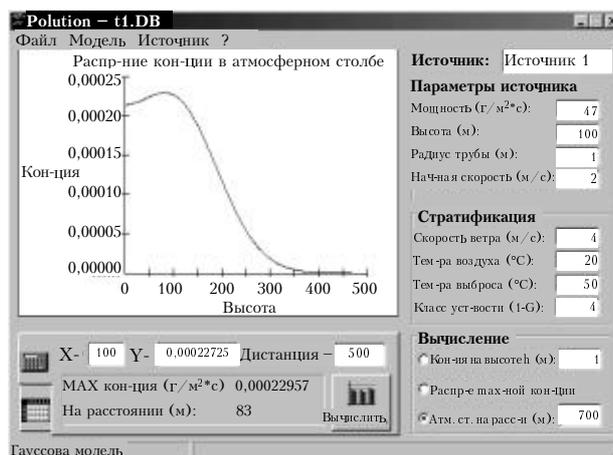


Рис. 3. Концентрации примеси в атмосферном столбе на расстоянии 700 м от источника (гауссова модель)

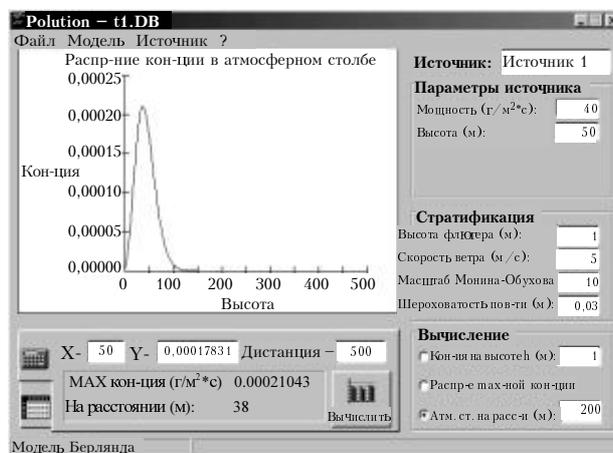


Рис. 4. Концентрация примеси в атмосферном столбе на расстоянии 200 м от источника (модель Берлянда)



Рис. 5. Распределение максимальной концентрации примеси (гауссова модель)

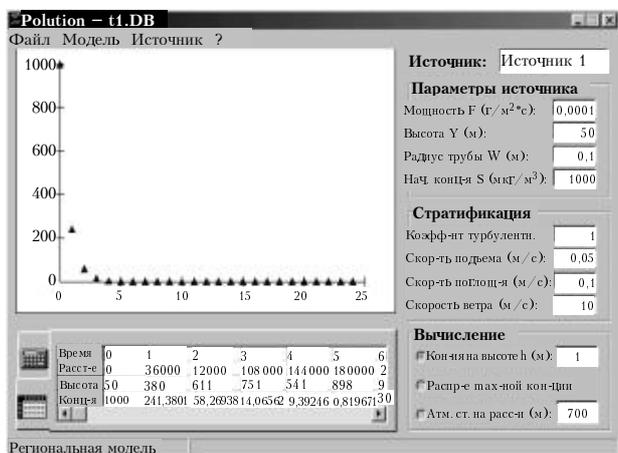


Рис. 6. Представление результатов вычислений по региональной (тракторной) модели

На рис. 3 представлено окно приложения после вычисления распределения концентрации примеси в атмосферном столбе (гауссова модель) на расстоянии (700 м), которое задается в редактируемом поле напротив выбранного типа вычислений. В результате выводятся значения максимальной концентрации и высота, на которой оно достигается.

В рассматриваемом примере редактируемое поле «X» содержит значение высоты (100 м), для которой вычисляется соответствующее значение концентрации примеси и помещается в поле «Y».

На рис. 5 выводятся значение максимальной концентрации, высота и расстояние, на котором оно достигается.

Редактируемое поле «X» служит для ввода произвольного расстояния в пределах рассчитанной дистанции с целью получения в поле «Y» соответствующего значения функции в точке X на оси абсцисс (в данном случае результатом является высота, на которой достигается максимальное значение концентрации примеси).

На рис. 4 представлено окно приложения после выбора модели Берлянда и проведения расчетов приземной концентрации примеси.

Редактируемые поля выполняют в этом примере те же функции, что и для рассмотренной гауссовой модели, изменился лишь список входных параметров.

В случае выбора региональной модели (рис. 6) используется единственный тип вычислений – расчет распределения концентрации примеси в масштабах региона с шагом по времени 1 ч (общее время вычислений 24 ч), поэтому раздел «Вычисление» становится недоступным. После нажатия кнопки «Вычислить» применительно к региональной модели окно приложения примет вид, представленный на рис. 6. Для того чтобы получить доступ к таблице результатов вычисления, необходимо выбрать закладку с изображением таблицы. На рис. 6 представлена таблица результатов вычисления.

Выбор модели распространения примеси в атмосфере, на основе которой проводятся расчеты, осуществляется в меню «Модель» (рис. 7). Выбранная модель расчета помечается галочкой, и в строке состояния окна соответствующего приложения выводится название модели.

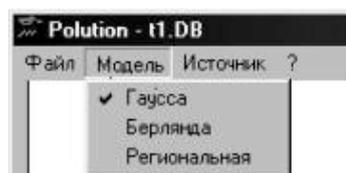


Рис. 7. Меню «Модель»

В случае необходимости сохранения таблицы результатов следует выбрать из меню «Файл» опцию «Сохранить таблицу результатов» (рис. 8).

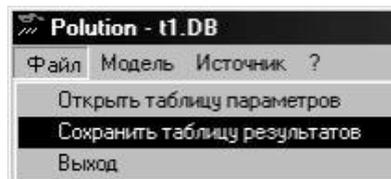


Рис. 8. Опция «Сохранить таблицу результатов»

После выбора данной опции появится стандартное окно сохранения файлов данных. Единственное требование к записи файла данных на носитель – указать расширение файла .DB.

Чтобы не вводить исходные параметры вручную, можно использовать внешнюю подключенную таблицу с входными данными, для этого необходимо выбрать соответствующую опцию меню. Внешние таблицы удобны, так как однократно занесенные в таблицу параметры (например, параметры источника, который предварительно необходимо выбрать, рис. 9) можно использовать многократно в дальнейшей работе.



Рис. 9. Опция «Выбрать источник»



Рис. 10. Таблица входных параметров для гауссовой модели

Поскольку каждая модель расчета распространения примеси в атмосфере имеет свои особенности, то в каждом случае используется своя таблица со специфическим набором входных параметров. На рис. 10 представлен пример формы, содержащей таблицу входных параметров для гауссовой модели.

Редактирование (удаление записей, добавление новых записей) входных параметров в этих таблицах, сохранение внесенных изменений производится в соответствии с общепринятыми правилами работы с табличными данными. При нажатии кнопки «Выбрать» на представленных формах все параметры из соответствующей записи становятся текущими входными параметрами и отображаются в главной (начальной) форме приложения.

В случае необходимости использования входных параметров из других внешних таблиц следует открыть меню «Файл» и выбрать опцию «Открыть таблицу параметров» (рис.11).

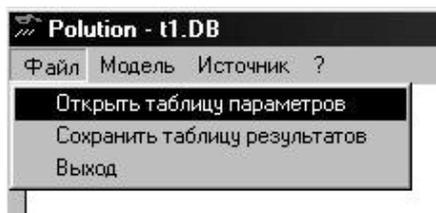


Рис. 11. Меню «Файл»

После выбора опции «Открыть таблицу параметров» появляется стандартное окно открытия файлов. В случае выбора файла с расширением .DB, содержащего список параметров для конкретной модели, таблица, используемая по умолчанию, будет заменена выбранной таблицей, а значения текущих параметров будут взяты из первой записи открытой таблицы.

Далее рассмотрим сервисные возможности компьютерной системы, позволяющие изменять масштаб и внешний вид графиков. Управление этими функциями осуществляется через контекстное меню, которое появляется после нажатия правой кнопки манипулятора «мышь» при условии расположения курсора манипулятора в пределах графика. Подменю «Масштаб по X» контекстного меню (рис. 12) содержит допустимые масштабы по оси абсцисс (в метрах).

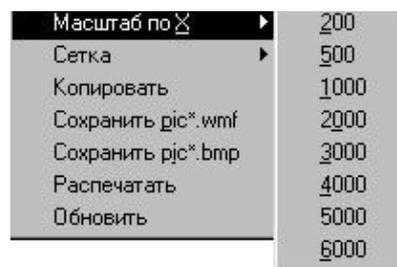


Рис. 12. Подменю «Масштаб по X»

Подменю «Сетка» контекстного меню предназначено для установки и снятия вертикальной и горизонтальной масштабной сетки (рис. 13).

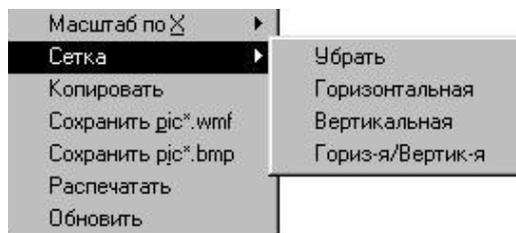


Рис. 13. Подменю «Сетка»

Далее на рис. 14 представлен пример использования опций подменю «Масштаб по X» и подменю «Сетка».

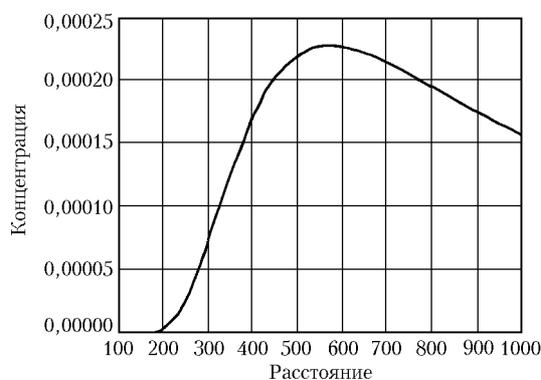


Рис. 14. Вид графика с масштабом окна 100 м и установленной вертикально-горизонтальной сеткой

Опция «Копировать» (см. рис. 13) контекстного меню служит для копирования графика в буфер обмена для дальнейшей вставки графического изображения из буфера обмена в различные документы или графический редактор.

Опции «Сохранить pic*.bmp» и «Сохранить pic*.wmf» (см. рис. 12) служат для сохранения графика во внешний графический файл соответствующего формата. Сохраняемые файлы будут размещаться в текущем каталоге приложения с именем pic*, где «*» – это порядковый номер (начиная с 1) сохраняемого файла в текущем сеансе работы.

Опция «Распечатать» контекстного меню (см. рис. 12) служит для вывода графика на принтер. Опция «Обновить» необходима для обновления графика при использовании региональной модели распространения примеси.

В случае выбора столбца таблицы результатов на странице, отмеченной закладкой «Таблица», и выбора данной опции из контекстного меню произойдет изменение масштаба по оси ординат с учетом выбранного столбца в таблице результатов.

2.2. Результаты использования компьютерной системы (на базе гауссовой модели и модели Берлянда)

На базе гауссовой модели на рис. 15, 16 приведены результаты работы компьютерной системы расчета

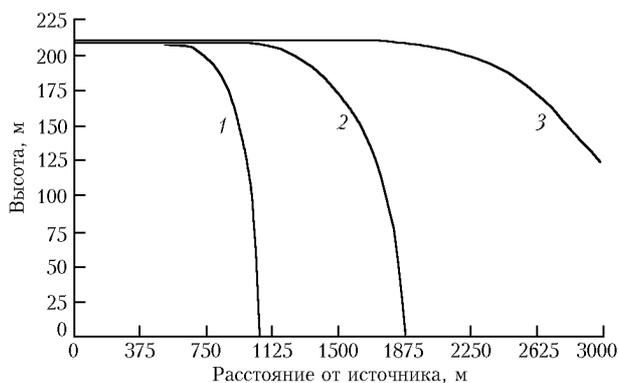


Рис. 15. Высота зависимость уровня максимальной концентрации от расстояния до источника для различных классов устойчивости атмосферы (ветер 4 м/с): 1 – класс 3; 2 – класс 4; 3 – класс 5

распространения примеси для источника выбросов со следующими параметрами: высота трубы 200 м, диаметр устья трубы 2 м, скорость выброса примеси 4 м/с. На рис. 15 наглядно видна зависимость поведения выброса примеси от стратификации атмосферы. Вплоть до расстояний порядка 400 м от источника выброса высота уровня максимальной концентрации не меняется, затем, чем больше класс устойчиво-

сти атмосферы, тем медленнее происходит оседание выброса (см. рис. 15), соответственно максимальная концентрация примеси на уровне земли менее значительна (см. рис. 16) и достигается на более отдаленных расстояниях от источника выброса. В то же время

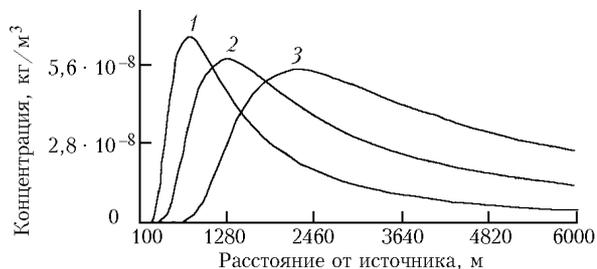


Рис. 16. Распределение приземной концентрации примеси для различных классов устойчивости (скорость ветра 4 м/с): 1 – класс 3; 2 – класс 4; 3 – класс 5

на больших расстояниях от источника приземная концентрация тем выше, чем выше класс устойчивости (см. рис. 16).

На рис. 17 показана зависимость приземной концентрации при различной скорости ветра: чем сильнее ветер, тем ниже становится пик максимальной концентрации и быстрее происходит снижение концентрации на значительных расстояниях.

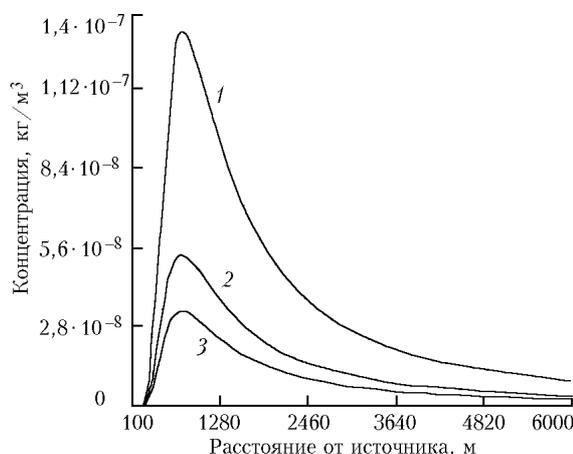


Рис. 17. Распределение приземной концентрации примеси для различной скорости ветра (класс устойчивости 3): 1 – 2 м/с; 2 – 5 м/с; 3 – 8 м/с

С использованием модели Берлянда при аналогичных параметрах источника выброса были проведены расчеты концентрации примеси в атмосферном столбе. Расстояние от источника выброса изменялось от 10 до 600 м (рис. 18).

Из рис. 18 видно, что с увеличением расстояния от источника происходит «расплывание» шлейфа выброса и соответственно уменьшение максимальной концентрации примеси в шлейфе, что вполне согласуется с результатами расчетов по гауссовой модели.

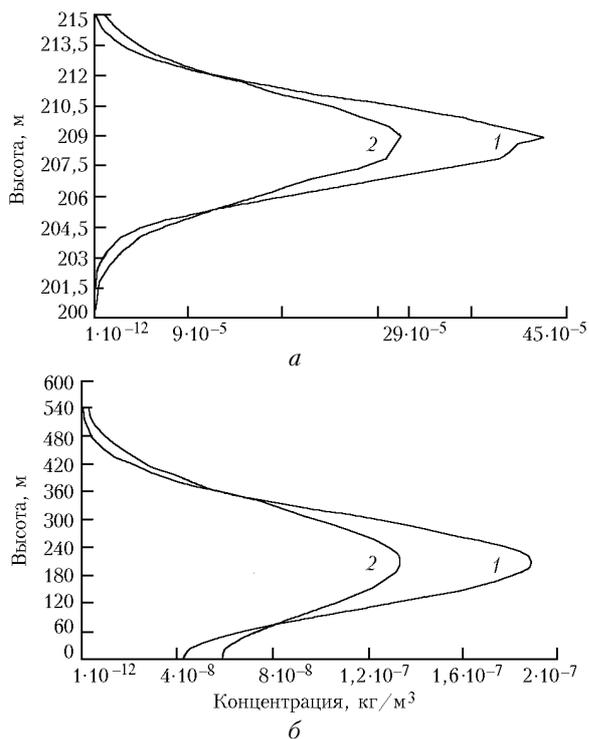


Рис. 18. Распределение концентрации примеси в атмосферном столбе на фиксированном расстоянии от источника: а - 1 - 10 м; 2 - 12 м; б - 1 - 500 м; 2 - 600 м

Заключение

Компьютерная система позволяет оперативно производить расчеты поведения примесей с использо-

ванием вышеперечисленных методов при различных атмосферных условиях. Поскольку в системе за один сеанс работы возможно использование различных моделей оценки концентрации примеси, то это позволяет производить сравнительный анализ результатов расчетов с целью выбора наиболее оптимальной модели для конкретных условий выброса.

Большое число расчетов, проведенных при тестировании описываемой системы, показали, что все модели примерно совпадают в оценке максимального значения приземной концентрации. Однако модели дают существенное различие в виде пространственного распределения концентрации, в частности положение, на котором достигается максимальная концентрация, различается в 2-4 раза, значительно отличается ширина распределения в поперечном направлении.

Компьютерная система может быть использована для решения многих задач экологического мониторинга атмосферы. Система с интерфейсом WIMP рассчитана на специалистов с различным уровнем компьютерной подготовки.

1. *Атмосфера*: Справочник. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.
2. *Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей* / Под ред. Ф.Т.М. Ньюстада и Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 352 с.
3. Берлянд М.Е. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеониздат, 1975. 436 с.
4. Берлянд М.Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Л.: Гидрометеониздат, 1985. 272 с.

S.P. Plyenko, A.I. Isakova, S.T. Penin, L.K. Chistyakova. Computer system for prediction of atmospheric gas plumes from technogenic and lithospheric sources.

A computer system developed by the authors is described, which allows one to calculate propagation of industrial exhausts based on various models comprising reliable data on spatial-temporal distribution of impurities in the atmosphere.

The system's interface is described. The system is shown to estimate the behavior of impurities under various atmospheric conditions and analyze the calculation results for choosing the most optimal model for particular conditions.