

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.510 : 551.576

К.Я. Кондратьев, В.И. Хворостьянов, О.П. Котова, Н.И. Черкасова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ
КАК СРЕДСТВО ОПТИМИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Для организации оптимизированной сети оптического контроля промышленных выбросов в атмосферу разработана оперативная математическая модель распространения примеси в приземном слое атмосферы при аварийном выбросе, основанная на решении системы уравнений, включающей в себя: 1) уравнения движения и баланса турбулентной энергии для расчета режима турбулентности и ветра; 2) уравнения переноса температуры и влажности, с учетом суточного хода; 3) уравнение турбулентной диффузии, описывающее перенос невесомой пассивной примеси при различных сценариях аварии; 4) уравнения теплопроводности в почве и уравнение теплового баланса поверхности. Проведены численные расчеты и исследованы общие закономерности эволюции облака примеси для различных значений геострофического ветра G и степени шероховатости z_0 . Проведено сравнение полученных результатов с результатами, рассчитанными по модели диффузионной струи Гаусса. Показано, что разработанная численная модель позволяет лучше, чем методика Гаусса, описать поля распространения примеси при нестационарном выбросе после аварии для оценки влияния промышленных предприятий на окружающую среду и разработки системы мер защиты. Эти результаты и модель на персональном компьютере могут быть использованы для оптимизации сети оптических датчиков, их густоты и месторасположения при различных сценариях аварии.

Введение. В последние годы резко возросли скорости антропогенного загрязнения атмосферы регулярными и аварийными выбросами. Одним из способов контроля загрязнения и установления предельно допустимых выбросов (ПДВ) является оптический мониторинг.

Например, промышленные объекты, которые могут выбрасывать в атмосферу (особенно при авариях) токсичные или взрывоопасные вещества, целесообразно снабжать системой оптических измерителей концентрации примесей в воздухе. Такая оптическая система должна быть оптимизирована, т. е. 1) должна содержать достаточное количество оптимально размещенных датчиков для получения оперативной информации обо всем поле концентрации, особенно при аварийном выбросе; 2) не должна быть слишком громоздкой и дорогой.

Одним из путей оптимизации оптического мониторинга загрязнения является математическое моделирование [1]. Ценность моделирования заключена в возможности получения расчетным путем информации о пространственно-временной эволюции зон повышенной концентрации примеси, горизонтальных и вертикальных масштабах. Это позволяет оценить необходимое количество оптических датчиков, густоту их сети при различных сценариях аварийного выброса.

В настоящее время сложилась целая иерархия моделей диффузии различной степени сложности, оперативности и полноты учета физических процессов [2–6].

Существуют модели двух типов; локальные, основанные на моделях гауссовского типа (более простые, но не учитывающие целый ряд метеорологических процессов, и мезомасштабные модели от нескольких сот метров до 200 км, которые более полны по физическому содержанию и реализуемы на современных ЭВМ в оперативном режиме.

Представленная в данной статье модель относится ко второму типу. Моделировалось распространение примеси после аварийного или санкционированного выброса в пограничном слое атмосферы с учетом следующей совокупности процессов: адвективного и турбулентного переноса при детальном расчете трехмерных полей турбулентности и ветра, тепло-, влагообмен воздушной массы с подстилающей поверхностью, суточный ход температуры, радиационный перенос в атмосфере.

Формулировка системы уравнений. Направим ось x вдоль скорости геострофического ветра G . Система уравнений динамики атмосферного пограничного слоя (АПС) включает в себя уравнения движения для горизонтальных компонент скорости ветра u и v , уравнение неразрывности для вертикальной скорости w , уравнение баланса турбулентной энергии b , соотношения подобия и размерности и гипотезу замыкания для пути смешения l [4–8]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div } uU = \tilde{\Delta} u + f_c(v - V_g);$$

$$\tilde{\Delta} = \frac{\partial}{\partial x} \kappa_x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \kappa_y \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa_z \frac{\partial}{\partial z}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \operatorname{div} v \mathbf{U} = \tilde{\Delta} v - f_c(u - U_g); \quad (2)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \operatorname{div} b \mathbf{U} = \kappa_z \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right] - \varepsilon - \alpha_B \tilde{\Delta} b; \quad (4)$$

$$\kappa = l \sqrt{\bar{b}}; \quad \varepsilon = c_1 b^{3/2} l; \quad l = -\kappa l^{1/4} \sqrt{\frac{\bar{b}}{l} \left[\left(1 + \frac{\kappa}{U_0} \right) \frac{\partial}{\partial z} \sqrt{\frac{\bar{b}}{l}} \right]^{-1}}. \quad (5)$$

Здесь $f_c = 2\omega \cdot \sin\varphi$ — параметр Кориолиса (ω — угловая частота вращения земли, φ — широта); κ — коэффициент турбулентности; ε — скорость диссипации энергии; $\kappa = 0,4$ — постоянная Кармана; $\alpha_B = 0,73$ и $c_1 = 0,046$ — эмпирические коэффициенты; θ — потенциальная температура; V_g и U_g — компоненты геострофического ветра; T — температура.

Эта система описывает изменение турбулентности и ветра за счет адвективного и конвективного переноса и турбулентной диффузии. В уравнении (4) члены в правой части описывают соответственно генерацию b за счет сдвига ветра, влияния сил плавучести, диссипацию и диффузию b . Влияние температурной стратификации на турбулентность и ветер учитывался посредством члена с $\frac{\partial \Theta}{\partial z}$ и выбором в виде (5).

Поля температуры Θ и влажности в данной модели могут быть рассчитаны с учетом суточного хода температуры путем решения уравнений переноса для q и Θ .

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + u \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v \frac{\partial \Theta}{\partial y} + w \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \hat{\Delta} \Theta; \quad (6)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \hat{\Delta} q. \quad (7)$$

Для учета теплообмена атмосферы с подстилающей поверхностью и суточного хода температуры на ней решались уравнения теплопроводности в почве и уравнение теплового баланса поверхности

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \kappa_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2}; \quad \rho_a c_p \kappa \frac{\partial \Theta}{\partial z} - L \rho_a \kappa \frac{\partial q}{\partial z} - c_s \rho_s \kappa_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

T_s , ρ_s , c_s , κ_s — температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность почвы, ρ_a — плотность атмосферы.

Уравнение переноса невесомой пассивной примеси описывается уравнением турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \hat{\Delta} c + \alpha(t), \quad (9)$$

где c — среднее значение концентрации примеси.

На основе экспериментальных и теоретических исследований сценарий процесса выброса охватывает 3 типа ситуаций; 1) пролив сжиженного газа и испарение с зеркала пролива; 2) разрыв емкости или трубопровода под давлением с последующим истечением; 3) утечка при избыточном давлении. Учтено, что выброс может проходить в несколько стадий, имеющих различные параметризации для мощности источника [9–11]. Ниже рассматривается эволюция аварийного выброса при постоянной и переменной мощности источника.

Начальные и граничные условия для АПС определяют конкретным типом моделируемого процесса [11]. В данном случае, поскольку область счета по горизонтали невелика (3 км вдоль оси x и 1,5 км вдоль оси y), начальные поля температуры и влажности выбирались горизонтально однородными: $T(x, y, z) = T_0 - \gamma z$; $q(x, y, z) = q_{sl} [1 - (1 - q_{r0}) \exp(z/AD)]$, т.е. температура убывает линейно с высотой с градиентом γ , относительная влажность у поверхности q_{r0} , недосыщение убывает в e раз на высоте AD .

При расчете динамики (турбулентности и ветра) в качестве начальных условий выбиралось квазистационарное состояние пограничного слоя в натекающем потоке над горизонтально однородной ровной поверхностью, профили U , b , κ , t рассчитывались путем решения уравнений (1)–(5) при постоянных T_0 , γ и равных нулю производных по x . Параметр шероховатости z_0 в расчетах варьировался, что позволяет учесть тип подстилающей поверхности.

Граничные условия по x при $x = x_1 = 0$ для T , q определялись из решения уравнений (6)–(7) без адвективных членов, а при $x = x_2$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = 0.$$

Граничные условия на подстилающей поверхности (уровне шероховатости z_0) для температуры — уравнение теплового баланса и теплопроводности в почве (9)–(10), для влажности — условие «сшивки» молекулярного и турбулентного потоков влаги [5, 11]:

$$\kappa \rho_a \frac{\partial q}{\partial z} = a_{ef} \frac{v_b}{4} (q - q_{si}),$$

a_{ef} — эффективный коэффициент конденсации; v_b — скорость молекул пара (воды). Кроме того, $u = v = w = \kappa \frac{\partial f}{\partial z} = 0$. На верхней границе АПС

$$u = U_g, \quad v = V_g;$$

$$\kappa = \frac{\partial f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial q}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = -\gamma.$$

Граничные условия для примеси задавались в виде, аналогичном описанному в монографиях [2, 3]: на земле и левой границе — условия непротекания (отражения), на правой границе — протекания.

Расчеты были проведены на ЭВМ ЕС-1052. Шаг сетки по оси x составил $\Delta x = 50$ м, по оси z $\Delta z = 5$ м, по оси y $\Delta y = 50$ м, количество узлов сетки $N_x = 61$, $N_y = 31$, $N_z = 31$. Затраты машинного времени для расчета типичного варианта составили 20 мин (шаг по времени $\Delta t = 150$ с соответствует 30 с машинного времени).

Эволюция облака примеси после аварийного выброса. В описанных ниже результатах расчетов следующий набор параметров назовем основным (ОМП): $T_0 = 15^\circ\text{C}$, $f_c = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; теплоемкость, теплопроводность и плотность почвы: $c_s = 0,25 \text{ кал}/(\text{г} \cdot ^\circ\text{C})$, $\kappa_s = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$, $p_s = 2 \text{ г}/\text{см}^3$, протяженность области счета по координатам составила соответственно: по x — 3 км, по y — 1,5 км, по z — 150 м.

Моделировался разрыв емкости на земле, для чего задавался в точке x выброс плотностью потока примеси $P(t)$ через отверстие с площадью S (S во всех расчетах равно 20 см^2). Тогда скорость истечения примеси определялась по формулам:

$$Q = P \cdot S, \quad V = U \cdot \delta_z \cdot \delta_y, \quad c_{\max}(t) = \frac{Q}{V} = \frac{P(t) \cdot S}{U \cdot \delta_z \cdot \delta_y}, \quad (10)$$

где V — объем распространения примеси в единицу времени; c_{\max} — максимальное значение концентрации примеси в точке выброса. Поток примеси задавался постоянным по времени, т.е. моделировался непрерывный выброс вещества через разрыв в емкости. Варьировались скорость геострофического ветра G и значение шероховатости z_0 . В таблице приведена сводка основных вариантов численных экспериментов.

Сводка вариантов численных экспериментов

№ варианта	Скорость геострофического ветра G , м/с	Значение шероховатости z_0 , см	Скорости ветра U , м/с на высоте 5 м/10 м	Скорость истечения примеси от источника, Q , г/с
1	2	1	0,7/0,9	10^3
2	2	100	0,3/0,5	10^3
3	5	1	1,9/2,3	10^3
4	5	100	0,6/1,0	10^3
5	—	—	2/2	10^3
6	—	—	5/5	10^3

Примечание. 1–4 вариант — детальный расчёт полей ветра и турбулентности, 5–6 вариант — гауссовская модель.

На рис. 1 представлены рассчитанные профили коэффициента турбулентной диффузии κ_z – рис. 1,а и ветра u – рис. 1,б для различных значений геострофического ветра и шероховатости.

При увеличении G с 2 до 5 м/с увеличивается скорость ветра и в каждой точке пространства, на высоте флюгера, например, 0,7 – 0,9 м/с при $G = 2$ (рис. 1,б, вариант 1) и до 1,9–2,3 м/с при $G = 5$ (рис. 1,б, вариант 3). Однако при увеличении значения шероховатости z_0 происходит затормаживание потока и как следствие уменьшение значения ветра при одних и тех же значениях геострофического ветра. Например, при $G = 2$ м/с $z_0 = 1$ (вариант 1) и $z_0 = 100$ (вариант 2) значение ветра на высоте флюгера равно 0,7–0,9 и 0,3–0,5 м/с соответственно.

Значение же коэффициента турбулентной диффузии κ_z растет с увеличением G и r_0 (см. рис. 1, а). Рост степени шероховатости приводит к сдвигу максимума κ_z вверх по вертикали.

На фоне описанных выше полей ветра и турбулентности рассчитывается эволюция примеси для непрерывного источника на земле. На рис. 2 представлены рассчитанные вертикальные разрезы полей концентрации примеси для $G = 2$ и 5 м/с, $z_0 = 1$ см в различные моменты времени (звездочка обозначает точку выброса). Уже через 10 мин после начала выброса (рис. 2, а) изолинии концентрации вещества имеют вид факелов с осью в направлении геострофического ветра, т.е. ось x . При увеличении времени истечения распространения (рис. 2, б) длина факела по оси x увеличивается, вернее, происходит расширение зоны распространения примеси по всем направлениям. Например, для варианта 1 (уровень шероховатости $z_0 = 1$ см, $G = 2$ м/с) через 10 мин после начала выброса зона распространения по оси x составила 1,5 км, по $z = 60$ м, по $y = 300$ м (рис. 2, а), через 20 мин (рис. 2, б) эти же величины будут соответственно – 2,5 км, 90 м, 300 м. Кроме этого, происходит при удалении от точки выброса и увеличении времени счета отрыв факела от земли, что обусловлено прежде всего увеличением коэффициента турбулентности κ_z в слое 0–30 м по вертикали (см. рис. 1, а), ростом скорости ветра с высотой.

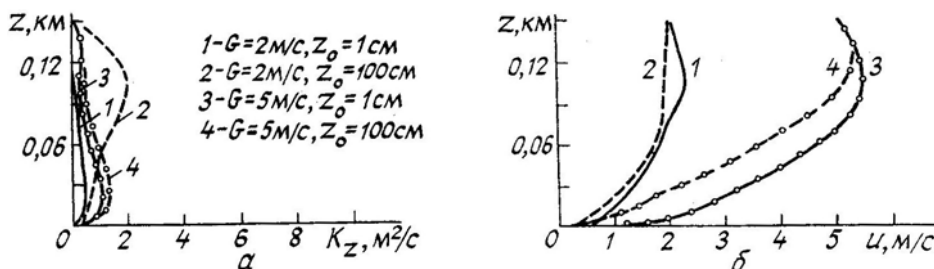


Рис. 1. Вертикальные разрезы полей коэффициента турбулентной диффузии κ_z –(а), ветра u –(б) для вариантов 1–4

Так как источник выброса непрерывный, максимального значения концентрация примеси достигает в точке выброса и также происходит ее увеличение (накопление) по времени (при ($t = 10$ мин $c_{\max} = 0,046$ г/см³, при ($t = 20$ мин $c_{\max} = 0,08$ г/см³).

Увеличение значения геострофического ветра G – до 5 м и как следствие увеличение ветра u и снижение κ_z приводит к тому, что примесь быстрее распространяется вверх по потоку (рис. 2, штриховые линии). Например, через 20 мин (рис. 2, б) зона концентрации примеси $\log c = 7,5$ (здесь и на рисунках представлены значения логарифма концентрации) достигает по x значения 1,1 км по $z = 35$ м для $G = 2$ м/с, а при $G = 5$ м/с – 2,2 км и 70 м соответственно. Однако вследствие уменьшения κ_z конец факела прижимается к земле и не происходит его существенного отрыва, как в случае с $G = 2$ м/с при дальнейшем увеличении времени истечения.

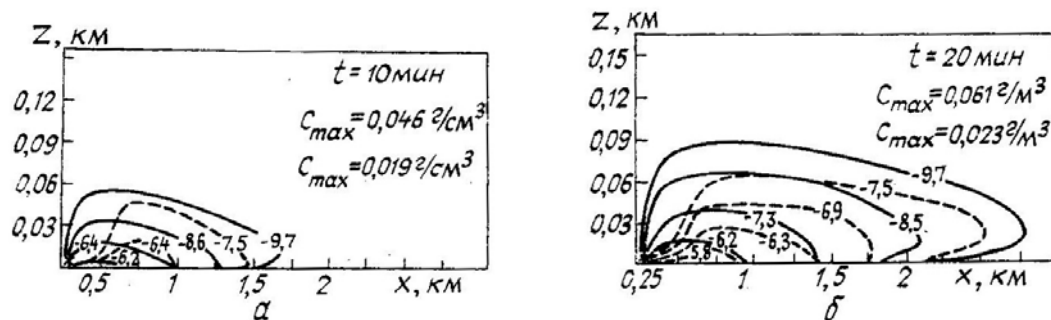


Рис. 2. Вертикальный разрез в плоскости xOz полей концентрации примеси при $t = 10$ мин (а), $t = 20$ мин (б) в варианте 1 – сплошные линии, в варианте 3 – штриховые (изолинии концентрации – $\log c$)

Быстрое распространение примеси приводит к уменьшению ее накопления в конкретной точке.

Так, значение максимальной концентрации примеси в точке выброса при $G = 5$ м/с уменьшается при ($t = 10$ мин до $c_{\max} = 0,019$ г/см³, при $t = 20$ мин до $c_{\max} = 0,028$ г/см³. Как следует из сравнения полученных результатов:

$$\frac{c_1(t)}{c_2(t)} = \frac{c_2}{c_1}, \quad (11)$$

где $c_1 = c_{\max}$ при варианте расчета с $G = G_1$, $c_2 = c_{\max}$ при $G = G_2$.

Для исследования влияния степени шероховатости z_0 на эволюцию облака примеси проводились расчеты с $z_0 = 1$ см и $z_0 = 100$ м.

На рис. 3 представлены рассчитанные вертикальные и горизонтальные разрезы полей концентрации примеси вариантов 1–2 через 40 мин после начала выброса. $G = 2$ м/с и $z_0 = 1$ см (вариант 1, сплошная линия), $z_0 = 100$ см (штриховая). Как видно из рис. 3, изолинии концентрации примеси имеют вид факелов, однако горизонтальная протяженность изолиний одного значения с уменьшается (например, протяженность изолиний с $c = -7,5$ по x равна 2,25 км для варианта 1 и 1,75 для варианта 2), а вертикальная увеличивается ($z = 0,5$ и $z = 0,7$, соответственно) при увеличении степени шероховатости для одних и тех же значений G . Это, очевидно, объясняется увеличением коэффициента турбулентной диффузии и затормаживанием потока. Затормаживание потока приводит также к накоплению примеси в конкретной точке, в частности максимальное значение концентрации примеси в точке выброса $c_{\max} = 0,0076$ г/см³ для $z = 1$ см и для $z = 100$ см $c_{\max} = 0,11$ г/см³. Увеличение коэффициента турбулентности приводит также к более быстрому отрыву хвоста факела.

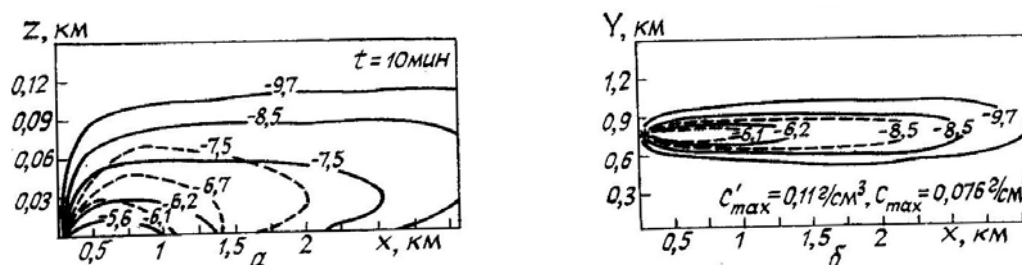


Рис. 3. Вертикальный разрез в плоскости xOz (а) и горизонтальный в плоскости xOy (б) полей концентрации примеси в момент времени $t = 40$ мин, сплошные линии – вариант 1, штриховые – вариант 2 (изолинии концентрации – $\log c$)

Значение уровня шероховатости определяет тип местности, в частности, например, $z_0 = 1$ см соответствует равнине а $z_0 = 100$ см обозначает лесной массив или жилую застройку и, как показано выше, оказывает существенное влияние на распространение облака примеси, что необходимо учитывать для правильного описания реальных ситуаций аварийных и нормальных выбросов.

Представленные выше численные эксперименты описывают распространение примеси из непрерывного постоянного источника, $P(t) = \text{const}$, что соответствует, например, истечению из разрыва в трубопроводе, утечке летучих веществ из небольших щелей зданий, содержащих загрязнения.

Приближение, связанное о взрывом-выбросом, разливом и дальнейшим испарением вещества в атмосферу может быть смоделировано путем задания источника с убывающей по времени мощностью $P = M_0\delta(t - t_0) + P_0\exp(-t/t_0)$, где t_0 – параметр, характеризующий масштаб убывания по времени плотности потока примеси.

Условно эта ситуация может быть разбита на два одновременно протекающих процесса: 1) «мгновенный точечный» источник или сформировавшийся в небольшом промежутке времени выброс клуба примеси, движущийся от источника в направлении ветра с количеством вещества в клубе $\sim M_0 S_{\Delta} t$; 2) непрерывный источник плотности P_0 . На рис. 4 представлены горизонтальные поля распространения примеси в различные моменты времени для источника данной концентрации.

Расчеты показывают, что изолинии концентрации вещества также имеют вид факелов с осью в направлении геострофического ветра, т.е. полностью качественно соответствуют картине распространения примеси (см. рис. 1–3). Однако, максимальное значение концентрации вещества $\log c_{\max 1} = -3,1$, «центр клуба» достигается не в точке выброса, а сдвигается по времени вдоль направления ветра. Этот максимум определяется сформировавшимся в первые 10–15 мин клубом примеси и его передвижение обусловлено перемещением этого клуба, который со временем расширяется.

Фактически горизонтальное распределение концентрации примеси имеет два максимума. Второй, меньший по величине, находится в точке выброса, однако в течение времени происходит уменьшение концентрации вблизи источника (например, при $t = 10$ мин $\log c_{\max 2} = -4,7$; $t = 30$ мин, $\log c_{\max 2} = -5,9$). Эта ситуация обусловлена двумя конкурентными процессами: 1) рост концентрации примеси вблизи источника вследствие накопления вещества от непрерывного источника; 2) уменьшение концентрации вследствие турбулентно-ветрового перехода, причем соотношение этих процессов зависит как от динамических характеристик атмосферы, так и от параметров $P_0 t_0$ выброса.

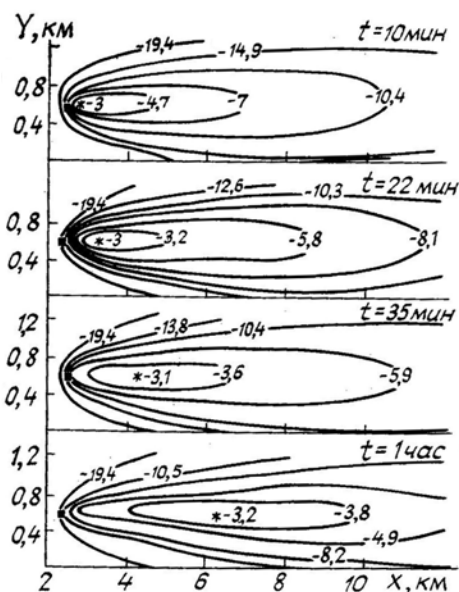


Рис. 4. Горизонтальный разрез в плоскости xOy полей концентрации примеси для источника вида $P_0 = M_0\delta(t-t_0)+P_0\exp(-t/t_0)$

Таким образом, описанные выше численные эксперименты позволяют исследовать влияние вида источника скорости ветра и степени шероховатости подстилающей поверхности на формирование полей распространения примеси в случае аварийного выброса. Рассчитанные поля концентрации примеси позволяют в конкретный момент времени после истечения определять область распространения примеси определенной концентрации при заданных метеоусловиях для определения зон превышения ПДК и степени ее превышения.

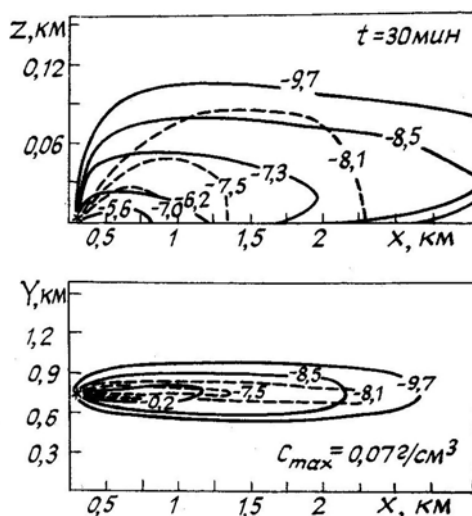


Рис. 5. Вертикальный разрез в плоскости xOz (а) и горизонтальный в плоскости xOy (б) полей концентрации примеси, рассчитанные по методике с детальным расчетом полей ветра и турбулентности в варианте 1 — сплошные линии, по методике Гаусса в варианте 5 — штриховые

Сравнение с гауссовскими методиками. Для сравнения результатов разработанной численной модели с гауссовской диффузионной моделью струи были проведены расчеты по методике Пасквилла для постоянно действующего точечного источника [7, 10]. Выражение для расчета концентрации примеси при условии пренебрежения диффузией в направлении оси X по сравнению с ветровым переносом в том же направлении имеет вид

$$c = (2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u})^{-1} Q' \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (12)$$

где h — расстояние от земли до приподнятого источника; Q' — мощность непрерывного источника, σ_y , σ_z — дисперсии распределения концентрации в направлении осей y , z , определяемые из семейства кривых для различных классов устойчивости атмосферы, полученных Пасквиллом на основе экспериментов [10].

На рис. 5 представлены вертикальные и горизонтальные разрезы концентрации примеси, рассчитанные по методике Гаусса (штриховые линии) и описанной выше модели (сплошные линии) для значения $G = 2$ м/с. Как следует из рис. 5, результаты расчетов отличаются друг от друга, хотя та и другая модель описывают поля распространения примеси в виде факелов. Но, т. к. в Гауссовой модели заложено постоянство ветра по высоте, она не позволяет описать отрыв удаленной от точки выброса линии постоянной концентрации от земли, что связано прежде всего с профилем скорости ветра.

Стационарная гауссовская модель не позволяет описать эволюцию облака примеси по времени, причем наиболее искаженную картину она дает именно в начале истечения примеси (аварии). Она не позволяет учесть влияние уровня шероховатости поверхности, что, как показали предыдущие расчеты, может быть существенным. При увеличении скорости ветра происходит «растяжение» зоны загрязнения с одновременным уменьшением концентрации.

Таким образом, для правильного определения полей концентрации невесомой примеси необходим тщательный расчет полей турбулентности и ветра, что невозможно осуществить в рамках гауссовских моделей в большом диапазоне параметров, однако позволяющая представленная в данной работе численная модель.

Заключение. Проведенные численные эксперименты позволяют определить параметры зоны распространения примеси в определенный момент времени после истечения при заданных метеопараметрах. Проведены сравнения полученных результатов с результатами, рассчитанными по методике диффузионной струи Гаусса (12) для различных значений ветра, и показано, что модель Гаусса недостаточно точно описывает зависимость полей концентрации от скорости ветра и расчеты горизонтальной и вертикальной протяженности зоны концентрации примеси, превышающей ПДК (и степени ее превышения), чрезвычайно важны не только для оценки влияния промышленных предприятий на окружающую среду и экологическую обстановку при нормальных выбросах, но и позволяют прогнозировать последствия аварийных выбросов. Это особенно важно для оптимизации оптического мониторинга загрязнения атмосферы, в частности, при получении оперативной информации обо всем поле примеси позволяет оценить необходимое количество оптических датчиков, частоту их сети.

Данная модель является достаточно оперативной и может быть реализована на заданном объекте на персональном компьютере совместно с системой оптических датчиков.

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
2. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, ч. 1, 1965; ч. 2, 1967.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 289 с.
4. Пененко В. В., Алюян А. Е. Модели и методы в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
5. Метеорология и атомная энергия. М.: Мир, 1968.
6. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Хворостьянов В. И. Облака и климат. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 512 с.
7. Ландсберг Г. Е. Климат города. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 248 с.
8. Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. Численное моделирование облаков. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 185 с.
9. Нестеренко В. Б., Михалевич А. А., Тверховский Б. Е. Быстрые реакторы и теплообменные аппараты АЭС с диссоциирующим теплоносителем. Минск, 1978.
10. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу // Под ред. Е. Н. Теверовского. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Вишневский Е. П., Занов С. И., Пимкин В. Г. // Изв. АН БССР. Серия физико-энергетических наук. 1989. № 1. С. 9–15.

Центральная аэрологическая обсерватория,
г. Долгопрудный

Поступила в редакцию
10 июня 1991 г.

K. Ya. Kondratiev, V. I. Khvorostyanov, O. P. Kotova, N. I. Cherkasova.
Mathematical Modelling of Accidental Emissions as a Means for Optimizing the Optical Monitoring of Atmospheric Pollutions.

An operative mathematical model of an atmospheric contaminant dispersal in the ground atmospheric layer at an accidental outburst is developed aiming at proper organization of an optimized network of optical monitoring of the industrial emissions into the atmosphere. The model is based on the use of: 1) turbulence motion and energy balance equations for calculating the wind and turbulence regimes; 2) equations of the moisture and temperature transfer with the account of their diurnal behaviors; 3) equation of turbulent diffusion, describing the transfer of a weightless passive components of the atmosphere in different accidental situations; 4) equations of the heat transfer in soil and thermal equilibrium of the surface. Numerical studies of general regularities of the contaminating cloud evolution at different values of the geostrophic wind G and of the underlying surface roughness z_0 are carried out. Thus calculated results are compared with the results obtained using the Gaussian model of a diffuse jet stream. It is shown that the developed numerical model describes the dispersal of an atmospheric contaminant emitted into the atmosphere at a nonstationary accidental outburst better than the Gaussian model especially when assessing the effect of industrial activity on the environment and elaborating the environmental protection measures. The results and PC compatible model could be used for optimizing the network of optical sensors, their density and disposition in different accidental situations.