

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И КОНТРОЛЮ
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

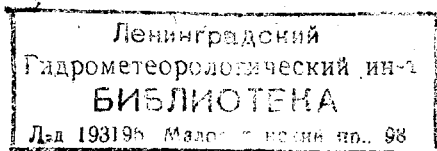
ТРУДЫ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
им. А. И. ВОЕЙКОВА

Выпуск

417

АТМОСФЕРНАЯ ДИФфуЗИЯ
И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук М. Е. БЕРЛЯНДА



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1979

В сборнике представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований турбулентной диффузии примесей в атмосфере. Рассматриваются вопросы влияния рельефа на распределение примесей, определения поля среднегодовых концентраций примеси, распространения радиации в замутненной атмосфере. Производится сравнение данных расчета и эксперимента. Приводятся сведения о новых разработках методов наблюдения и анализа химического состава атмосферного воздуха, оценке коррозионной активности, а также метеорологических и климатических факторах, определяющих уровень загрязнения атмосферы.

Сборник рассчитан на специалистов, занимающихся вопросами метеорологии, гигиены атмосферного воздуха, вентиляции и газоочистки, коррозии металлов, физики и химии аэрозолей.

Results of theoretical and experimental investigations of pollutant turbulent diffusion in the atmosphere are presented.

Problems of relief effect, determination of mean annual pollutant concentration field, theory of radiation dispersion in turbid atmosphere, comparison of calculated and experimental data are considered. Information on new elaborations of methods for observation and analysis of chemical composition of the ambient air, estimation of corrosive aggressiveness, and meteorological and climatic factors, determining air pollution level is presented.

This volume may be of value for specialists in the field of meteorology, ventilation and air control, atmospheric hygiene, corrosion of metals, physics and chemistry of aerosols.

Труды ГГО, вып. 417

АТМОСФЕРНАЯ ДИФФУЗИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА

Редактор Л. И. Штаникова. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор Т. В. Прокофьева

Слано в набор 29.05.79. Подписано в печать 2.10.79. М-13185. Формат 60×90^{1/16}. Б. тип. № 1. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 9. Уч.-изд. л. 8,76. Тираж 900 экз. Индекс МЛ-2

Заказ 581. Цена 60 коп. Заказное. Гидрометеоздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Сортавальская книжная типография Управления по делам издательств, полиграфии и книжной торговли Совета Министров Карельской АССР. Сортавала, Карельская, 42.

А 20807-164
069(02)-79 23-78(2)1903040000

© Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова (ГГО), 1979 г.

*М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Я. С. Канчан,
Р. И. Оникул, С. С. Чичерин*

О РАСЧЕТЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Введение

Теоретические методы исследования атмосферной диффузии примесей и расчеты загрязнения воздуха, выполняемые на их основе, широко используются при разработке многих мероприятий по защите воздушного бассейна. При этом большей частью применяются результаты вычислений максимально возможных разовых концентраций. Выполнение требования, заключающегося в том, что максимальные концентрации при неблагоприятных метеорологических условиях не должны превышать предельно допустимые концентрации (ПДК), обеспечивает выполнение гигиенических нормативов чистоты воздуха при прочих условиях, которые могут встречаться в течение длительного времени [4, 15].

Вместе с тем для решения ряда научных и практических задач, связанных с осуществлением контроля мероприятий по охране воздушного бассейна от загрязнения, самостоятельный интерес представляет расчет средних концентраций за длительные периоды времени (месяц, сезон, год). В последнее время этому вопросу уделяется все большее внимание главным образом в целях оценки состояния загрязнения воздуха в районах промышленных предприятий.

В США и ряде других стран такая задача решается на основе усреднения результатов расчета разовых концентраций по известным эмпирико-статистическим формулам гауссовского типа с использованием суперпозиции полей от одиночных источников. При этом учитываются распределения во времени входящих указанных формулы параметров: скорости ветра и дисперсии концентраций, которые определяются (по рекомендациям Ф. Пэвила, Ф. Гиффорда и др.) в зависимости от класса устойчиво-

сти приземного слоя воздуха. Примером такого исследования является выполненная в Венгрии работа Д. Сепеши [13] по вычислению среднегодовой концентрации примеси вокруг одиночного источника типа тепловой электростанции. Интересные разработки для случая группы источников проводятся Ф. Гесеком и Д. Заводским на примере г. Братиславы. Расчеты среднегодовой концентрации от источника фиксированной высоты с учетом розы ветро выполнялись Д. Л. Лайхтманом [11] и др. Упрощенную схему пересчета максимальных концентраций, определенных в соответствии с [15], на среднегодовую концентрацию для нормирования выбросов радиоактивных продуктов использовали Н. Е. Артемсва и Е. Н. Теверовский [3].

Настоящая статья посвящена исследованию поля средних концентраций от одиночных и групповых источников с учетом начального подъема выбросов и климатических условий, исходя из общих предпосылок теории атмосферной диффузии и расчета загрязнения воздуха, а также принципов, развитых в предыдущих работах авторов [4]. При этом в основу было положено численное решение уравнения турбулентной диффузии. Климатические особенности местности учитываются путем построения и использования совместных функций распределения основных определяющих параметров: скорости и направления ветра, коэффициент турбулентного обмена в приземном слое воздуха.

2. Определение поля средних концентраций от одиночного источника и группы источников

Исходным для расчета средних концентраций $\bar{q}$ за длительный период времени τ является соотношение

$$\bar{q}_\tau = \int_0^\infty q p_{\tau, \tau}(q) dq, \quad (1)$$

где $p_{\tau, \tau}(q)$ — плотность вероятности для разовых концентраций, относящаяся к интервалу времени $\tau \ll \tau$. Значения q находятся на основании решения стационарного уравнения турбулентной диффузии, которое для легкой консервативной примеси, распространяющейся над однородной поверхностью суши, имеет вид

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} + M \delta(x) \delta(y) \delta(z - H) \quad (2)$$

при граничном условии на подстилающей поверхности ($z=0$) $k_z \frac{\partial q}{\partial z} = 0$. Здесь ось x ориентирована по среднему за период τ направлению ветра; u — скорость ветра, k_y и k_z — составляющие коэффициента обмена по осям y и z ; M — мощность источника, расположенного в точке $x=y=0$; $z=H$, δ — символ дельта-функции

зависимость концентрации от времени при этом учитывается параметрически.

На основе численного решения (2) в работах [4, 7, 8] была разработана схема расчета концентраций при различных метеорологических условиях и временах осреднения τ от нескольких минут до нескольких часов. При этом предполагалось, что направление ветра φ колеблется относительно среднего за время τ значения $\bar{\varphi}$ с сравнительно небольшой дисперсией φ_0^2 .

При расчете средних концентраций первоочередное значение имеют часто встречающиеся, так называемые нормальные метеорологические условия. Для них могут быть приняты следующие аппроксимации скорости ветра u и коэффициента турбулентности k_z [4, 5, 16]

$$u = u_1 \frac{\lg \frac{z+z_0}{z_0}}{\lg \frac{z_1+z_0}{z_0}}, \quad h = \frac{k_1}{10l}; \quad k_z = \begin{cases} k_1(z+z_0) & \text{при } z \leq h \\ k_1(h+z_0) & \text{при } z > h, \end{cases} \quad (3)$$

где u_1 и k_1 — значения u и k_z при $z=z_1$ (обычно 1 м), h — высота приземного слоя, $l=2\omega \sin \varphi_r$ — параметр Кориолиса, ω — угловая скорость вращения земли, φ_r — географическая широта, z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

С учетом зависимости параметров задачи (в первую очередь $\bar{\varphi}$) от τ в [7] были получены формулы, позволяющие определить концентрацию q , осредненную за время τ . При расчете концентраций, относящихся к периодам осреднения $\tau \gg \tau$ в [8], было использовано соотношение, учитывающее изменчивость направления ветра, характеризующую розой ветров. При этом среднегодовая концентрация определялась по формуле

$$\bar{q} = \int_{-\pi}^{+\pi} q p_1(\varphi) d\varphi, \quad (4)$$

где $p_1(\varphi)$ — плотность вероятности направления ветра φ .

Согласно [4], в достаточно общем случае в полярной системе координат решение уравнения (2) с учетом колебаний направления ветра имеет вид

$$q = \frac{e^{-\frac{(\varphi-\bar{\varphi})^2}{2\varphi_0^2}}}{\varphi_0 \sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} q'(r, u_1, k_1). \quad (5)$$

Здесь r — расстояние от источника до расчетной точки (x, y) , угол φ отсчитывается от направления на восток против часовой стрелки, а q' — концентрация от линейного источника бесконечной длины. При данном представлении в (1) вероятность $p(q) dq$ того, что концентрация находится в интервале от q до $q+dq$, сводится к вероятности $p(u_1, k_1, \bar{\varphi}, \varphi_0) du_1 dk_1 d\bar{\varphi} d\varphi_0$ появления метео-

рологических параметров u_1 , k_1 , φ_0 и $\bar{\varphi}$. Задача упрощается в связи с тем, что φ_0 , как правило, существенно меньше, чем угловой масштаб изменения $p(\bar{\varphi})$. В таком случае множитель при $\frac{1}{r}$ в (5) можно рассматривать как аппроксимацию дельта-функции $\delta(\varphi - \varphi_0)$. В результате, подставив с учетом сказанного (5) в (1) и проинтегрировав полученное выражение по $\bar{\varphi}$, получим

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{1}{r} \int q'(r, u_1, k_1) p(u_1, k_1, \varphi) du_1 dk_1. \quad (6)$$

Из этой формулы, справедливой при весьма общих предположениях, следует важный вывод о том, что среднегодовая концентрация практически не зависит от параметра φ_0 , в то время как для разовых концентраций изменчивость этой характеристики играет решающую роль.

При переходе от (1) к (6) в величину $\bar{q}$ вносится относительная погрешность ε , которая связана с зависимостью совместной плотности вероятности $p(u_1, k_1, \bar{\varphi}, \varphi_0)$ от параметра φ . В предположении, что эта изменчивость определяется главным образом вытянутостью розы ветров, можно сказать, что для i -руμβовой розы ветров с повторяемостью ветров каждого румба $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ погрешность ε находится по формуле

$$\varepsilon = \frac{n \bar{\varphi}_0}{(2\pi)^{3/2}} \max_{(k)} \frac{|\rho_{k+1} - 2\rho_k + \rho_{k-1}|}{\rho_k}, \quad (7)$$

где $\bar{\varphi}_0$ — среднее значение φ_0 . Для обычно встречающихся параметров розы ветров и $\varphi_0 \approx 0,1$ максимальная погрешность за счет использования (6) не превышает 10—20%.

3. Функции распределения характеристик ветра и турбулентности

Из приведенных формул следует, что для расчета концентрации требуются функции распределения скорости ветра и коэффициента обмена в приземном слое воздуха. К настоящему времени такие распределения практически не исследовались. Известны в основном функции распределения для скорости ветра на высоте флюгера, главным образом с учетом сильных ветров для целей строительной климатологии и др. Поэтому необходимо привлечение соответствующих материалов наблюдений и их специальной обработки. Для этого удобно использовать информацию, которую уже в течение сравнительно длительного времени поступает с действующей в СССР сети тепловых станций. На этих сетях ведутся систематические наблюдения за скоростью ветра и температурой на нескольких уровнях в приземном слое воздуха.

При решении поставленной задачи использовались результаты синхронных измерений значений разности температур $\Delta\theta$ на урс-

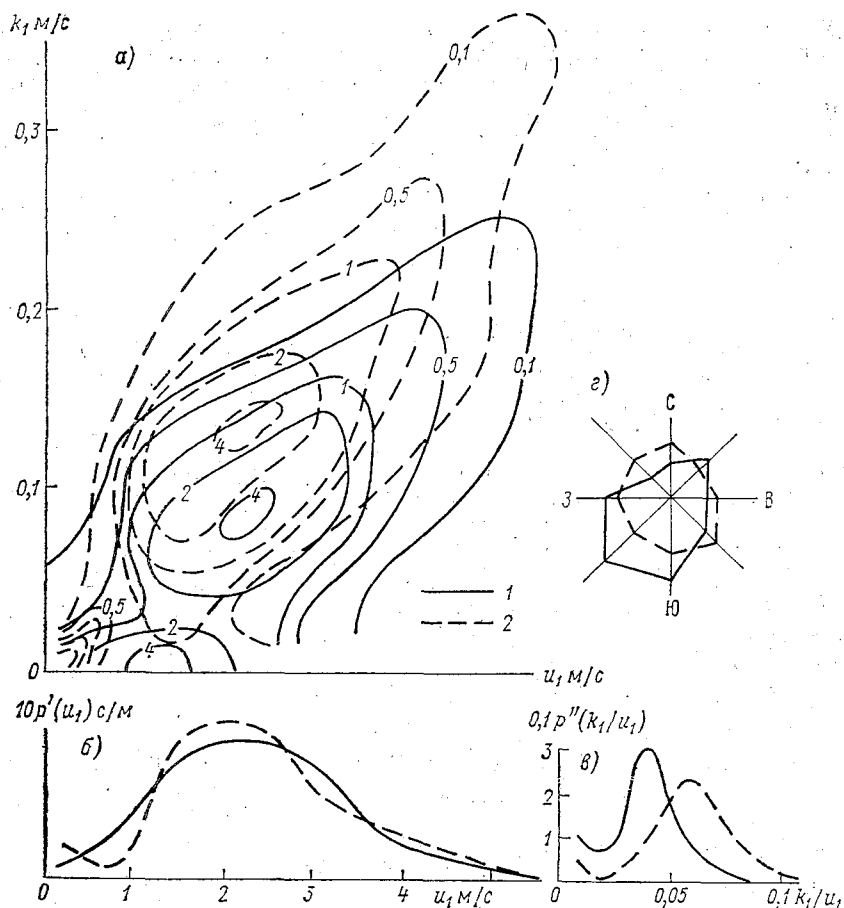


Рис. 1. Функции распределения $p_2(u_1, k_1)$ (а), $p'(u_1)$ (б), $p''(k_1/u_1)$ (в) и розы ветров (г).

1 — Воейково, 2 — Борисполь.

ях 0,5 и 2 м, разности скоростей ветра Δu на уровнях 2 и 0,5 м, корость ветра u_2 на уровне 2 м и направление ϕ на высоте флюгера ($z_{\phi} = 10$ м). Для расчетов в данной работе использовались материалы наблюдений за 1974 г. по шести станциям, расположенным в различных климатических зонах СССР: север ЕТС (Коткино), северо-запад ЕТС (Воейково), Украина (Борисполь), Средняя Азия (Фрунзе), Восточная Сибирь (Якутск), Дальний Восток (Тимирязевский). Расчет k_1 и h производился в соответствии с результатами работ М. Е. Берлянда и Е. Л. Гениховича [5, 16]. Обработка материалов выполнена Л. В. Травкиной.

Для этих станций были построены совместные плотности вероятности $p(u_1, k_1, \phi)$. Их анализ показал, что в большинстве

случаев совместное распределение u_1 и k_1 почти не зависит от направления ветра φ . При этом сходны как характер изолиний функции $p(u_1, k_1)$ для различных φ , так и численные значения моментов рассматриваемых величин. Например, для Воейковского средние значения скорости ветра $\bar{u}_1$ и коэффициента турбулентности $\bar{k}_1$ имеют разброс в пределах $\pm 15\%$ (отношение k_1/u_1 более устойчиво и характеризуется разбросом $\pm 7\%$). Таким образом для тех районов, в которых отсутствует ярко выраженная неоднородность подстилающей поверхности (горы и т. п.), можно принять

$$p(u_1, k_1, \varphi) = p_1(\varphi) p_2(u_1, k_1). \quad (8)$$

Функции распределения и розы ветров для Воейковского и Борисполя приведены на рис. 1.

При разработке приближенных схем расчета среднегодовых концентраций соотношение (8) в ряде случаев можно еще более упростить, если учесть, что параметры u_1 и k_1 коррелированы между собой значительно сильнее, чем u_1 и k_1/u_1 (для u_1 и k_1 средний по шести рассмотренным станциям коэффициент корреляции составил 0,77, а для u_1 и k_1/u_1 — 0,27. В связи с этим в (8) целесообразно перейти от $p_2(u_1, k_1)$ к совместной плотности вероятности $p_3(u_1, k_1/u_1)$, воспользовавшись соотношением

$$p_2(u_1, k_1) = \frac{1}{u_1} p_3(u_1, k_1/u_1). \quad (9)$$

Величину p_3 можно приближенно представить в виде

$$p_3(u_1, k_1/u_1) = p'(u_1) p''(k_1/u_1). \quad (10)$$

Функции распределения $p'(u_1)$ и $p''(k_1/u_1)$ также приведены на рис. 1.

Качество приближения (10) можно оценить для Воейковского и Борисполя, например, по данным, приведенным на рис. 1. Расчеты показывают, что в области основного максимума $p_2(u_1, k_1)$ погрешность аппроксимации составляет несколько процентов. Значительные различия наблюдаются лишь на краях, однако они как правило, соответствуют редко встречающимся условиям, т. е. не должны оказывать существенное влияние на расчетные значения средних концентраций.

4. Учет климатических условий и начального подъема в расчетных формулах

В результате подстановки (8) в (6) выражение для $\bar{q}$ приводится к виду

$$\bar{q}(r_1, \varphi) = p_1(\varphi) \bar{q}_r, \quad (11)$$

где

$$\bar{q}_r = \frac{1}{r} \int q'(r, u_1, k_1) p_2(u_1, k_1) du_1 dk_1. \quad (12)$$

Величина q_r с точностью до множителя $\frac{1}{2\pi}$ совпадает со средней концентрацией при круговой розе ветров. Эти формулы являются основными для определения средней концентрации от одичного источника за длительный период времени (сезон, год). Расчет среднегодового поля концентраций для группы источников производится также на основе выражений (11) и (12) суперпозицией полей от отдельных источников.

Приведенные формулы могут быть легко модифицированы для расчета средних концентраций по данным аэрологических измерений, когда имеется информация о приподнятых инверсиях температуры, штилевых слоях и т. п. В то же время формулы (11) и (12) дают основу для разработки упрощенных схем вычисления $\bar{q}$. В частности, существенные упрощения возможны при подстановке (9) и (10) в (12). При этом двойной интеграл удобно представить в виде двух повторных. Интеграл по переменной k_1/u_1 можно вычислить приближенно, если учесть, что плотность вероятности $p''(k_1/u_1)$ практически отлична от нуля только в узкой окрестности модального (наиболее вероятного) значения $k_1/u_1 = \lambda$. Поэтому для расчета $\bar{q}_r$ можно использовать соотношение

$$\bar{q}_r \approx \frac{1}{r} \int q'(r, u_1, \lambda u_1) p'(u_1) du_1. \quad (13)$$

С достаточной точностью фактическое распределение $p'(u_1)$ здесь можно аппроксимировать предложенным в работах [1, 2] выражением

$$p'(u) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{u}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{u}{\beta} \right)^{\gamma}}. \quad (14)$$

Параметры β и γ связаны со средним значением $\bar{u}_1$ и коэффициентом вариации скорости ветра соотношением

$$\bar{u}_1 = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right); \quad V = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\gamma}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} - 1}, \quad (15)$$

де $\Gamma(x)$ — гамма-функция. Значения характеристик $\bar{u}_1$ и V для различных пунктов ЕТС содержатся в [14].

Концентрация q' от линейного источника определяется на основе численного решения уравнения турбулентной диффузии с коэффициентами (3) методом, изложенным в [4]. Для рассматриваемых моделей u , k_z и h результаты расчетов затабулированы

в [9] в удобном для практического применения виде. На их основе построены аппроксимационные формулы:

$$\begin{aligned} q' &= q'_m \cdot f_1\left(\frac{x}{x'_m}, \xi\right), \\ x'_m &= \frac{u_1 H}{k_1} \cdot f_2(\xi), \\ q'_m &= \frac{M}{u_1 H} \cdot f_3(\xi), \end{aligned} \quad (16)$$

где x'_m — расстояние, на котором наблюдается максимальная концентрация q'_m , $\xi = \frac{H}{h}$.

Для диапазона $0,4 \leq \xi \leq 8$ можно использовать приближенные соотношения:

$$\left. \begin{aligned} f_1\left(\frac{x}{x'_m}, \xi\right) &= \left(\frac{x'_m}{x} e^{1 - \frac{x'_m}{x}}\right)^{n(\xi)}, \\ f_2(\xi) &= \frac{4,0 + 4,7 \xi}{\ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}, \\ f_3(\xi) &= 0,052 \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}, \\ n(\xi) &= \frac{1 + 1,1 \xi}{1 + 2,2 \xi}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

При вычислении средних концентраций для реального промышленного источника необходимо также учитывать начальный подъем примеси ΔH , определяющийся ее скоростью выхода w_1 и перегревом ΔT относительно окружающего воздуха, а также радиусом устья трубы R_0 . Тогда под H в (16) следует понимать сумму ΔH и геометрической высоты источника H_0 . В рассматриваемом случае, когда исходная метеорологическая информация берется по данным приземных градиентных наблюдений, с этой целью использовалась формула из [7]

$$\Delta H = \frac{1,5 w_0 R_0}{u_\phi} \left(2,5 + \frac{3,3 g R_0 \Delta T}{T_a u_\phi^2} \right), \quad (18)$$

где u_ϕ — скорость ветра на уровне флюгера $z_\phi = 10$ м, $\frac{g}{T_a}$ — параметр плавучести. Аналогично [6], удобно видоизменить эту формулу, введя параметры

$$f = \frac{67 w_0^2 R_0}{\frac{g}{T} \Delta T H_0^2} \quad \text{и} \quad v_{1M} = 1,3 \left(\frac{\pi R_0^2 w_0}{H_0} \frac{g}{T} \Delta T \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (19)$$

При этом из (13) и (16) следует, что приближенно $\bar{q}_r$ можно представить в виде

$$\bar{q}_r = \frac{M \lambda}{v_{1M} H_0^2} F\left(f, \frac{v_{1M}}{u_1}, V, \frac{l H_0}{\lambda v_{1M}}, \frac{\lambda r}{H_0}\right). \quad (20)$$

Используя условие $\frac{\partial \bar{q}_r}{\partial r} = 0$, получим формулы для величин максимума $\bar{q}_{mr}$ и расстояния до источника $\bar{r}_m$, на котором он наблюдается:

$$\bar{q}_{mr} = \frac{M \lambda}{v_{1M} H_0^2} F_1\left(f, \frac{v_{1M}}{u_1}, V, \frac{l H_0}{\lambda v_{1M}}\right), \quad (21)$$

$$\bar{r}_m = \frac{H_0}{\lambda} F_2\left(f, \frac{v_{1M}}{u_1}, V, \frac{l H_0}{\lambda v_{1M}}\right). \quad (22)$$

5. Анализ результатов расчетов

Алгоритм вычисления средних концентраций от одиночного источника по формулам (11) и (12), основанный на использовании фактического распределения $p_2(u_1, k_1)$ и изложенной в [9] схемы расчета рассеивания примеси от линейного источника с учетом соотношения (18) для начального подъема, был реализован в виде программы на ЭВМ БЭСМ-6. Вычисление интеграла (12) производилось по кубатурной формуле «центральных параллелепипедов». Плотность вероятности $p_1(\varphi)$ рассчитывалась по значениям повернутой на 180° розы ветров ρ_k , которые относились к углам $\varphi = \frac{2\pi k}{n}$, а для промежуточных значений φ использовалась линейная интерполяция. Функция $p_1(\varphi)$ нормировалась на единицу, т. е.

$$\int_0^{2\pi} p_1(\varphi) d\varphi = 1. \quad (23)$$

Результаты расчетов выдавались на печать в виде таблиц, а также карт изолиний средней концентрации. На рис. 2 приведены поля нормированной на мощность выброса среднегодовой концентрации $\bar{q}/M$ вблизи одиночного источника высотой $H_0 = 150$ м с параметрами выброса $w_0 = 10$ м/с, $R_0 = 4$ м, $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 0$, рассчитанные для условий ст. Воейково и Борисполя, расположенных соответственно вблизи Ленинграда и Киева.

Рассчитанные поля во всех рассмотренных случаях имеют два максимума. Для условий Ленинграда при $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ глобальный максимум $\bar{q}_m/M = 0,67 \cdot 10^{-8}$ с/м³ находился на расстоянии $\bar{r}_m = 5$ км к северо-востоку от источника. Локальный максимум $\bar{q}/M$, расположенный к юго-западу также примерно в 5 км от источника, в 1,8 раза меньше. При отсутствии перегрева ΔT

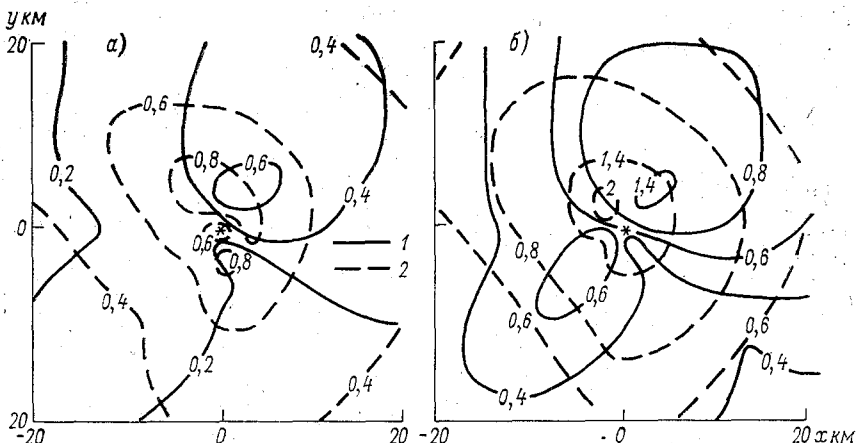


Рис. 2. Распределение нормированной среднегодовой концентрации $\frac{\bar{q}}{M} 10^8$ вокруг точечных источников нагретого (а) и холодного (б).
1 — Воейково, 2 — Борисполь.

дымовых газов значение $\bar{r}_m$ уменьшается до 4,5 км, а $\bar{q}_m/M$ увеличивается примерно в 2 раза.

Расчетный максимум средних концентраций как для холодных, так и для нагретых выбросов оказался для Киева примерно в 1,5 раза больше, чем для Ленинграда. При этом $\bar{r}_m$ составляет 4,5 км при $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ и 3 км при $\Delta T = 0$.

На рис. 3 показана зависимость от расстояния величины $\bar{q}_r/M$, рассчитанной для ст. Воейково по формулам (12) и (13) для источника с параметрами $H_0 = 150$ м, $R_0 = 4$ м, $w_0 = 10$ м/с, $\Delta T = 100^\circ\text{C}$. При этом использовались фактические распределения

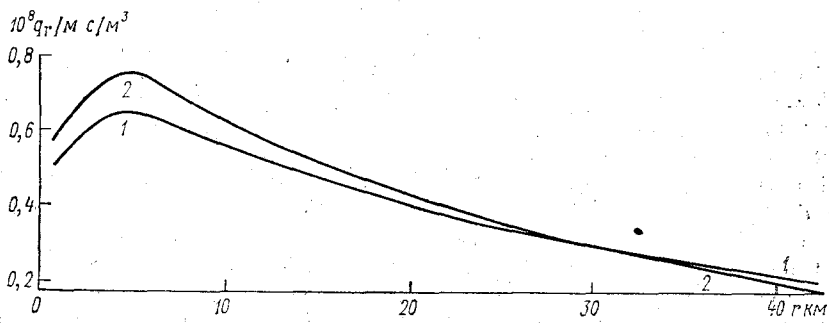


Рис. 3. Распределение $\frac{q_r}{M} 10^8$ для нагретого источника, вычисленное для ст. Воейково по формулам (12) (1) и (13) (2).

$p_2(u_1, k_1)$ и $p'(u_1)$. Модальное значение λ принималось равным 0,04. Как видно, в этом случае погрешность за счет перехода от (12) к (13) не превосходит нескольких процентов. Для холодных выбросов ($\Delta T=0$) при прочих равных параметрах погрешность больше (15–20%). Увеличение погрешности связано с существенным уменьшением определенной по методике [15] опасной скорости ветра $u_{1м}$ (от 3,2 м/с до редко наблюдаемого в условиях ст. Воейково значения 0,4 м/с). Как было отмечено выше, на краях функции распределения использование аппроксимации (9) приводит к заметным погрешностям. Таким образом, (13) дает

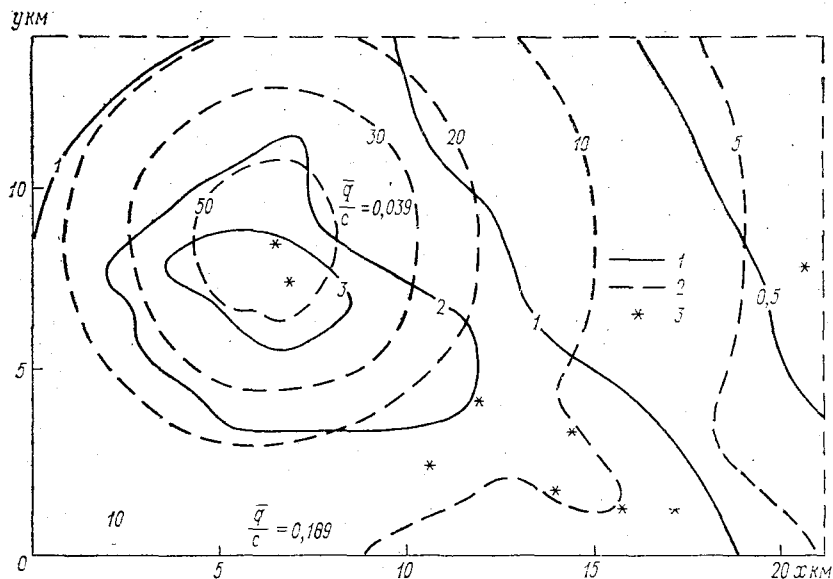


Рис. 4. Распределение рассчитанных среднегодовых (1) и максимальных разовых (2) концентраций по территории города при наличии промышленных объектов (3).

наилучшие результаты в тех случаях, когда опасная скорость ветра $u_{1м}$ соответствует достаточно часто наблюдаемым условиям. При этом зависимость средней концентрации от температурной стратификации учитывается в основном параметром λ .

Алгоритм расчета поля среднегодовой концентрации от группы источников, основанный на суперпозиции рассчитанных по формулам (11) и (12) полей от отдельных источников, был реализован в виде программы на ЭВМ БЭСМ-6. В ней использованы те же исходные данные о координатах и параметрах источников выброса вредных веществ в атмосферу, что и в унифицированной программе расчета загрязнения атмосферы [10], а схема определения поля средней концентрации от отдельного источника совпадает с описанной выше.

На рис. 4 приведено распределение среднегодовых концентраций (условные единицы) окислов азота для случая 27 источников, расположенных в крупном городе (площадь около 300 км²) на девяти промышленных объектах (нефтеперерабатывающих предприятиях, ТЭЦ и ГРЭС) с высотой труб от 12 до 100 м, и максимальных разовых концентраций, вычисленных для наиболее неблагоприятных метеорологических условий.

Общий характер изменения $\bar{q}$ и c оказался примерно сходным. Абсолютные максимумы $\bar{q}$ и c отмечались в северо-западной части города, а абсолютные минимумы — в северо-восточной. Значения $\bar{q}$ и $\bar{c}$ изменяются по территории города примерно в 40 раз.

6. Соотношение между средними и максимальными разовыми концентрациями

Как уже отмечалось, нормирование выбросов вредных веществ в атмосферу производится на основе требования, чтобы максимальные разовые концентрации примесей вблизи земли (относящиеся к двадцатиминутному осреднению) не превосходили ПДК. Существующее в настоящее время соотношение между ПДК для разовых и среднесуточных (среднегодовых) концентраций таково, что при этом, как правило, выполняются санитарно-гигиенические нормативы и для большего времени осреднения. Чтобы оценить в каких ситуациях нормирование по средним концентрациям не обходимо, надо исследовать соотношение между средними и максимальными разовыми концентрациями.

Теоретически для точечного источника этот вопрос был исследован в [8], где на основе (4) было получено соотношение

$$\bar{q}(r, \varphi) = \sqrt{2\pi} \varphi_0 p_1(\varphi) q(r). \quad (24)$$

Здесь $q(r)$ — наземное осевое значение разовой концентрации на расстоянии r от источника. Для круговой розы ветров, когда в соответствии с (23) $p_1(\varphi) = \frac{1}{2\pi}$, из (24) следует

$$\bar{q}(r, \varphi) = \frac{\varphi_0}{\sqrt{2\pi}} q(r). \quad (25)$$

Согласно (24) и (25), распределения с расстоянием разовой и среднегодовой концентраций подобны друг другу, так что их максимальные значения достигаются на одинаковом удалении от источника. При учете повторяемости скоростей ветра и коэффициентов турбулентности вместо (24) должны использоваться соотношения (11) и (12). В этом случае зависимость от расстояния среднегодовой концентрации несколько отличается от аналогичной зависимости для разовой концентрации при неблагоприятных метеорологических условиях и опасной скорости ветра. В частности расстояние $\bar{r}_m$ до точки, в которой достигается максимум среднее

концентрации, систематически превышает координату x_m точки, в которой разовая концентрация имеет максимальное значение c_m . Среднегодовая концентрация медленнее, чем разовая, убывает с расстоянием. В результате, отношение $\bar{q}/c$ в разных точках местности различно. Так, для примера расчета, представленного на рис. 3, при круговой розе ветров $\bar{q}/c$ меняется от 0,011 при $r=2,25$ км до 0,11 при $r=45$ км.

Основной характеристикой поля средних концентраций является максимальное значение $\bar{q}_m$ среднегодовой концентрации. Важно установить соотношение между $\bar{q}_m$ и максимальной разовой концентрацией c_m . Выполненные расчеты показывают, что $\bar{q}_m/c_m$ для одиночного источника зависит от функции распределения φ , u_1 и k_1 (т. е. от повторяемости различных условий рассеяния примесей); а также от характеристик выброса. Так, для источника с параметрами $H_0=150$ м; $R_0=4$ м; $\omega_0=10$ м/с; $\Delta T=100^\circ\text{C}$ для условий ст. Воейково $\bar{q}_m/c_m=0,033$ при реально наблюдавшейся розе ветров и $\bar{q}_m/c_m=0,019$ при круговой розе ветров (эти значения близки к экспериментальным данным [17]). Для аналогичного источника с $\Delta T=0$ указанные отношения оказались в 1,9 раза меньшими.

Приближенную формулу для оценки $\bar{q}_m/c_m$ можно получить из (21), если воспользоваться результатами работы [4] и приближенно представить c_m в виде

$$c_m = \frac{MK_m}{\sqrt{2\pi} v_{1m} H_0} G_1(f), \quad (26)$$

где K_m — максимальное значение параметра $K = \frac{k_1}{u_1 \varphi_0}$ при опасной скорости ветра и неблагоприятных метеорологических условиях. С учетом (11) и (26) из (21) следует

$$\frac{\bar{q}_m}{c_m} = p_1(\varphi) \sqrt{2\pi} \frac{\lambda}{K_m} \Phi_1\left(f, \frac{v_m}{u_{1m}}, V, \frac{lH_0}{\lambda v_{1m}}\right). \quad (27)$$

Это соотношение можно строго получить из (21), если учесть, что при $V \rightarrow 0$ и скорости ветра, равной опасной, средняя концентрация легко выражается через максимальную разовую.

Параметры λ и K_m в этой формуле относятся к различной стратификации. Если, однако, такое различие не приводит к существенному изменению отношения k_1/u_1 , то можно принять $\lambda/K_m \approx \varphi_0$, где φ_0 соответствует условиям, при которых достигается максимальная разовая концентрация c_m . Таким образом, (27) представляет собой обобщение (24) с учетом климатологических характеристик ветра и турбулентного обмена.

Из (22) можно получить аналогичную (27) формулу для отношения $\bar{f}_m$ и расстояния до источника x_m , на котором разовая концентрация достигает максимального значения c_m .

$$\frac{\bar{r}_m}{x_m} = \frac{\lambda_m}{\lambda} \Phi_2\left(f, \frac{v_{1m}}{u_1}, V, \frac{IH_0}{\lambda v_{1m}}\right), \quad (28)$$

где λ_m — значение отношения k_1/u_1 при опасной скорости ветра и неблагоприятных условиях рассеяния примеси.

Расчеты показали, что для реального диапазона $H_0/\lambda v_{1m}$ зависимость функций Φ_1 и Φ_2 от этой величины слабая и ею можно пренебречь. Номограммы для определения функции Φ_1 для сильно нагретых ($f=0$) и холодных ($f=100$) выбросов приведены на рис. 5. Для удобства использования по оси ординат на этих рисунках отложено отношение средней скорости ветра $\bar{u}_1$ к опасной скорости u_{1m} для источника (согласно [15] величина $\bar{u}_{1m}/v_{1m}$ зависит только от f). Как видно, функция Φ_1 всегда меньше еди-

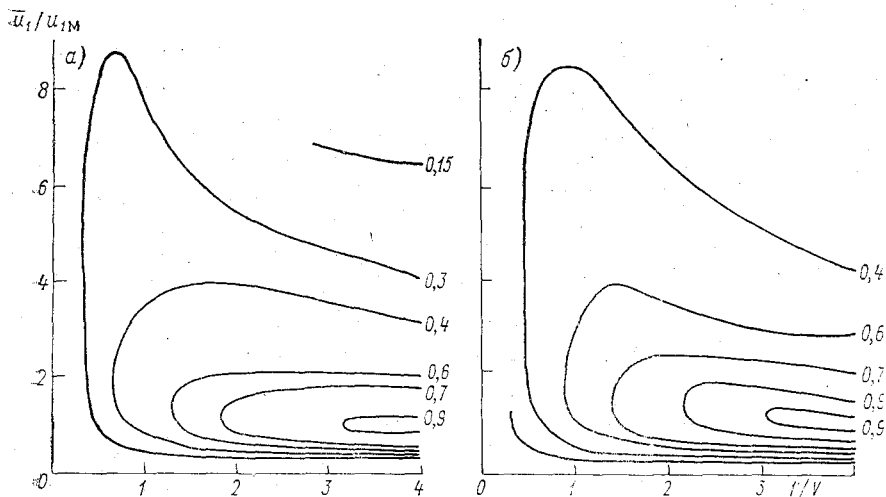


Рис. 5. Изолинии функции Φ при $f=0$ (а) и $f=100$ (б).

ицы, причем $\Phi_1 \rightarrow 1$ при $\bar{u}_1/u_{1m}$ и $V \rightarrow 0$. Таким образом, учет фактического распределения скоростей ветра и турбулентного обмена приводит к уменьшению отношения $\bar{q}_m/c_m$. Степень такого уменьшения зависит как от распределения скоростей ветра в рассматриваемом пункте относительно u_{1m} , так и от параметра выброса f . При больших V функция Φ_1 почти не меняется при изменении отношения $\bar{u}_1/u_{1m}$ (изолинии параллельны оси ординат) а при малых коэффициентах вариации V соотношение $\bar{u}_1$ и u_{1m} становится определяющим. Чувствительность Φ_1 к изменению возрастает с увеличением f .

В качестве примера рассмотрим применение номограммы рис. для определения отношения $\bar{q}_m/c_m$ в условиях ст. Воейково (Ленинграда). В этом случае $\lambda=0,04$; $\bar{u}_1=2,38$ м/с; $V^{-1}=2,23$ (с

ис. 1), а $K_m=0,5$. Опасная скорость ветра u_{1m} для источника параметрами $H_0=150$ м, $R_0=4$ м, $w_0=10$ м/с, $\Delta T=100^\circ\text{C}$, согласно [15], равна 3,2 м/с, а параметр f принимает значение 0,36. В случае аналогичного источника с $\Delta T=0$ из [15] следует $u_{1m}=0,43$ м/с. При $u_1/u_{1m}=0,74$ и $V^{-1}=2,23$ из рис. 5 а получаем $b_1=0,7$. Тогда из (27) при круговой розе ветров получим для $\Delta T=100^\circ\text{C}$, $\bar{q}_m/c_m=0,022$, что хорошо согласуется с приведенным выше значением 0,019. Для $\Delta T=0$ $u_1/u_{1m}=5,54$, так что при $V^{-1}=2,23$ из рис. 5 б следует, что $\Phi_1=0,4$. Отсюда $\bar{q}_m/c_m \approx 0,013$, то время, как расчет по формулам (11) и (12) дает $\bar{q}_m/c_m=0,01$.

В случае множественных источников выброса отношение средних и максимально разовых концентраций характеризуется существенной пространственной изменчивостью и зависит не только от перечисленных выше метеорологических факторов, но и от параметров и расположения источников выброса. В приведенном на ис. 4 примере это отношение менялось от 0,039 до 0,169, а отношение $\bar{q}_m/c_m$ составило 0,157. Предельную ситуацию очень большого города с большим числом сравнительно равномерно расположенных одинаковых источников можно исследовать на основе (27). Понятно, что в этом случае зависимость от направления етра должна выпасть, так что

$$\frac{\bar{q}_m}{c_m} = \frac{\sqrt{2\pi}\lambda}{K_m} \Phi_1\left(f, \frac{v_{1m}}{u_1}, V, \frac{1H_0}{\lambda v_{1m}}\right). \quad (29)$$

Отсюда ясно, что отношение максимумов средней и разовой концентрации в большом городе с однородными источниками выброса должно быть в 2π раз больше, чем для такого же одиночного источника при круговой розе ветров. Например, для условий Ленинграда и источников высотой $H_0=150$ м с указанными выше параметрами выброса и $\Delta T=100^\circ\text{C}$, $\bar{q}_m/c_m=0,12$.

В свете того, что соотношение максимальных и разовых концентраций зависит от повторяемости условий рассеяния примеси розы ветров в рассматриваемом пункте, а также от параметров выброса и размещения источников, неоднократно предпринимавшиеся попытки охарактеризовать это отношение одним числом представляются весьма приближенными. Отметим также, что разитая в настоящей работе методика приближенных расчетов ориентировалась прежде всего на учет наиболее часто встречающихся нормальных метеорологических условий. Поэтому при расчетах для пунктов, в которых велика повторяемость приподнятых инверсий, штилевых ситуаций, осадков, туманов, требуется произвести расчеты по полной схеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анапольская Л. Е. Режим скоростей ветра на территории СССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1961. 200 с.
Анапольская Л. Е., Гандин Л. С. Методика определения расчетных скоростей ветра. — Метеорология и гидрология, 1958, № 10, с. 43—51.

3. Артемова Н. Е., Теверовский Е. Н. Принципы нормирования выбросов радиоактивных продуктов из труб предприятий атомной промышленности и энергетики.— Атомная энергия, 1971, вып. 6.
4. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
5. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Особенности турбулентной диффузии и загрязнения воздуха в условиях стратифицированной атмосферы; Международный симпозиум по стратифицированным течениям.— Новосибирск: Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1972. 22 с.
6. Берлянд М. Е. и др. К оценке опасных скоростей ветра для высоких источников/Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Зашихин М. Н., Оникул Р. И.— Труды ГГО, вып. 387, 1977, с. 13—22.
7. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Оникул Р. И. О расчете загрязнения атмосферы выбросами из дымовых труб электростанций.— Труды ГГО, вып. 158, 1964, с. 3—21.
8. Берлянд М. Е., Оникул Р. И. Физические основы расчета рассеивания в атмосфере промышленных выбросов.— Труды ГГО, вып. 234, 1968, с. 3—27.
9. Генихович Е. Л., Чичерин С. С. Двухпараметрическая модель рассеивания примесей от линейного источника при нормальных метеорологических условиях.— См. наст. сборник.
10. Зашихин М. Н., Канчан Я. С., Оникул Р. И. Об унификации расчетов загрязнения атмосферы от многих источников с помощью ЭВМ.— Труды ГГО, вып. 325, 1975, с. 161—173.
11. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1961. 254 с.
12. Руководство по теплобалансовым наблюдениям.— Л.: Гидрометеониздат, 1977. 150 с.
13. Сенеси Д. Метод определения средней концентрации примесей вблизи электростанций при помощи ЭВМ.— В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1971, с. 31—36.
14. Скляр В. М. Ветер в пограничном слое атмосферы над территорией СССР.— М.: Изд. НИИАК, 1968, 478 с.
15. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-74.— М.: Стройиздат, 1975. 42 с.
16. Berlyand M. Ye., Genikhovich Ye. L. Some features of turbulent diffusion and air pollution in the stratified conditions. International Symposium on Stratified Flows, Novosibirsk, 1972.— ASCE, N.—Y., 1973, p. 125—144.
17. Chamberlain A. Aspect of travel and deposition of aerosol and vapour clouds. Atomic Energy Reas. Establish., HR/R 1261, 1953.

М. Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, Р. И. Оникул

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

1. Введение

При исследовании закономерностей атмосферной диффузии одна из наиболее важных задач связана с изучением особенностей распространения примесей от источников в условиях сложного рельефа.

В работах [1, 2, 3, 9] намечен подход к решению этой задачи на основе численного решения уравнения турбулентной диффузии приведены примеры расчета для отдельных форм рельефа.

В настоящее время усилилось внимание к проблеме учета практических целей влияния форм подстилающей поверхности на загрязнение воздуха. Так, например, в работе [12] содержится написанная Б. Иганом специальная глава, посвященная турбулентной диффузии в условиях сложного рельефа. Значительное число докладов, касающихся экспериментального и теоретического исследования особенностей распространения примесей в пересеченной местности, представлено в материалах симпозиума американского метеорологического общества, проходившего в США в 1976 г. [15]. Интересные теоретические работы в этом плане ранее были выполнены Х. Штюмке [14] и М. Хино [10], а в последнее время Дж. Хантом и П. Малхрном [11] и др. В работах [6, 15] приведены материалы экспериментальных исследований естественных условий по данному вопросу, а в [1, 12] обобщаются также результаты применения аэродинамического моделирования для решения рассматриваемой задачи. Вместе с тем выводы значительной части указанных работ носили качественный характер или касались решения отдельных теоретических задач без достаточных практических рекомендаций.

Некоторые первые обобщения результатов проведенных исследований в плане их практического применения были даны

в монографии М. Е. Берлянда [1]. Эти выводы были эффективно использованы В. Ли и А. Стерном [13], которые предложили сравнительно простые практические рекомендации. В ГГО на основе полученных результатов в соответствии с требованиями установленными Госстроем СССР [7], [8] в части расчетов загрязнения воздуха с учетом влияния рельефа, проведена экспертиза нескольких сот проектов промышленных предприятий, тепловых электростанций и других объектов, проектировавшихся советскими организациями для СССР и ряда зарубежных стран (Вьетнама, Кубы, Югославии, Египта, Ирана, Нигерии, Пакистана, Турции, Перу и др.).

Настоящая статья посвящена вопросам дальнейшего развития теории влияния рельефа на рассеивание промышленных выбросов и разработке практических рекомендаций, пригодных для использования в первую очередь при проектировании и размещении промышленных предприятий и комплексов. В ней излагаются методы учета некоторых из перечисленных факторов, основанные на результатах проведенных исследований, а также на обобщении опыта экспертиз промышленных проектов.

2. Турбулентная диффузия в области криволинейной границы

Основным фактором, влияющим на распространение примесей в пересеченной местности, является трансформация воздушного потока. Механические и термические неоднородности подстилающей поверхности приводят к искривлению линий тока, ослаблению скорости ветра в пониженных формах рельефа, развитию местной циркуляции, возникновению орографических волн и роторных течений, усилению ночных инверсий и др. При размещении городов и предприятий в горных котловинах и других пониженных формах рельефа здесь возрастает повторяемость туманов, а в южных районах с интенсивной солнечной радиацией создаются благоприятные условия для развития фотохимических смогов. Таким образом, в пониженных формах рельефа увеличивается интенсивность и повторяемость метеорологических явлений, неблагоприятных для рассеяния примесей, т. е. возрастает «потенциал загрязнения воздуха», являющийся комплексной характеристикой возможного загрязнения (в особенности, потенциал для низких источников). В местности со сложным рельефом изменяется также повторяемость различных направлений ветра (роза ветров), играющая особую важную роль при определении концентрации осредненных за длительный период времени.

Закономерности распространения примесей определяют структуру воздушных течений, которая в свою очередь зависит от свойств набегающего потока и подстилающей поверхности. Применительно к решению задачи рассеивания промышленных выбросов в пересеченной местности общая система уравнений г

отермодинамики может быть упрощена для случая не очень рутых препятствий, однородных в направлении, перпендикулярном набегающему потоку, и ограниченных по протяженности двумерных холмов, впадин и уступов). Для таких препятствий возмущения воздушного потока сосредоточены в турбулентном пограничном слое, вертикальная протяженность которого меньше горизонтальной. Для расчета характеристик воздушных течений рассматриваемом случае будем использовать систему уравнений в потоковых переменных Буссинеска [1, 2]. При этом от декартовых координат (x, z) , где ось x ориентирована по направлению ветра в набегающем потоке, а ось z направлена вертикально, перейдем к потоковым переменным — потенциалу скоростей Φ и функции тока ψ потенциального течения в рассматриваемой области. Введем также следующие обозначения: u_n и w_n — компоненты скорости потенциального течения, связанные с Φ и ψ соотношениями

$$u_n = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w_n = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\partial \psi}{\partial x};$$

$= (u_n^2 + w_n^2)^{1/2}$ — модуль скорости потенциального течения; V_∞ — значение V при $x^2 + z^2 \rightarrow \infty$; K — коэффициент турбулентного обмена; B — энергия турбулентности (величины u_1 , b , k в набегающем потоке обозначаются $\dot{u}_1$, $\dot{B}$, $\dot{K}$). Тогда в переменных ξ_1, ξ_3 $= \frac{\Phi}{V_\infty L'}$, $\xi_3 = \frac{\psi}{V_\infty L'}$ (L' — характерный масштаб неровностей)

можно записать систему, включающую уравнения: движения

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} = \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} + (1 - u_1^2) \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial \xi_1} + \\ + \frac{1}{V} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \int_{\xi_3}^{\infty} (1 - u_1^2) V \frac{\partial V}{\partial \xi_3} d\xi_3 - \frac{V_\infty^3}{V^3} \frac{d}{d\xi_3} k \frac{d\dot{u}_1}{d\xi_3}; \quad (1)$$

баланса энергии турбулентности

$$u_1 \frac{\partial b}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial b}{\partial \xi_3} = \alpha \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial b}{\partial \xi_3} + c^{1/2} k \frac{V^2}{V_\infty^2} \times \\ \times \left\{ \left(\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} \right)^2 + \frac{4}{V} \frac{\partial V}{\partial \xi_3} u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} - \frac{V_\infty^4}{V^4} \frac{b^2}{k^2} \right\}; \quad (2)$$

разрывности

$$\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1} + \frac{\partial u_3}{\partial \xi_3} = 0; \quad (3)$$

для определения коэффициента турбулентности

$$\frac{\partial k}{\partial \xi_3} - \frac{k}{b} \frac{\partial b}{\partial \xi_3} = \kappa b^{1/2} \frac{V_\infty}{V}. \quad (4)$$

Здесь

$$k = \frac{K}{V_{\infty} L}; \quad \dot{k} = \frac{\dot{K}}{V_{\infty} L}; \quad b = \frac{B}{c^{-1/2} V_{\infty}^2};$$

α , c , κ — константы, которые соответственно принимаются равными 0,73, 0,046, 0,4.

Компоненты безразмерной скорости u_1 и u_3 в направлениях ξ_3 связаны с составляющими скорости воздушного потока u и w вдоль осей x и z соотношениями:

$$u = u_{\Pi} u_1 - w_{\Pi} u_3; \quad w = w_{\Pi} u_1 + u_{\Pi} u_3. \quad (1)$$

Система (1) — (4) дополняется начальными и граничными условиями:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } \xi_1 \rightarrow -\infty \quad u_1 = \dot{u}_1(\xi_3), \quad b = \dot{b}(\xi_3); \\ \text{при } \xi_3 = 0 \quad u_1 = u_3 = 0, \quad b = \left(\kappa \xi_{00} \frac{V}{V_{\infty}} \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3} \right)^2, \quad k = \kappa^2 \xi_{00}^2 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3}; \\ \text{при } \xi_3 \rightarrow \infty \quad u_1 \rightarrow 1, \quad b \rightarrow 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь ξ_{00} — потоковая шероховатость подстилающей поверхности.

Характеристики набегающего потока определяются следующими соотношениями:

$$\text{при } 0 \leq \xi_3 < \bar{h} \quad \dot{u}_1 = \frac{v_*}{\kappa} \ln \frac{\xi_3 + \xi_{00}}{\xi_{00}}, \quad \dot{b} = v_*^2,$$

$$\dot{k} = \kappa v_* (\xi_3 + \xi_{00});$$

$$\text{при } \bar{h} \leq \xi_3 \quad \dot{u}_1 = 1, \quad \dot{b} = v_*^2 \tilde{\zeta}^{-\frac{2}{r-1}},$$

$$\dot{k} = \kappa v_* (\bar{h} + \xi_{00}) \tilde{\zeta}^{\frac{r-2}{r-1}}.$$

Здесь

$$\tilde{\zeta} = 1 + r(r-1) \frac{\xi_3 - \bar{h}}{\bar{h} + \xi_{00}}; \quad v_* = \kappa \left(\ln \frac{\bar{h} + \xi_{00}}{\xi_{00}} \right)^{-1};$$

$$r = \left(\frac{6 \kappa^2 \alpha}{V c} \right)^{1/2} \simeq 1,8; \quad \bar{h} = \frac{h_0}{L'},$$

где h_0 — высота приземного слоя.

При этом профиль скорости ветра $\dot{u}_1$ принимается заданным, а функции $\dot{b}$ и $\dot{k}$ находятся как не зависящие от ξ_1 решения системы (1) — (4).

В уравнении движения (1), кроме обычных членов, характерных для уравнения пограничного слоя, сохранено слагаемое $-\frac{V_{\infty}^3}{V^3} \frac{d}{d\xi_3} \dot{k} \frac{d\dot{u}_1}{d\xi_3}$, что эквивалентно учету действия силы Кориолиса.

обеспечивающей отсутствие трансформации набегающего потока в случае плоской подстилающей поверхности (когда $V=V_\infty$). За счет искривления линий тока появляется дополнительное слабое $\frac{4}{V} \frac{\partial V}{\partial \xi_3} u_1 \frac{\partial u_1}{\partial \xi_3}$ в уравнении баланса энергии, описывающее генерацию турбулентности над вогнутыми участками границы, радиус кривизны которых $R>0$, и откачку энергии над выпуклыми участками, где $R<0$ (можно показать, что $\frac{\partial V}{\partial \xi_3} \sim \frac{1}{R}$).

Численное решение уравнения (1)–(4) с граничными условиями (6) осуществлялось на ЭВМ М-220 с помощью стандартной программы решения системы уравнений параболического типа.

Для использования полученных результатов при изучении закономерностей рассеивания примесей в пересеченной местности уравнение турбулентной диффузии примеси также записывается в потоковых переменных Буссинеска:

$$u_1 \frac{\partial q}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial q}{\partial \xi_3} = \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial q}{\partial \xi_3} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{V_\infty L' K_y}{V^2} \frac{\partial q}{\partial y}, \quad (8)$$

и краевые условия принимаются в виде

$$q|_{\xi_1=\xi_1^H} = \frac{M}{V_\infty L' u_1} \delta(y) \delta(\xi_3 - \xi_3^H),$$

$$k \left. \frac{\partial q}{\partial \xi_3} \right|_{\xi_3=0} = 0, \quad q|_{|y| \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad q|_{\xi_3 \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (9)$$

Здесь ось y ориентирована в поперечном ветру направлении, ξ_1^H , ξ_3^H — потоковые координаты источника, M — его мощность.

По аналогии с [1] можно принять, что

$$K_y = \frac{V^2 u_1(\xi_1, \xi_3)}{V_\infty L'} k_0(\xi_1). \quad (10)$$

Тогда

$$q = \frac{e^{-y^2/2S^2}}{S\sqrt{2\pi}} q'(\xi_1, \xi_3), \quad (11)$$

где

$$S^2 = 2 \int_{\xi_1^H}^{\xi_1} k_0(\xi) d\xi, \quad (12)$$

а q' удовлетворяет уравнению диффузии от линейного источника

$$u_1 \frac{\partial q'}{\partial \xi_1} + u_3 \frac{\partial q'}{\partial \xi_3} = \frac{\partial}{\partial \xi_3} k \frac{\partial q'}{\partial \xi_3} \quad (13)$$

с краевыми условиями

$$q'|_{\xi_1=\xi_1^H} = \frac{M}{u_1} \delta(\xi_3 - \xi_3^H), \quad k \left. \frac{\partial q'}{\partial \xi_3} \right|_{\xi_3=0} = 0, \quad q'|_{\xi_3 \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (14)$$

Уравнение (13) решалось численно методом сеток на ЭВМ М-220. При этом его коэффициенты определялись из решения (1) — (4). В процессе расчетов варьировалась геометрия обтекаемого холма и расположение относительно него источника. На рис. 1 показано, как изменяется для отдельного холма в зависимости от значения потоковой координаты ξ_1^H отношение максимальной наземной концентрации q_m к максимальной наземной концентрации q_m^∞ от источника на плоской подстилающей поверхности. Изменение ξ_1^H соответствует перемещению источника относительно холма по фиксированной линии тока $\xi_3 = \xi_3^H$. Расчеты выполнены для случаев, когда вдали от холма эта линия тока удаляется от подстилающей поверхности на 0,1, 0,25 и 0,5 высоты холма h .

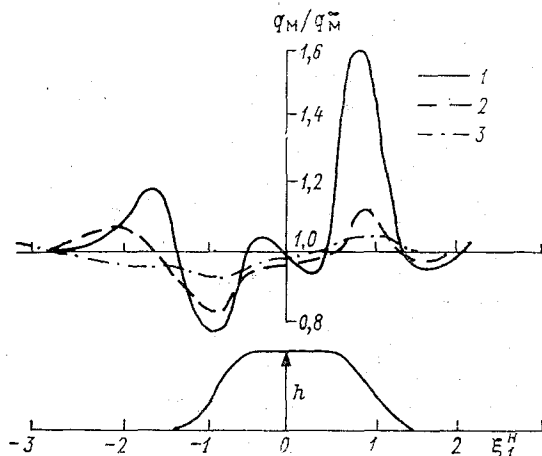


Рис. 1. Изменение отношения q_m/q_m^∞ при перемещении источника относительно холма вдоль линий тока.

1) $H/h=0,1$, 2) $H/h=0,2$, 3) $H/h=0,5$.

Как видно из рисунка, для источников, высота которых превосходит половину высоты препятствия, зависимость q_m от расположения источника относительно холма слабая. Иными словами значения q_m , полученные из (8) с использованием сложной зависимости u_1, u_3, k как функций от ξ_1 и ξ_3 , совпадают со значениями q_m , полученными из (8) по данным о начальном потоке (7). Вывод о совпадении максимальных наземных концентраций для источников, расположенных на одной и той же линии тока, можно сделать также, если в (13) подставить любые модели для коэффициентов, не зависящие от ξ_1 , в частности положить $u_1 \equiv 1$, $u_3 = 0$. Как следует из (5), при этом u и w будут совпадать с компонентами скорости потенциального течения u_Π и w_Π .

Сделанные выводы являются основанием для того, чтобы в случае достаточно высоких источников вместо общей модели, учетом турбулентности использовать более простой метод потенциальных течений, связанный с подстановкой в уравнение диффузии компонент скорости потенциального потока u_n и w_n . При этом, хотя значения максимальных наземных концентраций могут существенно отличаться от найденных по полной модели, поскольку вместо функции $u_1 = u_1(\xi_3)$ из (7) в уравнение (13) подставляется $u_1 = 1$, для не очень низких источников зависимость отношения q_m/q_m^∞ от ξ_3^H определяется достаточно точно.

Из рис. 1 видно, что для источников, высота которых сравнительно мала, учет турбулентности является существенным. Так, если H на порядок меньше высоты холма, то учет генерации турбулентности приводит к возрастанию q_m в 1,6 раза по сравнению с значением, полученным из решения (5) с коэффициентами (4).

3. Метод потенциальных течений

Изучение потенциальных течений жидкости сводится к построению конформного отображения физической области течения на полуплоскость. При этом требуется найти аналитическую функцию $\tau(t) = \varphi(x, z) + i\psi(x, z)$ или обратную ей функцию $t(\tau)$, где $t = x + iz$ — комплексное число, соответствующее точке физической области (x, z) , а τ пробегает верхнюю полуплоскость ($\text{Im} \tau > 0$). В ряде случаев для этих функций удастся использовать простые аналитические выражения, приведенные, например, в [3, 4]. Так, для холма, форма которого схематически изображена на рис. 1,

$$t = \tau + \frac{h}{\pi} \left\{ \ln \frac{d - \zeta}{d + \zeta} + p(\zeta) \ln \frac{1 + d - \zeta}{d - \zeta} - p(-\zeta) \ln \frac{1 + d - \zeta}{d + \zeta} + 24 \gamma \zeta^3 + (6 \gamma^3 - 9 \gamma) \zeta \right\}, \quad (15)$$

где

$$p(\zeta) = 1 + 10(d - \zeta)^3 + 15(d - \zeta)^4 + 6(d - \zeta)^5,$$

$$\zeta = \frac{\tau}{\sigma}, \quad d = \frac{D}{\sigma}, \quad \gamma = 2d - 1.$$

здесь h — высота холма, D — потоковая полуширина верхнего плато, σ — протяженность бокового склона.

Для областей с произвольной границей конформное отображение получается численно. С вычислительной точки зрения удобнее строить конформное отображение полуплоскости на физическую область течения. При этом задача сводится к численному решению в прямоугольнике уравнения Лапласа $\frac{\partial^2 z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial \psi^2} = 0$ для функции $z(\varphi, \psi)$. Такой подход полезен при теоретическом анализе зависимости характеристик течения и поля концентрации от

геометрии подстилающей поверхности. Однако при решении практических задач необходимо рассчитывать загрязнение воздуха для конкретных фиксированных областей. В этих случаях целесообразно определять функцию тока ψ из решения уравнения Лапласа $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0$ в области с криволинейной границей. Более подробно методика численного решения указанных уравнений описана в [5].

По полю линий тока потенциального течения можно определить поправочный множитель к высоте трубы ρ , представляющий собой отношение высот источников H и H_0 , имеющих одинаковую мощность выброса и дающих одинаковую максимальную наземную концентрацию, причем один из них (H) расположен в пересеченной местности, а другой (H_0) — на плоской подстилающей поверхности. Величина ρ показывает, во сколько раз надо изменить высоту источника H_0 , чтобы скомпенсировать влияние рельефа местности. С практической точки зрения наибольший интерес представляет максимальное значение поправочного множителя ρ_m для данного рельефа.

4. Анализ результатов расчета

По методу потенциальных течений были проведены расчет поправочного множителя ρ_m для препятствий различной геометрии (рис. 2). При этом варьировались высота (глубина) препятствия h , протяженность его основания a и высота источника H , число препятствий и расстояние между ними. Анализ результатов показал, что наиболее сильно значение ρ_m зависит от среднего уклона подстилающей поверхности $n = 2h/a$ и параметра H_0/h , где H_0 — высота источника, выбранная для условий плоской подстилающей поверхности в соответствии с [8]. При фиксированных H_0/h и n величина ρ_m зависит от конкретных особенностей формы обтекаемого препятствия, причем эта зависимость ослабляется с ростом H_0/h и с уменьшением n .

В работе [5] оценен диапазон изменения переменных H_0/h и n , в котором влияние конкретных особенностей формы рассматриваемых препятствий на ρ_m сравнительно мало. При таких значениях параметров ρ_m определяется только H_0/h и n . Изолинии функции $\rho_m(H_0/h, n)$ приведены на рис. 2.

На рис. 2 штриховыми кривыми выделены области I и II, в которых ρ_m в зависимости от геометрии препятствия варьируется меньше или больше, чем на 25%. Рисунок 2 можно использовать как номограмму при определении высоты источника, обеспечивающего в пересеченной местности выполнение санитарных норм. В области II значение ρ_m существенно зависит как от конкретных особенностей подстилающей поверхности, так и от генерации турбулентных вихрей на препятствии. Поэтому при сочетании параметров a и H_0/h , соответствующем этой области, н

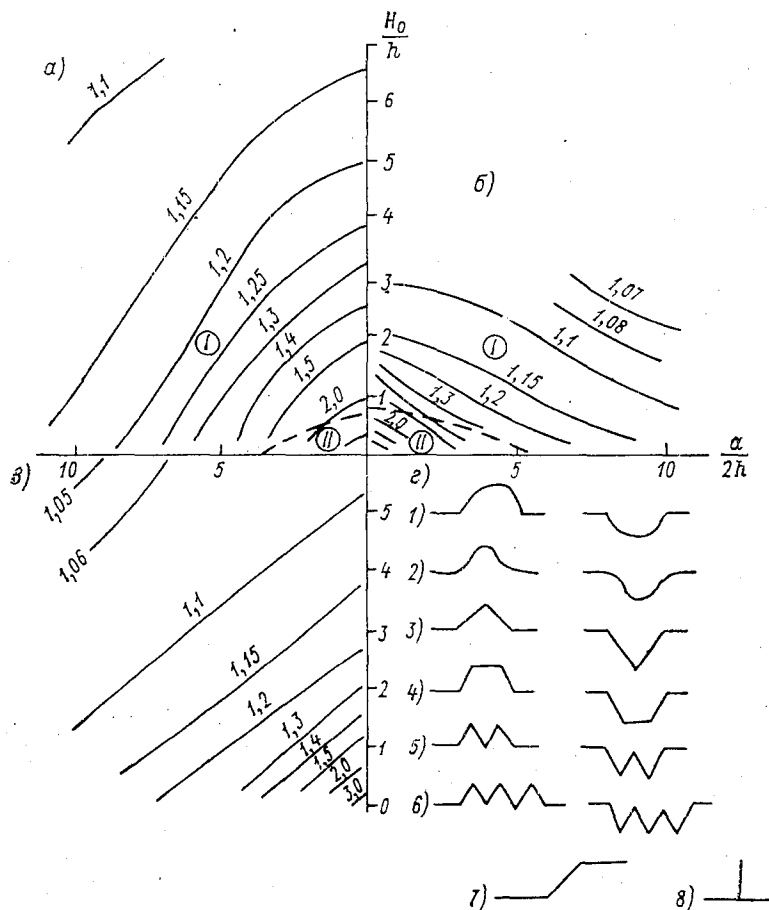


Рис. 2. Изолинии максимального поправочного множителя ρ_m для впадины (а), холма (б) и уступа (в), построенные в результате систематизации расчетов для различных форм подстилающей поверхности (г).

мограмму можно применять только для приближенной оценки. В случае когда рис. 2 используется для расчета вблизи уступа, в качестве a надо брать удвоенную протяженность бокового склона.

Модификация метода потенциальных течений, связанная с использованием аппроксимаций (7) и (10) для коэффициентов уравнения диффузии (8), для расчета наземного распределения концентрации в пересеченной местности позволяет воспользоваться полученными в предшествующих исследованиях авторов соотношениями, относящимися к рассеянию примесей над горизонтально-однородной подстилающей поверхностью. Формальный

переход к случаю неоднородной подстилающей поверхности сводится при этом к замене координат (x, z) и высоты источника H на потоковые переменные (φ, ψ) и потоковые координаты источника (φ_H, ψ_H) . Действительно, такая замена переводит криволинейную сетку линий тока и линий равного потенциала в плоскости (x, z) в прямоугольную сетку (φ, ψ) , т. е. позволяет перейти к задаче о рассеянии примесей в условиях однородной местности.

Воспользуемся для этой цели приведенными в [1] аппроксимационными формулами, полученными при численном решении этой задачи, переписав эти формулы в потоковых координатах:

$$q_m = 0,3 \frac{MK}{v_1} \left(\frac{V_\infty}{\psi_H} \right)^{2,3},$$

$$\varphi_m = 0,4 \frac{v_1}{k_1} \left(\frac{\psi_H}{V_\infty} \right)^{1,2}; \quad (16)$$

$$\frac{q}{q_m} = \begin{cases} 3r_1^4 - 8r_1^3 + 6r_1^2 & \text{при } r_1 \leq 1 \\ \frac{1,13}{0,13r_1^3 + 1} & \text{при } 1 < r_1 \leq 8 \\ \frac{r_1}{3,58r_1^2 - 35,2r_1 + 120} & \text{при } r_1 > 8 \end{cases} \quad (17)$$

где $r_1 = (\varphi - \varphi_H)/\varphi_m$, а параметр K характеризует соотношение коэффициентов вертикального и горизонтального турбулентного обмена при неблагоприятных условиях рассеяния (в формуле (16) используются размерные константы).

Если функции $\varphi(x, z)$ и $\psi(x, z)$ известны, то для источника высотой H , расположенного в точке x_0 , потоковые координаты вычисляются из соотношений $\varphi_H = \varphi(x_0, H + h(x_0))$; $\psi_H = \psi(x_0, H + h(x_0))$, где $z = h(x)$ — уравнение границы. Поправочные множители χ и η к величинам q_m и x_m , определенным для плоской подстилающей поверхности [1], находятся из соотношений

$$\chi = \left(\frac{H V_\infty}{\psi_H} \right)^{2,3},$$

$$\eta = \frac{x(\varphi_H + \varphi_m, 0) - x_0}{x_m}. \quad (18)$$

Изложенный алгоритм был реализован в виде программы на ЭВМ БЭСМ-6. При расчетах варьировалась форма подстилающей поверхности, высоты и уклоны препятствий, высота источника выбросов и его положение на рельефе. Анализ результатов показал, что максимальное значение χ_m и минимальное значение $\eta_{\min}$ зависят в основном от двух параметров, $\frac{H}{h}$ и n .

Номограммы для определения максимального значения χ_m и минимального значения $\eta_{\min}$ приведены на рис. 3. Эти экстре

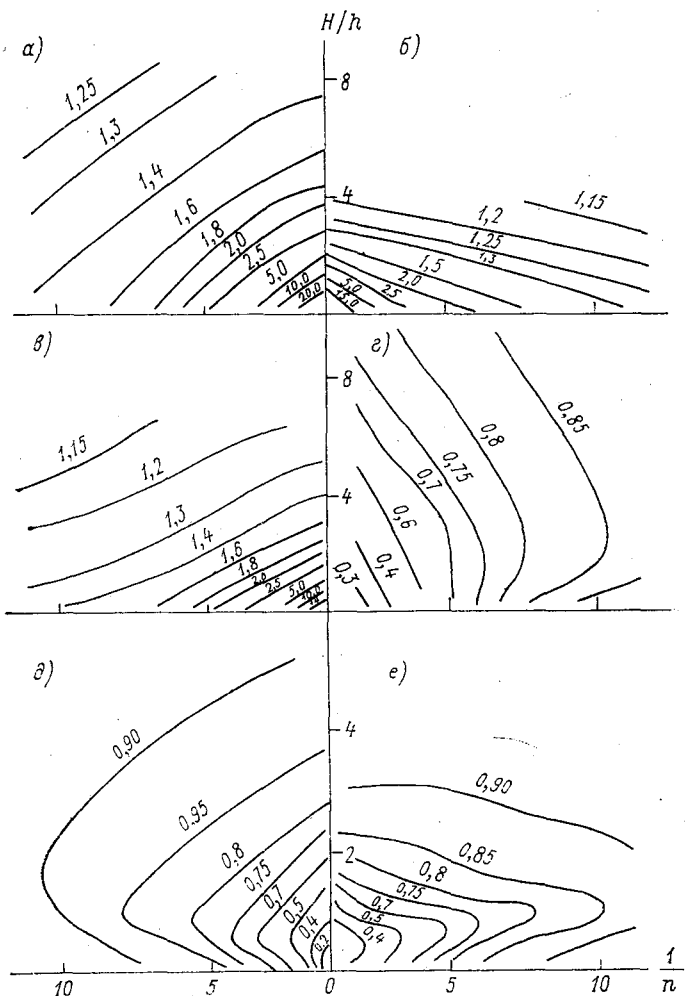


Рис. 3. Изолинии поправочных множителей χ_m и $\eta_{\min}$ для впадины (а и в), холма (б и г) и уступа (д и е).

мальные значения соответствуют размещению источника в наиболее неблагоприятной точке рельефа (у подножия холма, на дне впадины и т. п.). При произвольном расположении источника на рельефе для нахождения χ и η можно воспользоваться приближенными формулами, полученными в результате систематизации данных расчетов [5]:

$$\chi = 1 + f_1\left(\frac{2x_0}{a}\right)(\chi_m - 1),$$

$$\eta = 1 + f_2\left(\frac{2x_0}{a}\right)(\eta_{\min} - 1), \quad (19)$$

где x_0 — координата источника относительно препятствия.

Функции f_1 , f_2 для холмов, впадин и уступов приведены на рис. 4. Погрешность определения поправочных множителей по (20) не превосходит 15–20%.

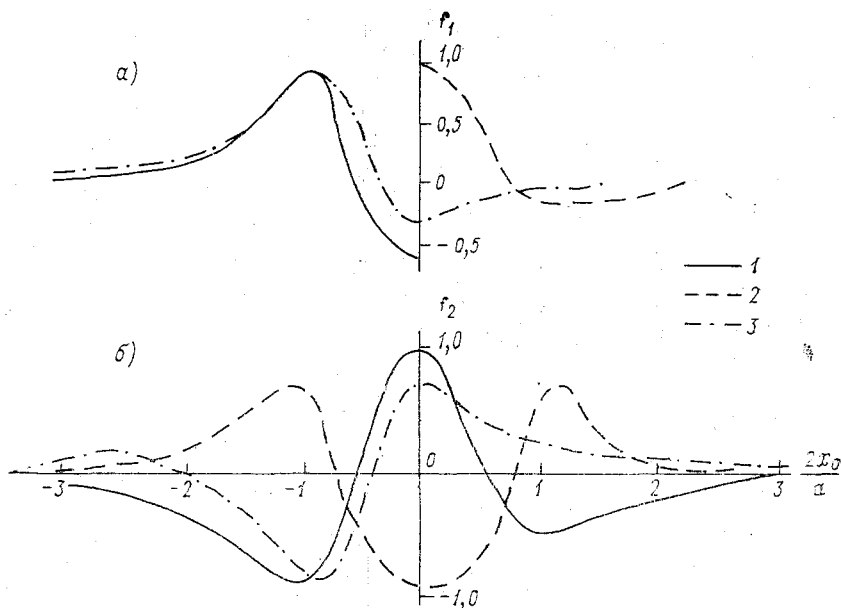


Рис. 4. Функции f_1 (а) и f_2 (б) для холма (1), впадины (2) и уступа (3).

Зависимость q/q_m от x/x_m определяется в результате подстановки в (17) выражения для $\varphi(x, z)$. При этом оказывается, что в широком диапазоне значений параметров $\frac{H}{h}$, n и x_0 эта зависимость практически совпадает с приведенной в [8] (табл. 1).

Таблица

Распределение наземных концентраций в пересеченной местности												
x/x_m	0,25	0,50	0,75	1	2	3	5	10	15	20	30	50
q/q_m	0,26	0,69	0,95	1,00	0,74	0,52	0,27	0,08	0,04	0,02	0,013	0,006

Только при одновременном выполнении неравенств $n > 0,5$, $\frac{H}{h} < 0,5$, $-\frac{a}{2} < x_0 < -\frac{a}{4}$ для холма и $n > 0,5$, $\frac{H}{h} < 0,25$, $-\frac{a}{4} \leq x_0 \leq$ для впадин отмечаются некоторые различия.

5. Учет начального подъема при расчете рассеивания примесей в пересеченной местности

Приведенные результаты получены для источников фиксированной высоты H . При исследовании распространения примесей в реальных источниках необходимо дополнительно учесть начальный подъем выбросов ΔH , зависящий от скорости w_0 и перегрева T дымовых газов относительно окружающего воздуха. Для определения ΔH воспользуемся приведенным в [1] соотношением

$$\Delta H = \frac{1,5w_0R_0}{u_\phi} \left(2,5 + \frac{3,3g}{T} \frac{R_0 \Delta T}{u_\phi^2} \right), \quad (20)$$

где R_0 и H — радиус устья и высота дымовой трубы, u_ϕ — скорость ветра на уровне флюгера, g/T — параметр плавучести. Целесообразно в этой формуле перейти от u_ϕ к скорости ветра на высоте источника u_H , воспользовавшись соотношением

$$u_H = u_\phi \frac{\ln H/z_0}{\ln z_\phi/z_0}.$$

Для расчета максимальной приземной концентрации q_m в пересеченной местности аналогично [1] и [4] воспользуемся соотношением (16), в которое вместо ψ_H подставим значение $\psi_{H+\Delta H}$ функции тока, соответствующее эффективной высоте источника $H+\Delta H$. Анализ показывает, что для рассматриваемых случаев, когда подъем ΔH меньше протяженности препятствия, в разложении $\psi_{H+\Delta H}$ в ряде Тейлора можно ограничиться первыми членами

$$\psi_{H+\Delta H} \approx \psi_H + \frac{\partial \psi}{\partial H} \Delta H. \quad (21)$$

учетом (18) и (21) из (16) следует

$$q_m = \frac{CM \ln H/z_0}{H^\beta \ln z_1/z_0} \chi \left(1 - \frac{\ln \chi}{\beta \ln H/z_0} \right) \frac{K}{u_H (1 + \Gamma \Delta H/H)^\beta}, \quad (22)$$

е

$$\Gamma = 1 - \frac{H}{\beta \chi} \frac{\partial \chi}{\partial H},$$

$= 2,3$, C — константа.

Таким образом, последний множитель в (22), описывающий зависимость q_m от скорости ветра u_H , для источника, расположенного в пересеченной местности, совпадает с аналогичным выражением для случая плоской подстилающей поверхности [8], где скорость выбрасываемых из трубы дымовых газов w_0 заменить на «эффективную» скорость выброса $\tilde{w}_0$, определяемую из отношения

$$\tilde{w}_0 = \Gamma w_0. \quad (23)$$

Для характеристики условий выброса примеси из рассматриваемого источника аналогично [8] введем параметры v_{HM} и f :

$$v_{HM} = 2,7 \left(\frac{g}{T} \Delta T \frac{\pi R_0^2 \tilde{\omega}_0}{H} \right)^{1/3}, \quad f = 67 \frac{\tilde{\omega}_0^2 R_0}{H^2 g / T \Delta T}. \quad (2)$$

Очевидно, что v_{HM} и f отличаются от соответствующих характеристик для плоской поверхности множителями $\Gamma^{1/3}$ и Γ^2 . Через переменные (24) выражаются опасная скорость ветра u_{HM} и соответствующее ей значение максимальной приземной концентрации в рельефе c_m , причем из (22) следует

$$c_m = \chi \left(1 - \frac{\ln \chi}{\beta \ln H/z_0} \right) \tilde{c}_{0M}, \quad (2)$$

где $\tilde{c}_{0M}$ — рассчитанная по (8) максимальная приземная концентрация для источника с вертикальной скоростью $\tilde{\omega}_0$ (23), расположенного на плоской подстилающей поверхности.

От скорости u_{HM} , соответствующей местоположению источника, удобно перейти к скорости набегающего потока $\tilde{u}_{HM}$, при которой достигается вблизи источника значение u_{HM} . Можно показать, что

$$\tilde{u}_{HM} = \frac{u_{HM}}{1 - \ln \chi / \beta \ln H/z_0}. \quad (2)$$

Как следует из (22), зависимость отношения максимальной приземной концентрации c_{mi} , соответствующей скорости набегающего потока u_H , к c_m аналогично случаю плоской подстилающей поверхности определяется величиной u_H/u_{HM} . При практических расчетах вместо u_H/u_{HM} можно использовать отношение u/u_m скоростей, соответствующих высоте флюгера z_f , а величину c_{mi}/c_m определять по [8].

Величина x_m с учетом начального подъема рассчитывается по формуле $x_H = \eta x_m$, где x_m — расстояние до точки максимума приземной концентрации $\tilde{c}_{0M}$, рассчитанное по [8] с использованием вместо ω_0 эффективной вертикальной скорости $\tilde{\omega}_0$, определяемой (23). Зависимость x_{mi}/x_m от u/u_m аналогична приведенной в [8].

6. Практические рекомендации

При выборе расположения источников на местности удобно пользоваться понятием зоны неблагоприятного влияния препятствия (области пространства, при попадании эффективной высоты источника в которую поправочный множитель $\chi \geq 1,1$). Для конкретных значений параметров препятствий на рис. 5 показаны зоны неблагоприятного влияния (1) холма, впадины и уступ, максимальная ширина которых L . Расчеты показали, что зона, где $\chi \geq 1,1$, перекрывает зону, где $\eta \leq 0,9$.

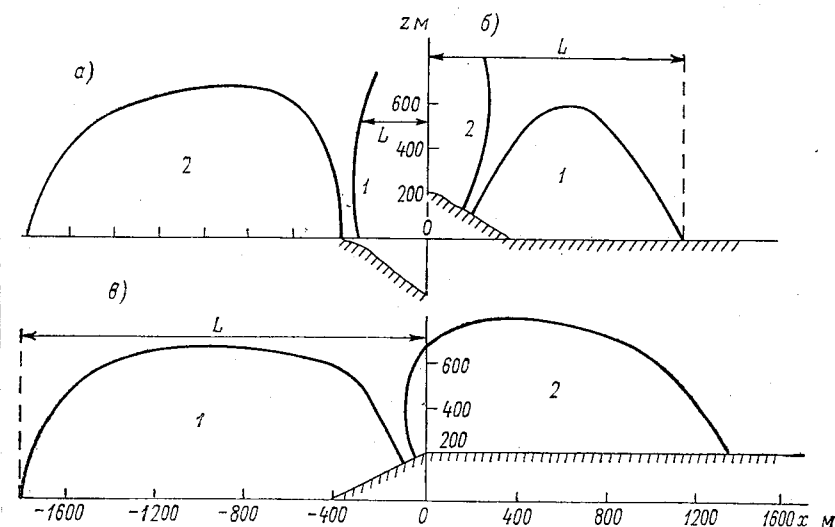


Рис. 5. Зоны влияния впадины (а), холма (б) и уступа (в).

Из многочисленных расчетов при различных значениях параметров рассматриваемых форм рельефа и разном положении точника, а также при изменении эффективной высоты источника пределах 10—300 м следует, что ширина L слабо зависит от вы-
 ы источника H . Для определения L можно использовать аппроксимационное соотношение

$$L = a \cdot \varphi\left(\frac{1}{n}\right). \quad (27)$$

значения функции φ при разных n для холма, впадины и уступа представлены в табл. 2.

При одинаковых a и n ширина зоны влияния уступа является наибольшей, а наименьшее L отмечается у впадины.

Наряду с зоной неблагоприятного влияния целесообразно ввести в рассмотрение зону благоприятного влияния препятствия,

Таблица 2

Значения функции $\varphi\left(\frac{1}{n}\right)$

Препятствие	1/n						
	1	2	3	4	6	8	10
холм	2,1	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6	0,6
впадина	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6
ступ	4,3	2,3	1,6	1,3	0,9	0,8	0,7

где $\chi \leq 0,9$. На рис. 5 показаны также зоны благоприятного влияния (2), прилегающие к повышенным участкам местности. З пределами обеих указанных зон влиянием препятствия на диффузию можно пренебречь.

С использованием численного конформного отображения были проведены проработки для случая более сложного рельефа с большим числом одинаковых препятствий (см. рис. 2 г, типы подстилающей поверхности 5 и 6). Эти расчеты позволили сделать вывод о том, что на максимальную концентрацию наибольшее влияние оказывают основные близлежащие препятствия. Так, если с двух сторон от источника расположено много холмов, то максимальная расчетная концентрация практически такая же, как в случае одиночной впадины.

В заключение отметим, что полученные формулы и рекомендации целесообразно применять также в условиях более сложного рельефа. При этом можно независимо рассматривать влияние отдельных элементарных форм рельефа, выделяющихся на пределах средних высот местности в полосе, ось которой проходит через источник и ориентирована вдоль ветра. Ширину этой полосы рекомендуется приближенно принимать равной нескольким высотам источников. При этом поле концентрации от многих источников, как и в случае сравнительно ровной местности, находится путем суперпозиции полей от одиночных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. с. 448 с.
2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Атмосферная диффузия и структура воздушного потока над неоднородной подстилающей поверхностью. В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1971, с. 49—69.
3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Куренбин О. И. Влияние рельефа на распространение примесей от источника. — Труды ГГО, 1968, вып. 2: с. 28—44.
4. Берлянд М. Е., Киселев В. Б. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема. — Метеорология и гидрология № 3, 1972, с. 3—10.
5. Грачева И. Г. К разработке методики расчета рассеивания примесей в условиях сложного рельефа. — См. наст. сборник.
6. Исследования по метеорологическим аспектам загрязнения атмосферы (итог сотрудничества социалистических стран). — Труды ГГО, 1976, вып. 3: с. 156.
7. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-67/ Под ред. М. Е. Берлянда и А. М. Кошкина. — Л.: Гидрометеиздат, 1968, 98 с.
8. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-74/ Под ред. М. Е. Берлянда, А. М. Кошкина, Р. И. Оникула. — М.: Стройиздат, 1975. 45 с.
9. Berlyand M. E., Kurenbin O. I., Zrazevsky I. M. Theory of trace gas distribution near the Ground. — J. Geoph. Res., 1970, vol. 75, N 18, p. 10.
10. Hino M. Computer experiment on smoke diffusion over a complicated topography. — Atm. Environ, 1968, N 6, p. 541—559.

- . Hunt J. C. R., Muthearn P. J. Turbulent dispersion from sources near two-dimensional obstacles.—J. Fluid Mech., 1973, vol. 61, p. 245—274.
- . Lectures on air pollution and environmental impact analyses. 29 Sept—3 Oct. 1975. Boston, AMS, p. 295.
- . Lee W. L., Stern A. C. The height requirement implicit in the federal standards of performance for men stationary sources.—JAPCA, vol. 23, N 6, p. 505—513.
- . Stümke H. Berücksichtigung vereinfachter Geländetypen bei der Berechnung der turbulenten Ausbreitung vor Schornsteingasen.—Staub, 1964, Bd. 24, S. 175—182.
- . Third symposium on atmospheric turbulence, diffusion and air quality. Oct. 19—22, 1976, Raleigh N. C., AMS, p. 596.

К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАССЕИВАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА

В работах [1] и [2] дан теоретический анализ задачи о рассеивании примесей в пересеченной местности. В них обоснована возможность применения метода потенциальных течений для исследования закономерностей распространения примесей в условиях сложного рельефа. Так как в большинстве выполненных исследований представляли интерес относительные изменения рассматриваемых характеристик, то при их нахождении можно было ограничиться анализом линий тока потенциального течения [1]. Для этого требуется построить конформное отображение физической области на полуплоскость, т. е. найти аналитическую функцию

$$\tau(t) = \varphi(x, z) + i\psi(x, z), \quad (1)$$

где $t = x + iz$ — комплексное число, соответствующее точке в физической области (x, z) , а τ — комплексное число, соответствующее точке на полуплоскости (φ, ψ) , $\varphi(x, z)$ — потенциал скоростей, $\psi(x, z)$ — функция тока. Такую же полную информацию о потенциальном течении дает и обратная функция $t(\tau)$, осуществляющая отображение полуплоскости на физическую область течения. Целью настоящей статьи является систематизация результатов расчетов, полученных при решении задачи о рассеивании примесей в условиях рельефа методом потенциальных течений.

Для исследования влияния различных форм рельефа использовались три аналитические функции:

$$t(\tau) = \sqrt{\tau^2 - h^2}, \quad (2)$$

$$t(\tau) = \frac{a}{1 - \left[1 - a\lambda \left(\tau + \frac{a\lambda}{2}\right)\right]^{1/\lambda}} - \frac{a}{2}, \quad (3)$$

$$t(\tau) = \frac{1}{2} \left[\frac{2\tau}{1+m} + m \sqrt{\frac{4\tau^2}{(1+m)^2} - \frac{a^2}{4}} + \right]$$

$$+ \frac{a^2}{4} \left(\frac{2\tau}{1+m} + m \sqrt{\frac{4\tau^2}{(1+m)^2} - \frac{a^2}{4}} \right)^{-1} \Big]. \quad (4)$$

десь a — протяженность препятствия; h — его высота; $\lambda = \frac{\pi}{\pi - \alpha}$, де α — угол, образованный боковым склоном с горизонтальной плоскостью, который связан с h и a соотношением

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{2h}{a};$$

$$m = \frac{2h}{a} + \sqrt{\frac{4h^2}{a^2} + 1}.$$

Формула (2) задает отображение полуплоскости на внешность стенки» высотой h (предельный случай бесконечно узкого холма), формула (3) — на внешность сегмента круга и формула 4) — на внешность холма (ложбины), форма которого показана а рис. 1 а. Для препятствий более сложной геометрической формы (см. рис. 1 в) конформное отображение строилось численно. [ри этом принималось во внимание, что вещественная и мнимая асти функции, осуществляющей конформное отображение, являются гармоническими, т. е. удовлетворяют уравнению Лапласа. ля построения отображения верхней полуплоскости на физическую область, функция $z(\varphi, \psi)$ находилась из уравнения

$$\Delta z = 0 \quad (5)$$

полуплоскости с граничными условиями:

$$z|_{\psi=0} = f(\varphi), \quad z|_{\varphi, \psi \rightarrow \infty} = \psi.$$

десь $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \psi^2}$ — оператор Лапласа, $z = f(\varphi)$ — уравнение рдстилающей поверхности. Функции x и z являются сопряженными гармоническими, т. е. для них выполняются соотношения оши — Римана [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \varphi} &= \frac{\partial z}{\partial \psi}, \\ \frac{\partial x}{\partial \psi} &= -\frac{\partial z}{\partial \varphi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Алгоритм решения задачи был реализован на ЭВМ М-220 методом конечных разностей на сетке 90×40 узлов. Оператор Лапласа аппроксимировался по пятиточечной схеме, а для решения рлучившихся разностных уравнений использовался метод Либана.

Функция $x(\varphi, \psi)$ находилась интегрированием первого равенства в (6):

$$x(\varphi, \psi) = \int_{-\infty}^{\varphi} \frac{\partial z}{\partial \psi} d\varphi + x(-\infty, \psi). \quad (7)$$

нтеграл вычислялся по квадратурной формуле трапеции.

Данный алгоритм прост с вычислительной точки зрения и им пользовались для исследования зависимости поля концентрации от геометрии подстилающей поверхности. При этом точные размеры и форма препятствия определялись после построения искомого отображения. Для расчета загрязнения воздуха в области с фиксированной заданной границей целесообразнее искать решение уравнения Лапласа для функции $\psi(x, z)$, осуществляющее отображение физической области на полуплоскость. Была составлена программа для ЭВМ БЭСМ-6, в которой использовалась асимптотика решения уравнения Лапласа в области с уступом на большом расстоянии от криволинейной границы области

$$\psi_a \sim z - \frac{h}{2} [1 + \operatorname{sign}(x)] + \frac{h}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{z}{x} \quad (1)$$

при $|z| + |x| \rightarrow \infty$, полученная с помощью исследования поведения интеграла Кристоффеля — Шварца при $|t| \rightarrow \infty$ [6]. Уравнение решалось для функции $\psi' = \psi - \psi_a$. Если точка с координатами $(0, 1)$ лежит вне физической области, то функция ψ_a и $\psi'(x, z)$ удовлетворяют уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\psi'|_{x \rightarrow \pm \infty} = \psi'|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad \psi'|_{z=f(x)} = -\psi_a(x, f(x)),$$

где $z=f(x)$ — уравнение границы.

Функция $\varphi(x, z)$ определяется из соотношения

$$\varphi(x, z) = \int_{-l}^x \frac{\partial \psi}{\partial z} dx + \varphi(-l, z). \quad (3)$$

Здесь l — достаточно большое расстояние от начала координат при котором можно для функции $\varphi(x, z)$ воспользоваться асимптотикой $\varphi_a(x, z)$ при $(x^2 + z^2) \rightarrow \infty$, имеющей вид

$$\varphi_a(x, z) = x + \frac{h}{2\pi} \ln \frac{x^2 + z^2}{h^2}. \quad (4)$$

Уравнение (9) решалось методом конечных разностей на сетке 200×80 узлов. Оператор Лапласа, как и в предыдущем случае, аппроксимировался по пятиточечной схеме, а для решения полученных разностных уравнений использовался метод верхней релаксации [3]. Примеры рассчитанных линий тока показаны на рис. 1.

В работе [2] было показано, что для всех источников с одинаковой мощностью выброса, расположенных на одной и той же линии тока, максимальная наземная концентрация одинакова. Это дает возможность вычислить поправочный множитель к высоте трубы ρ , представляющий собой отношение высот источников

I и H_0 , дающих одинаковую максимальную наземную концентрацию, причем один из них (H) расположен в пересеченной местности, а другой (H_0) — на ровной подстилающей поверхности. В качестве других параметров, характеризующих влияние рельефа, вычислялись поправочные множители к максимальной наземной концентрации (χ), к расстоянию от источника до точки (η), где достигается этот максимум, и распределение $q/q_m(x/x_m)$ в рельефе.

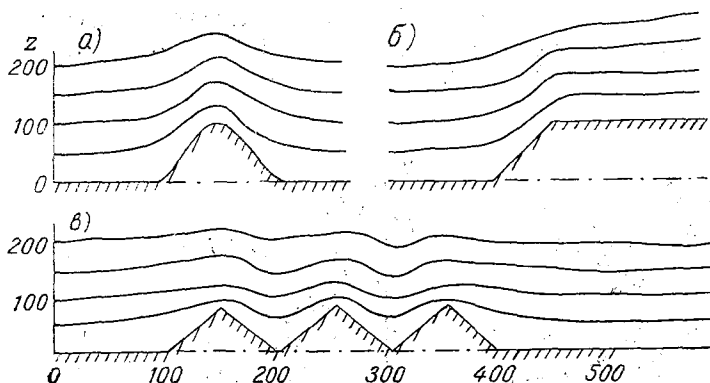


Рис. 1. Линии тока, полученные по аналитической формуле (4) для конформного отображения (а) и в результате численного решения уравнения (9) (б) и уравнения (5) (в).

Величины χ и η определяются из соотношений

$$\chi = \left(\frac{HV_\infty}{\psi_H} \right)^{2,3},$$

$$\eta = \frac{x(\varphi_H \mp \varphi_m, 0) - x_0}{x_m}, \quad (12)$$

где $\varphi_H = \varphi(x_0, H+h(x_0))$ и $\psi_H = \psi(x_0, H+h(x_0))$ — потоковые координаты источника; $h(x)$ — уравнение границы, φ_m — расстояние от источника до точки, где достигается этот максимум в полуплоскости; H , x_0 — координаты источника в физической области; V_∞ — модуль скорости потенциального течения $V = (u_n^2 + w_n^2)^{1/2}$ при $z^2 + z^2 \rightarrow \infty$.

Методика вычисления χ и η изложена в [1]. С целью систематизации результатов исследования влияние параметров a и h (протяженности и высоты препятствия), определяющих форму подстилающей поверхности, на величины ρ_m , χ_m и $\eta_{\min}$ (ρ_m — χ_m — максимальные поправочные множители к высоте трубы к максимальной наземной концентрации, а $\eta_{\min}$ — минимальный поправочный множитель к расстоянию от источника до точки, где достигается q_m). Вычисления выполнялись для источников, высо-

та H которых варьировалась в диапазоне от 25 до 300 м и для препятствий различных форм [1].

Расчеты показали, что наиболее сильно эти величины зависят от безразмерных параметров H/h и $n = \frac{2h}{a}$ (n — уклон подстилающей поверхности). При фиксированных H/h и n максимальные поправочные множители зависят от конкретных особенностей формы обтекаемого препятствия (рис. 2). Так, при $H/h = 0,5$ изменение ρ_m за счет различия в формах холма достигает 30% для крутых холмов ($n > 0,5$) и 15% для пологих ($n < 0,2$), а при $H/h = 2$ эти изменения не превышают 10%. Такие оценки были получены для всех H/h и n .

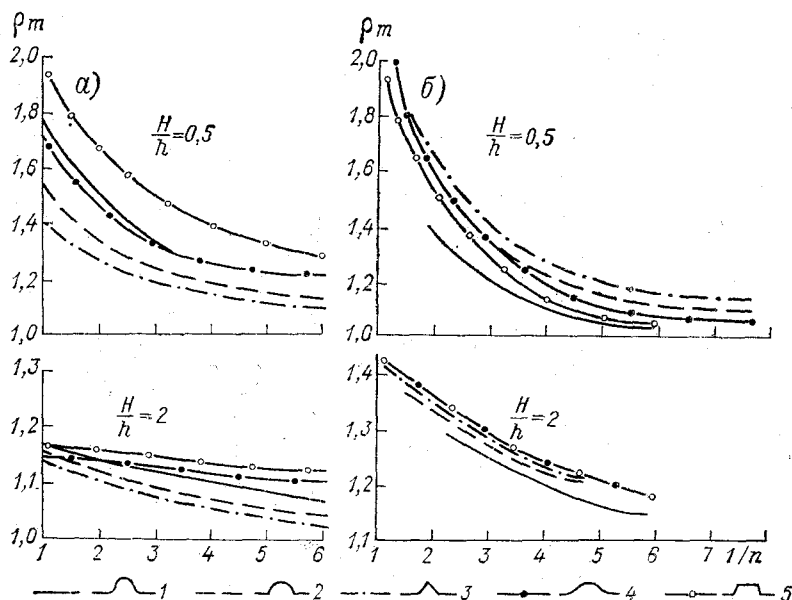


Рис. 2. Зависимость ρ_m от формы (1—5) и параметров (H/h) препятствий.

Выполненные исследования позволили построить номограммы для определения ρ_m , χ_m и $\eta_{\min}$ в зависимости от безразмерных параметров H/h и n [1]. На номограммах для ρ_m выделены области I и II, где ρ_m меняется с изменением формы препятствия соответственно меньше и больше чем на 25%. Задача о влиянии рельефа на характеристики загрязнения параллельно решалась методом, связанным с решением системы уравнений пограничного слоя [1].

Результаты для пяти случаев, приведенные в таблице, позволяют оценить влияние генерируемой на препятствии турбулентности на величину ρ_m . В таблице максимальные значения попра

зочного множителя к высоте трубы, рассчитанные с учетом генерации турбулентности на препятствии, обозначены ρ_{mt} , а определенные методом потенциального обтекания для препятствий трапецевидной формы [1] обозначены ρ_{mp} . Из таблицы видно, что влияние турбулентности существенно в том же диапазоне параметров H/h и n , для которого отмечается и существенное влияние геометрии на величину ρ_m (т. е. $H/h < 0,5$, $n > 0,3$), что соответствует области II на номограммах [1], где они могут использоваться только для приближенной оценки.

Расчеты, выполненные для цепочки препятствий (см. рис. 1 в), показали, что при увеличении числа холмов до двух значение ρ_m

Таблица

H_0	ρ_{mt}					ρ_{mp}				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5	1,81	1,79	2,84	1,79	1,84	1,65	1,62	1,51	1,53	1,27
10	1,50	1,49	2,32	1,57	1,70	1,39	1,36	1,32	1,35	1,26
15	1,39	1,43	1,85	1,53	1,68	1,31	1,34	1,12	1,33	1,25
20	1,30	1,32	1,65	1,41	1,47	1,24	1,24	1,08	1,23	1,24
30	1,20	1,20	1,26	1,35	1,46	1,16	1,15	1,00	1,20	1,22
50	1,09	1,09	—	1,28	1,33	1,08	1,08	—	1,18	1,19
75	1,08	1,01	—	1,14	1,19	1,05	1,00	—	1,07	1,16

Примечание. Во всех случаях $h=150$ м; протяженность бокового склона $\sigma=500$ м, кроме случая 3, где $\sigma=150$ м; отношение потоковой полуширины верхнего плато к σ $d=0$ м, кроме случаев 1 и 4, где $d=250$ м.

возрастает до значения ρ_m , соответствующего ложбине, образованной этими холмами. Цепочка из двух ложбин приводит к увеличению ρ_m на 20% для $\frac{H}{h} < 1$ и на 10% для $\frac{H}{h} \geq 1$. Дальнейшее увеличение числа препятствий практически не сказывается на величине ρ_m . Следовательно, при расчетах параметров загрязнения необходимо учитывать влияние только ближайших к источнику препятствий.

В практических целях необходимо знать величины χ и η для любого положения источника относительно рельефа. На рис. 3 а представлена зависимость η от безразмерных параметров H/h , n , x_0/a , где x_0 — положение источника на рельефе (x_0 — отсчитывается от середины препятствия, а в случае уступа — от края верхнего плато). Чтобы получить удобные формулы для расчета χ и η при любом положении источника относительно рельефа отклонения χ и η от единицы нормировались на величины $(\chi_m - 1)$ и $(1 - \eta_m)$ соответственно. Анализ результатов показал, что величины $\chi - 1/(\chi_m - 1)$ и $\eta - 1/(1 - \eta_m)$ зависят в основном только от

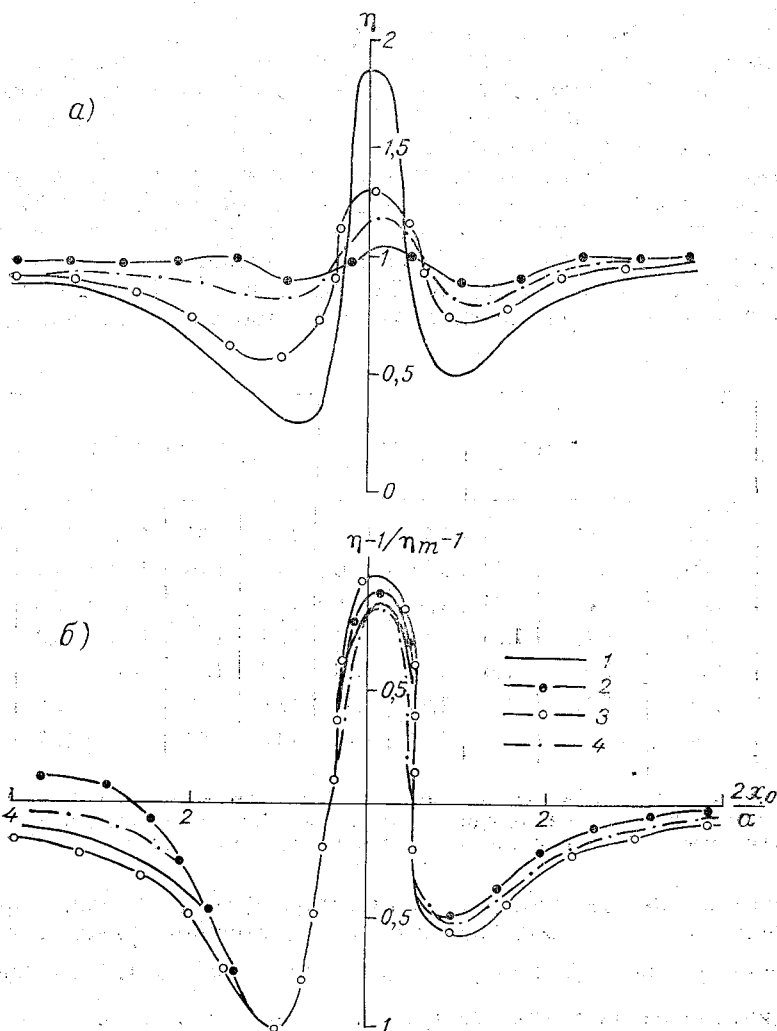


Рис. 3. Примеры систематизации данных.
 1) $H/h = 0.2$, $n = 2$; 2) $H/h = 0.2$, $n = 9$; 3) $H/h = 2.0$, $n = 2$; 4) $H/h = 2.0$, $n = 9$.

безразмерного параметра $2x_0/a$, характеризующего положение источника на рельефе. При этом, как видно на рис. 3 б, разброс кривых для препятствий одного вида, но с различными n и H/h составляет от 5 до 20% (5% — в районе максимального поправочного множителя для концентрации и минимального для опасного расстояния и 20% — в районе минимального поправочного множителя для концентрации и максимального для опасного расстояния).

ния). Такая точность является достаточной для практических целей.

В результате были получены аппроксимационные формулы, позволяющие определять χ и η для источника на любом расстоянии от холма, впадины и уступа:

$$\chi = 1 + f_1\left(\frac{2x_0}{a}\right)(\chi_m - 1), \quad \eta = 1 + f_2\left(\frac{2x_0}{a}\right)(\eta_m - 1). \quad (13)$$

Графики функций f_1 и f_2 приведены в [1].

Для каждого вида препятствий с уклонами от 0,1 до 1 рассчитывалась также зависимость $q/q_m(x/x_m)$ по формулам:

$$\frac{q}{q_m} = \begin{cases} 3r_1^4 - 8r_1^3 + 6r_1 & \text{при } r_1 \leq 1 \\ \frac{1,13}{0,13r_1^3 + 1} & \text{при } 1 < r_1 \leq 8 \\ \frac{r_1}{3,58r_1^2 - 35,2r_1 + 120} & \text{при } r_1 > 8 \end{cases} \quad (14)$$

где $r_1 = (\varphi - \varphi_H)/\varphi_m$, φ — потоковая координата, показывающая для какого расстояния от источника проводится расчет. Оказалось, что в широком диапазоне значений параметров $\frac{H}{h}$, n и x_0 эта функция аналогична приведенной в [8]. Небольшие отличия наблюдаются, если источник расположен в районе от начала склона холма до его середины ($-a/2 < x_0 < -a/4$) или в районе дна ложбины ($-a/4 \leq x_0 \leq 0$). Зависимость от положения источника ослабевает по мере увеличения высоты источника и уменьшения крутизны препятствий.

В заключение следует отметить, что указанные аппроксимационные формулы и графики достаточно просты и удобны для использования их в практических целях, дают хорошую точность при определении параметров загрязнения и предназначены для применения в тех случаях, когда можно выделить отдельные формы рельефа. При более сложной подстилающей поверхности рекомендуется использовать программы для ЭВМ, описанные в настоящей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянд М. Е. и др. Особенности распространения примесей в пересеченной местности. Берлянд М. Е., Генрихович Е. Л., Грачева И. Г., Оникул Р. И. — См. наст. сборник.
- Берлянд М. Е., Генрихович Е. Л., Куренби О. И. Влияние рельефа на распределение примеси от источника. — Труды ГГО, вып. 234, 1968, с. 28—44.
- Гандин Л. С., Дубов А. С. Численные методы краткосрочного прогноза погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1968, с. 11—114.

4. Лаврентьев И. А., Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного.— М.: Наука, 1965. 708 с.
5. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-74/ Под ред. М. Е. Берлянда А. М. Кошкина, Р. И. Оникула.— М.: Стройиздат, 1975. 42 с.
6. Stümke H. Berücksichtigung vereinfachter Geländetypen bei der Berechnung der turbulenten Ausbreitung vor Schornsteingasen.— Staub, 1964, Bd. 24 S. 175—182.

Л. Г. Хуршудян

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ПРИМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

1. Введение

Большое внимание в последние годы уделяется изучению влияния рельефа местности на распространение примесей в пограничном слое атмосферы. Неоднородности подстилающей поверхности существенно влияют на пространственное распределение динамических и турбулентных характеристик воздушного потока и тем самым приводят к изменению по сравнению со случаем ровной подстилающей поверхности поля концентрации примеси от источника. Исследование закономерностей рассеяния примесей в условиях сложного рельефа имеет не только научное, но и большое практическое значение для обеспечения охраны атмосферы от загрязнения, так как индустриальные объекты, являющиеся источниками загрязнения воздушного бассейна, часто расположены в районах со сложным рельефом местности.

В настоящее время в этой области уже получен ряд существенных результатов как в научном, так и в практическом плане, положение которых можно найти, например, в [1]. Вместе с тем имеющихся работах рассматривается рассеяние легких (невесомых) примесей, в то время как промышленные предприятия высыпают в атмосферу не только примеси такого типа (к нему относятся газообразные примеси), но и тяжелые примеси (пыль, ла), имеющие собственную скорость осаждения. Диффузия же тяжелых примесей, как показали проведенные для случая ровной подстилающей поверхности исследования [5, 7], существенно отличается от диффузии легких.

В данной работе делается попытка изучения рассеяния тяжелых примесей в условиях сложного рельефа.

2. Постановка задачи

В связи с тем, что решение задачи в случае подстилающей поверхности, имеющей неоднородности произвольного вида, очень сложно, ограничимся, как и в подавляющем числе работ по диффузии легких примесей, случаем, когда подстилающая поверхность однородна в перпендикулярном к ветру направлении. Иначе говоря, предположим, что в системе координат, в которой ось z направлена по приземному ветру, уравнение подстилающей поверхности имеет вид $F(x, z) = 0$ (ось z направлена по вертикали, ось y — перпендикулярно x и z).

В этом случае уравнение диффузии, описывающее распространение тяжелой примеси, можно записать в следующем виде:

$$u \frac{\partial q}{\partial x} + (w - w_g) \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z}. \quad (1)$$

Здесь q — концентрация примеси, u, w — составляющие скорости ветра, w_g — скорость осаждения примеси, k_x, k_y, k_z — составляющие коэффициента турбулентной диффузии.

Перейдем в уравнении (1) к потоковым координатам ξ , (ξ пропорциональна потенциалу, а ζ — функции тока потенциального воздушного потока над данной подстилающей поверхностью) полагая при этом, как и в [4], что $k_x = k_z = k$. Воспользуемся еще тем, что линии тока реального течения в случаях не очень крутого рельефа близки к линиям тока невязкого течения [3, 4]. Тогда приходим к уравнению

$$\begin{aligned} \left(u_\xi + w_g \frac{\partial x}{\partial \zeta} \right) \frac{\partial q}{\partial \xi} - w_g \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial q}{\partial \zeta} = \\ = \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial q}{\partial \zeta} + \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $u_\xi = v_\xi / V_p$, где v_ξ — скорость ветра, а V_p — безразмерный модуль скорости потенциального течения.

Обобщая предложенную М. Е. Берляндом в [2] модель для коэффициента горизонтальной диффузии, примем, что

$$k_y = k_0 V_p v_\xi \quad (k_0 = \text{const}).$$

Будем рассматривать распространение примеси от точечного источника, находящегося в плоскости (ξ, ζ) . Начало координат всегда можно выбрать соответствующим образом, так чтобы в уравнение подстилающей поверхности, ни в коэффициенты уравнения (2) переменная y не входила. Тогда с учетом выше сдела-

ых предположений, решение $q(\xi, \zeta, y)$ уравнения (2) можно приближенно представить в виде

$$q(\xi, \zeta, y) = \frac{q'(\xi, \zeta)}{2\sqrt{\pi k_0(\xi - \xi_s)}} e^{-\frac{y^2}{4k_0(\xi - \xi_s)}}. \quad (3)$$

десь ξ_s — координата источника, а q' удовлетворяет уравнению

$$\left(u_\xi + w_g \frac{\partial x}{\partial \zeta}\right) \frac{\partial q'}{\partial \xi} - w_g \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial q'}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \zeta} k \frac{\partial q'}{\partial \zeta}. \quad (4)$$

Наша задача, таким образом, сводится к решению уравнения 4) со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} q' &= \frac{Q}{\bar{u}} \delta(\zeta - \zeta_s) \quad \text{при } \xi = \xi_s, \\ k \frac{\partial q'}{\partial \zeta} &= 0 \quad \text{при } \zeta = 0, \\ q' &\rightarrow 0 \quad \text{при } \zeta \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (5)$$

десь ξ_s, ζ_s — координаты, а Q — мощность источника,

$$\bar{u} = u_\xi + w_g \frac{\partial x}{\partial \zeta}.$$

Величину q' , являющуюся решением задачи (4)–(5), можно рассматривать как концентрацию от бесконечного линейного источника, расположенного параллельно оси y .

3. Решение задачи

Для решения задачи (4)–(5) необходимо знать коэффициенты уравнения (4), а именно $u_\xi, k, \frac{\partial x}{\partial \xi}, \frac{\partial x}{\partial \zeta}$.

Наиболее строгое решение задачи об определении скорости течения и коэффициента турбулентности проведено в [3], где эти величины находятся на основе решения системы уравнений движения, баланса турбулентной энергии и использования некоторых дополнительных соотношений, необходимых для определения коэффициента турбулентности. Полученные характеристики воздушного потока использованы для исследования рассеивания легкой примеси над неоднородной подстилающей поверхностью. Один из важных выводов, сделанных в [3], состоит в том, что при не очень низких источниках выброса примеси в исследованиях по диффузии можно пользоваться более простой потенциальной моделью воздушного течения. Модель воздушного потока, в которой использованы представления метода потенциальных течений, применена и в [6], где проведено изучение распространения лег-

кой примеси в условиях сложного рельефа с учетом ее начального подъема. В настоящей работе мы также воспользуемся такого рода моделью воздушного потока.

По аналогии с [6] примем, что

$$u_{\xi} = \begin{cases} u_1 \frac{\ln\left(1 + \frac{\xi}{z_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\xi_1}{z_0}\right)} & \text{при } \xi \leq h \\ u_1 \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\xi_1}{z_0}\right)} & \text{при } \xi > h \end{cases} \quad (6)$$

$$k = \begin{cases} \nu + k_1 \frac{\xi}{\xi_1} & \text{при } \xi \leq h \\ \nu + k_1 \frac{h}{\xi_1} & \text{при } \xi > h. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь u_1 — скорость ветра, а k_1 — коэффициент турбулентности в набегающем потоке на высоте ξ_1 , z_0 — шероховатость подстилающей поверхности, ν — кинематическая молекулярная вязкость воздуха, h — высота приземного слоя атмосферы в набегающем потоке.

Формулы (6) и (7) можно считать обобщением известных зависимостей, принимаемых при ровной подстилающей поверхности в случае нейтральной стратификации атмосферы.

Вид $\frac{\partial x}{\partial \xi}$ и $\frac{\partial x}{\partial \zeta}$ как функций переменных ξ и ζ определяется формой подстилающей поверхности. Мы будем рассматривать холм или впадину, симметричные относительно оси z (рис. 1), параметрические уравнения границы которых имеют вид:

при $|\lambda| \leq a$

$$x = \frac{1}{2} \lambda \left[1 + \frac{a^2}{\lambda^2 + m^2(a^2 - \lambda^2)} \right],$$

$$z = \frac{1}{2} m \sqrt{a^2 - \lambda^2} \left[1 - \frac{a^2}{\lambda^2 + m^2(a^2 - \lambda^2)} \right];$$

при $|\lambda| > a$

$$x = \frac{1}{2} \operatorname{sign} \lambda \left[|\lambda| + m \sqrt{\lambda^2 - a^2} + a^2 (|\lambda| + m \sqrt{\lambda^2 - a^2})^{-1} \right],$$

$$z = 0.$$

Здесь λ — параметр, a — полуширина холма (впадины),

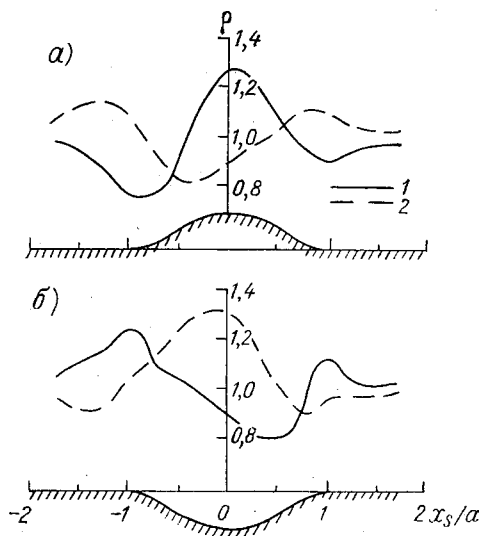


Рис. 1. Зависимость ρ от положения источника относительно холма (а) и впадины (б).

1) $H/h = 4$, $H/h_0 = 0,5$, 2) $H/h = 0,5$, $H/h_0 = 0,25$.

$= \frac{h_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{h_0}{a}\right)^2 + 1}$, где h_0 — высота холма (в случае впадины — ее глубина).

В связи с тем, что координаты источника примеси (устья дырочной трубы) естественно брать в декартовых координатах (x, z) , для определения ξ_s, ζ_s необходимо знать функции $\xi(x, z), \zeta(x, z)$.

Как отмечалось выше, координаты ξ, ζ связаны с потенциальным течением в области с рассматриваемой криволинейной границей. А именно, если взять скорость набегающего потенциального потока равной единице, то ξ и ζ совпадают по величине соответственно с потенциалом и функцией тока данного течения. Таким образом, если ввести комплексный потенциал течения $\tau(t)$, нормированный на скорость набегающего потока, то

$$\tau(t) = \xi(x, z) + i\zeta(x, z),$$

е

$$t = x + iz.$$

Комплексный потенциал рассматриваемого течения имеет вид

$$\tau(t) = \frac{t}{2(1-m)} \{1 + n - m\sqrt{(1+n)[2n+m(1-n)]}\}, \quad (8)$$

где

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{a}{t}\right)^2}.$$

Функция

$$t(\tau) = x(\xi, \zeta) + iz(\xi, \zeta),$$

обратная потенциалу $\tau(t)$, в нашем случае имеет вид

$$t(\tau) = \frac{1}{2} \{ \mu \tau + m \sqrt{(\mu \tau)^2 - a^2} + a^2 [\mu \tau + m \sqrt{(\mu \tau)^2 - a^2}]^{-1} \}, \quad ($$

где

$$\mu = \frac{2}{m+1}, \quad \tau = \xi + i\zeta.$$

Из формул (8), (9), разделив вещественную и мнимую часть можно найти $\xi(x, z)$, $\zeta(x, z)$ и $x(\xi, \zeta)$, $z(\xi, \zeta)$ (и следовательно $\frac{\partial x}{\partial \xi}$, $\frac{\partial x}{\partial \zeta}$).

4. Результаты расчетов

Расчеты конкретных примеров, результаты которых приводятся в настоящей работе, относятся к случаю расположения источника примеси (дымовой трубы) в районе холма или впадины высотой (глубиной) $|h_0| = 200$ м и протяженностью $2a = 1200$ м. Значения метеорологических параметров в этих расчетах примем следующие: $u_1 = 2$ м/с, $k_1 = 0,1$ м/с, $z_0 = 0,01$ м, $\zeta_1 = 1$ м.

Основное внимание при анализе расчетов уделялось изучению отличия между максимальными наземными концентрациями тяжелой и легкой примеси (при одинаковых метеорологических параметрах и высотах источников). Отношение этих концентраций обозначим χ_m^r . Аналогичная величина при изучении рассеяния тяжелых примесей над ровной подстилающей поверхностью (будем обозначать ее χ_m) была введена в [1, 5, 7]. Как показали расчеты, величины χ_m^r и χ_m , вычисленные при одинаковых метеорологических параметрах и высотах источников, различаются. Для оценки этого различия введем величину $\rho = \chi_m^r / \chi_m$. Были проведены расчеты ρ для различных положений источника относительно рельефа и для разных скоростей осаждения примеси.

На рис. 1 приведены зависимости ρ от положения источника относительно холма или впадины (x_s — координата источника). Скорость осаждения примеси w_g принималась здесь равной 0,2 м/с. Разный вид $\rho(x_s/a)$ при $H/h > 1$ и $H/h < 1$ определяет тем, что различие в потоковых ординатах источника ζ_s (при фиксированной его геометрической высоте H), когда он располагается в разных точках рельефа, существенно по-разному влияет на величину χ_m^r в зависимости от того, $\zeta_s < h$ или ζ_s значительно

$w, g \cdot M/c$	x_s/a														
	-1,75	-1,5	-1,25	-1,0	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
0,05	0,96	0,94	0,92	0,87	0,89	0,99	1,11	1,16	1,13	1,04	0,97	0,94	0,97	0,98	0,99
0,10	0,93	0,91	0,87	0,80	0,83	0,97	1,15	1,23	1,19	1,06	0,96	0,91	0,96	0,98	0,98
0,15	0,94	0,90	0,85	0,77	0,78	0,94	1,16	1,26	1,22	1,07	0,95	0,90	0,96	0,97	0,98
0,20	0,98	0,93	0,86	0,77	0,76	0,92	1,16	1,28	1,23	1,07	0,95	0,90	0,95	0,97	0,98
0,25	0,01	0,96	0,88	0,78	0,75	0,89	1,15	1,29	1,24	1,08	0,95	0,90	0,95	0,97	0,98

Таблица 2

$w, g \cdot m/c$	x_s/a														
	-1,75	-1,5	-1,25	-1,0	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
0,05	1,03	1,04	1,06	1,10	0,99	0,95	0,92	0,90	0,88	0,88	0,94	1,07	1,03	1,02	1,01
0,10	1,05	1,07	1,09	1,15	1,01	0,95	0,91	0,87	0,84	0,83	0,91	1,10	1,04	1,02	1,01
0,15	1,07	1,09	1,13	1,20	1,04	0,98	0,93	0,87	0,82	0,81	0,89	1,11	1,04	1,02	1,01
0,20	1,05	1,11	1,16	1,24	1,09	1,02	0,97	0,88	0,82	0,79	0,87	1,12	1,04	1,02	1,01
0,25	1,01	1,08	1,18	1,28	1,11	1,04	1,00	0,92	0,82	0,78	0,87	1,12	1,05	1,02	1,01

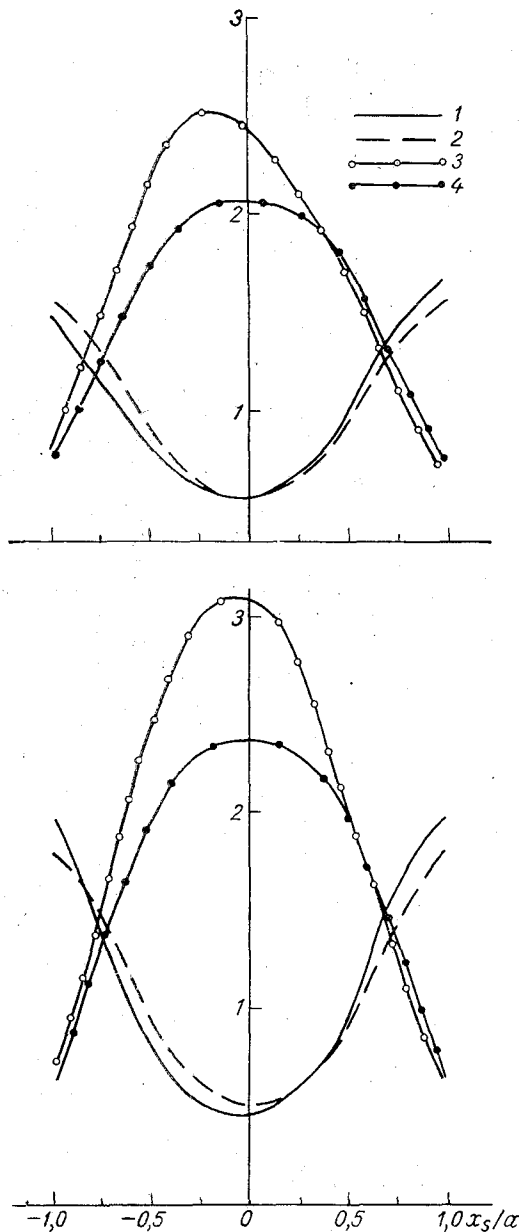


Рис. 2. Зависимость γ от положения источника на местности с различным рельефом при $H/h=1$ и $H=100$ м (а), при $H/h=0,5$ и $H \approx 50$ м (б).

1 — тяжелая примесь в случае холма, 2 — легкая примесь в случае холма, 3 — тяжелая примесь в случае впадины, 4 — легкая примесь в случае впадины.

больше h . Аналогичный факт был ранее выявлен при изучении рассеяния тяжелой примеси над ровной подстилающей поверхностью [1].

В табл. 1 для холма и в табл. 2 для впадины приведены величины $\rho(x_s/a)$ для различных скоростей осаждения примеси w_g . Здесь принималось $H/h_0=0,5$, $H/h=1$. Качественно поведение функции ρ при разных скоростях осаждения носит сходный характер, однако с увеличением скорости осаждения примеси амплитуда изменения $\rho(x_s/a)$ увеличивается.

Наряду с расчетами величины, характеризующей отличие поправки к случаю ровной подстилающей поверхности, были проведены расчеты отношения γ максимальной наземной концентрации тяжелой примеси при расположении источника в пересеченной и ровной местности (все параметры принимаются одинаковыми в обоих случаях).

На рис. 2 показаны изменения γ в зависимости от положения источника на рельефе. Для всех кривых скорость осаждения примеси $w_g=0,2$ м/с. Видно, что в отличие от легкой примеси для тяжелой примеси кривые γ несимметричны относительно оси z , т.

ри симметричных положениях источника значения γ различны. Можно отметить, что впадина оказывает несколько более сильное влияние на рассеяние тяжелой примеси, чем аналогичный холм, что имеет место и при распространении легкой примеси.

В заключение отметим, что полученные результаты могут быть использованы в практических целях при оценке загрязнения атмосферы вредными примесями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы.— Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.
- Берлянд М. Е. К теории турбулентной диффузии. Труды ГГО, 1963, вып. 138, с. 31—37.
- Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Атмосферная диффузия и структура воздушного потока над неоднородной подстилающей поверхностью.— В кн.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1971, с. 49—69.
- Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Куренбин О. И. Влияние рельефа на распространение примеси от источника.— Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 28—44.
- Берлянд М. Е. и др. Особенности диффузии тяжелой примеси в атмосфере./Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Ложкина В. П., Оникул Р. И.— Труды ГГО, 1964, вып. 159, с. 32—40.
- Берлянд М. Е., Киселев В. Б. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема.— Метеорология и гидрология, 1973, № 3, с. 3—10.
- Берлянд М. Е., Оникул Р. И. Физические основы расчета рассеивания в атмосфере промышленных выбросов.— Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 3—27.

В. Б. Кисел

К РАСЧЕТУ РАССЕИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНОГО ПОДЪЕМА В ХОЛМИСТОЙ МЕСТНОСТИ

Важным фактором, определяющим рассеивание примеси в приграничном слое атмосферы, является рельеф окружающей местности. Неровности подстилающей поверхности существенно изменяют пространственное распределение скорости ветра и составляющих коэффициентов обмена по сравнению с теми, которые существуют в условиях ровной и однородной местности, что сказывается и на поле концентраций примеси от источника.

Выполненные в последние годы исследования позволили установить основные закономерности распространения примеси в холмистой местности [1, 3]. Проведенные работы относятся главным образом к случаю пассивного, т. е. не вносящего возмущения в воздушный поток, источника. Вместе с тем из реальных промышленных источников вредные вещества выбрасываются с начальной скоростью и нагретыми относительно окружающего воздуха, что существенно изменяет поле скоростей потока в окрестности источника.

Определение поля скоростей с учетом указанных выше факторов требует, вообще говоря, совместного решения уравнений движения и уравнения переноса тепла, что является довольно сложной и трудоемкой задачей. В то же время для случая ровной и однородной местности хорошо оправдал себя подход, при котором считается, что наземные концентрации примеси от реального источника такие же, как и от пассивного источника высотой $H^* = H + \Delta H$, где H — геометрическая высота источника, а ΔH — начальный подъем примеси. Для определения ΔH существуют хорошо проверенные на экспериментальном и теоретическом материалах способы вычисления его по скорости и перегреву выброса [1, 2].

Аналогичный подход в случае холмистой местности был использован в работе [4]. Там же показано, что максимальная

емная концентрация примеси от источника при опасной скорости ветра допускает представление

$$c_m = c_{m0} \rho(H/a, h/a, x_s/a), \quad (1)$$

где c_{m0} — максимальная наземная концентрация примеси при опасной скорости ветра от источника, расположенного на ровном месте, ρ — поправочный множитель, учитывающий влияние рельефа, h — высота холма, a — его полуширина, x_s — расстояние от источника до центра холма. Существенным здесь является тот акт, что в широком интервале изменения скоростей и перегревов выброса величина ρ остается практически постоянной. Это сокращает количество параметров, от которых зависит ρ и облегчает разработку инженерных методов расчета поправок, возникающих под влиянием рельефа. Однако получающаяся трехпараметрическая зависимость не допускает тем не менее удобного приложения графического представления. Это вызывает необходимость разработки методов приближения ее более простыми зависимостями.

Рассмотрим один из возможных методов. Пусть имеется функция трех переменных $F(x, y, z)$. Будем искать две такие функции $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, z)$, произведение которых с максимальной степенью точности аппроксимировало бы $F(x, y, z)$, т. е. будем искать минимум функционала

$$I = \iiint [F(x, y, z) - \varphi(x, y) \psi(x, z)]^2 dx dy dz. \quad (2)$$

по функциям φ и ψ . Приравнивая нулю первые вариации и преобразовывая полученные выражения, получим:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= \frac{\int \psi(x, z) F(x, y, z) dz}{\int \psi^2(x, z) dz}, \\ \psi(x, z) &= \frac{\int \varphi(x, y) F(x, y, z) dy}{\int \varphi^2(x, y) dy}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановка второго из этих равенств в первое приводит к уравнению

$$\varphi(x, y) = B(x) \int A(x; y, y') \varphi(x, y') dy', \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} A(x; y, y') &= \int F(x, y, z) F(x, y', z) dz, \\ B(x) &= \frac{\int \varphi^2(x, y) dy}{\int [\int \varphi(x, y) F(x, y, z) dy]^2 dz}. \end{aligned} \quad (5)$$

Можно показать, что (4), (5) удовлетворяется, если $\varphi(x, y)$ является собственной функцией интегрального уравнения

$$\varphi(x, y) = \mu \int A(x; y, y') \varphi(x, y') dy', \quad (6)$$

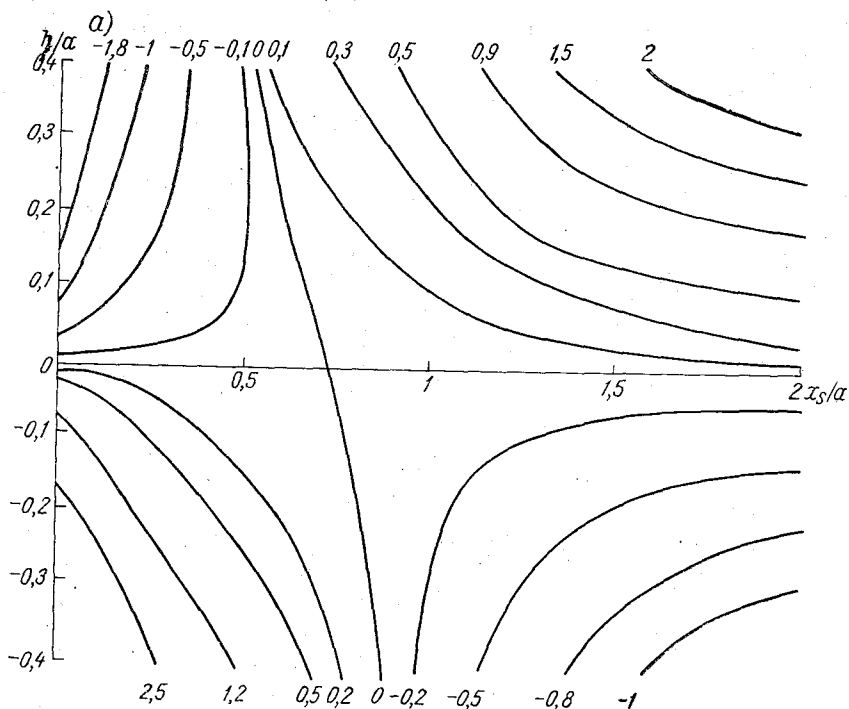


Рис. 1. Номограммы для расчета функций $\varphi(x_s/a, h/a)$ (а) и $\psi(x_s/a,$

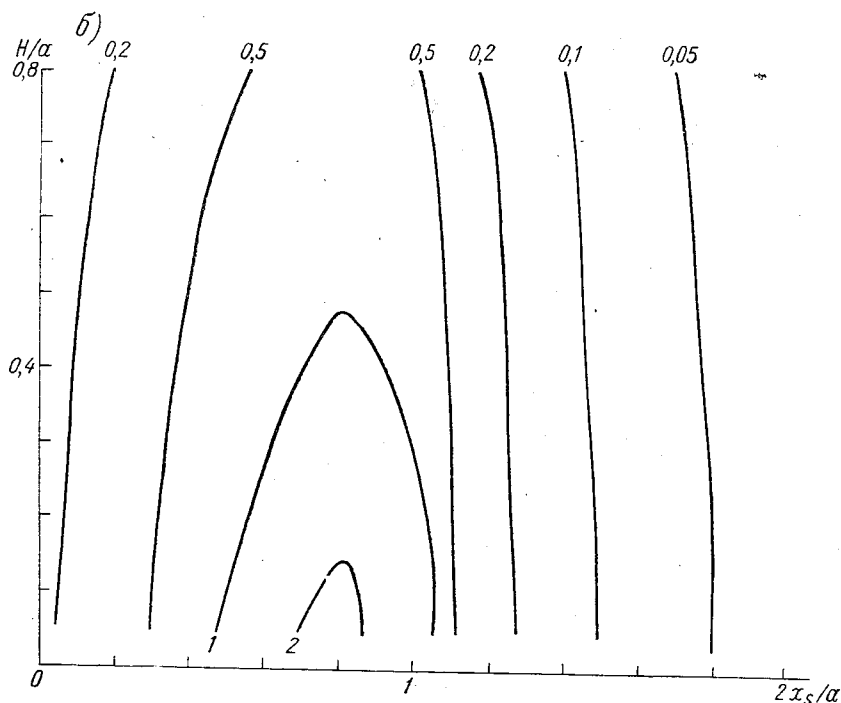
где μ — соответствующее собственное число. Функционал I при этом равен

$$I = \int \left[\iint F^2(x, y, z) dy dz - \frac{1}{\mu} \right] dx. \quad (7)$$

Отсюда следует, что для получения наилучшей аппроксимации следует выбирать собственные функции (6), соответствующие минимальному положительному собственному числу.

Изложенный метод был использован для аппроксимации зависимости поправочного множителя $\rho(H/a, h/a, x_s/a)$, рассчитанного согласно [4]. Аргументы изменялись в пределах $0,04 \leq H/a \leq 0,8$, $-0,4 \leq h/a \leq 0,4$, $0 \leq x_s/a \leq 2$. Минимизировался дискретный аналог функционала I

$$\bar{I} = \sum_{i,j,k} [F_{i,j,k} - \varphi_{i,j} \psi_{i,k}]^2,$$



H/a (б).

и этом аналогом уравнения (4) являлась система линейных алгебраических уравнений

$$\varphi_k^i = B^i \sum_l A_{k,l}^i \varphi_l^i.$$

В качестве функции F в данном случае оказалось удобным пользоваться отклонения ρ от единицы, т. е. множитель ρ аппроксимировался функцией вида

$$\rho = 1 + \varphi(x, y) \psi(x, z).$$

Были опробованы все способы разбиения трех аргументов на два. Наилучшие результаты соответствовали случаю, когда в качестве аргумента, входящего в обе аппроксимирующие функции, пользовался x_s/a . Среднеквадратическая погрешность аппроксимации составляла при этом 1,5%. Полученные номограммы для определения φ и ψ приведены на рис. 1. Их можно использовать для расчета максимальной наземной концентрации примеси при данной скорости ветра от источника, расположенного в холмистой местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е., Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975, 448 с.
2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Оникул Р. И. О расчете загрязнения атмосферы выбросами из дымовых труб электростанций. — Т. ГГО, 1964, вып. 158, с. 3—21.
3. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Куренбин О. И. Влияние рельефа на распространение примеси от источника. — Тр. ГГО, 1968, вып. 23 с. 28—44.
4. Берлянд М. Е., Киселев В. Б. О влиянии рельефа на распространение примесей с учетом их начального подъема. — Метеорология и гидрология, 1973, № 3, с. 3—10.

М. Е. Берлянд, М. Г. Гольдберг, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул

К ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ОЦЕНКЕ СОДЕРЖАНИЯ АЭРОЗОЛЯ В ГОРОДСКОЙ АТМОСФЕРЕ

1. Введение

Изучению содержания аэрозолей в воздухе, его изменения в пространстве и во времени, а также влияния на тепловой режим атмосферы и другие метеорологические явления в настоящее время уделяется большое внимание [2]. Особое значение при этом придается оценке глобальных эффектов климатического характера. В меньшей степени исследовалась весьма важная в научном и практическом отношении задача о взаимосвязи эрозольного загрязнения и радиационного режима атмосферы в городских условиях [6, 7, 8 и др.]. Настоящая статья посвящена в основном рассмотрению именно последней задачи, связанной с изучением эрозольной или дымовой «шапки» над городом по данным о прямой и рассеянной солнечной радиации, дальности видимости или прозрачности атмосферы. В предыдущей работе авторов [3] был разработан метод определения рассеивающей и поглощающей компонент оптической толщины атмосферы. Для этой цели на основе теоретической модели был впервые проведен совместный анализ данных сетевых актинометрических наблюдений за прямой и рассеянной радиацией. В данной работе развиваются положения теории рассеяния и поглощения радиации [3] для получения характеристик запыленности атмосферы в крупных городах и промышленных центрах. Дополнительная информация о распределении аэрозоля по высоте получается при сравнении среднего коэффициента ослабления радиации в вертикальном столбе атмосферы, вычисленного по прямой радиации, с коэффициентом ослабления в нижнем слое атмосферы, рассчитанным по прозрачности или дальности видимости. При этом также появляется воз-

возможность рассчитать вертикальное распределение радиационных притоков тепла к атмосфере и подстилающей поверхности, а также альбедо системы земля — атмосфера и др.

2. Двухслойная задача о распространении солнечной радиации над городом

В распределении аэрозоля над городом целесообразно в первом приближении выделить два слоя: нижний, в котором сосредоточена основная масса аэрозолей антропогенного происхождения, и верхний более чистый слой, где влиянием аэрозоля на распространение радиации можно пренебречь. В качестве исходных уравнений для потоков рассеянной радиации в обоих слоях использовалась, как и в [3], следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dF_1}{d\tau} &= -2[1 - \lambda(1 - \Gamma)] F_1(\tau) + 2\lambda \Gamma F_2(\tau) + \\ &+ \lambda s_0 \Gamma \exp[-(\tau^* - \tau) \sec \theta_{\odot}], \\ \frac{dF_2}{d\tau} &= -2\lambda \Gamma F_1(\tau) + 2[1 - \lambda(1 - \Gamma)] F_2(\tau) - \\ &- \lambda s_0(1 - \Gamma) \exp[-(\tau^* - \tau) \sec \theta_{\odot}], \end{aligned} \quad (1)$$

где F_1 — поток рассеянной радиации, направленный вверх, а F_2 — вниз; λ — отношение количества радиации, излученной элементарным объемом, к общему количеству поглощенной им радиации; s_0 — солнечная постоянная; $\theta_{\odot}$ — зенитный угол Солнца; τ — оптическая толщина, связанная с геометрической высотой z соотношением

$$\tau = \int_0^z a(z) dz, \quad (3)$$

где $a(z)$ — коэффициент ослабления радиации;

$$\tau^* = \int_0^{\infty} a(z) dz, \quad (4)$$

где τ^* — полная оптическая толщина атмосферы, вычисляется по прямой солнечной радиации s

$$\tau^* = \frac{\ln\left(\frac{s_0}{s}\right)}{\sec \theta_{\odot}}. \quad (5)$$

Полагая, что поглощение радиации происходит только в аэрозольном слое, величину оптической толщины этого слоя τ_n можно выразить соотношением

$$\tau_n = \tau_n^{\pi} + \tau_n^{pa} + \tau_n^{pb}, \quad (6)$$

где τ_n^{π} , τ_n^{pa} , τ_n^{pb} — составляющие τ_n , обусловленные поглощением радиации аэрозолем и рассеянием аэрозолем и воздухом.

Обозначая полную оптическую толщину чистой атмосферы через τ_0 (при нормальных условиях $\tau_0=0,093$ [5]) и приближенно принимая, что в верхнем слое происходит чисто релеевское рассеяние, получим его оптическую толщину $\tau_b=\tau_0-\tau_n^{pb}$. В соответствии с [3] значение параметра λ вычисляется по формуле

$$\lambda = \begin{cases} \frac{\tau_n^{pa} + \tau_n^{pb}}{\tau_n} & \text{при } \tau < \tau_n \\ 1 & \text{при } \tau > \tau_n \end{cases} \quad (7)$$

Для решения поставленной задачи необходим коэффициент ослабления радиации в нижнем слое атмосферы a_n . Наиболее точно он определяется инструментальными методами, например, при измерении прозрачности атмосферы. Для его нахождения можно использовать также величину метеорологической дальности видности L_b , т. е. расстояния, на котором в светлое время суток под воздействием атмосферной дымки утрачивается восприятие достаточно темных сооружений, проектирующихся на фоне неба. При том яркость предмета B_n меньше яркости фона B_ϕ и яркостный контраст K равен порогу контрастной чувствительности глаза ε

$$K = \frac{B_\phi - B_n}{B_\phi} = \varepsilon. \quad (8)$$

В случае достаточно удаленного предмета, когда допустимо пренебречь его линейными размерами, уменьшение контраста с удалением x от предмета определяется по формуле

$$K = e^{-a_n x}. \quad (9)$$

Из условия, что $x=L_b$, получим

$$a_n = \frac{\ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}{L_b}. \quad (10)$$

обычно принимают $\varepsilon=0,02 \div 0,03$ [4].

Из (3) следует, что

$$H_a = \frac{\tau^* - \tau_0}{a_n - a_0}. \quad (11)$$

здесь H_a — приведенная высота аэрозольного слоя, $a_0 = \frac{\tau_0}{H_0}$ — коэффициент релеевского рассеяния, $H_0=8$ км — высота однородной атмосферы.

Оптические толщины верхнего и нижнего слоев атмосферы τ_b и τ_n определяются следующими соотношениями:

$$\tau_b = \tau_0 \left(1 - \frac{H_a}{H_0}\right), \quad (12)$$

$$\tau_n = \tau^* - \tau_b. \quad (13)$$

В верхнем слое, где происходит релеевское рассеяние, $\Gamma=0,5$. Для определения этой величины в нижнем слое были использованы результаты О. Д. Бартеневой [1], которая на основании обработки экспериментальных данных получила зависимость вытянутости индикатрисы в нижнем слое от L_B . Эта зависимость аппроксимирована формулой.

$$\Gamma = \frac{L_B + 70}{2L_B + 72}, \quad (14)$$

где L_B выражена в километрах.

Граничные условия для системы (1)–(2) примем такими же, как и в [3]:

$$\begin{aligned} F_2(\tau^*) &= 0, \\ F_1(0) &= \alpha[F_2(0) + s_0 \cos \theta_{\odot} \exp(-\tau^* \sec \theta_{\odot})]. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь α — коротковолновое альbedo подстилающей поверхности.

Система (1)–(2) решалась численно на ЭВМ М-220. Поскольку граничные условия поставлены на разных концах отрезка $[0, \tau^*]$, решение задачи проводилось итерациями. В качестве нулевого приближения предполагалось, что $F_2(\tau) = 0$. Для оценки точности решения проведено сравнение численного и аналитического решений однослойной задачи при $\lambda=0,7$, $\Gamma=0,5$, $\tau^*=0$, $\sec \theta_{\odot}=2$. Шаг интегрирования по τ полагался равным 0,01. Оказалось, что после трех итераций значение $F_2(0)$ отличалось от точного в четвертом знаке. При составлении программы ставилась задача нахождения радиационных притоков тепла к нижнему слою атмосферы ε_a и к единице объема воздуха этого слоя ε_1 , а также альbedo системы земля — атмосфера α_1 по данным о прямой s и рассеянной D солнечной радиации у поверхности земли, коэффициенту ослабления радиации в нижнем слое (определяемому по L_B или другим способом) с учетом высоты солнца и альbedo подстилающей поверхности:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= F_2(\tau_n) - F_2(0) - s_0 \cos \theta_{\odot} \exp(-\tau^* \sec \theta_{\odot}) + \\ &+ s \cos \theta_{\odot} + F_1(0) - F_1(\tau_n), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{d}{dz} \{F_1 - F_2 - s_0 \cos \theta_{\odot} \exp[-(\tau^* - \tau) \sec \theta_{\odot}]\}, \quad (17)$$

$$\alpha_1 = \frac{F_1(\tau^*)}{s_0 \cos \theta_{\odot}}. \quad (18)$$

Единственным неизвестным параметром в системе (1)–(2) является параметр λ_n . Поэтому система решалась при различных λ_n , изменяющихся в интервале от 0 до 1. Из полученного семейства решений выбиралось дающее $F_2(0) = D$.

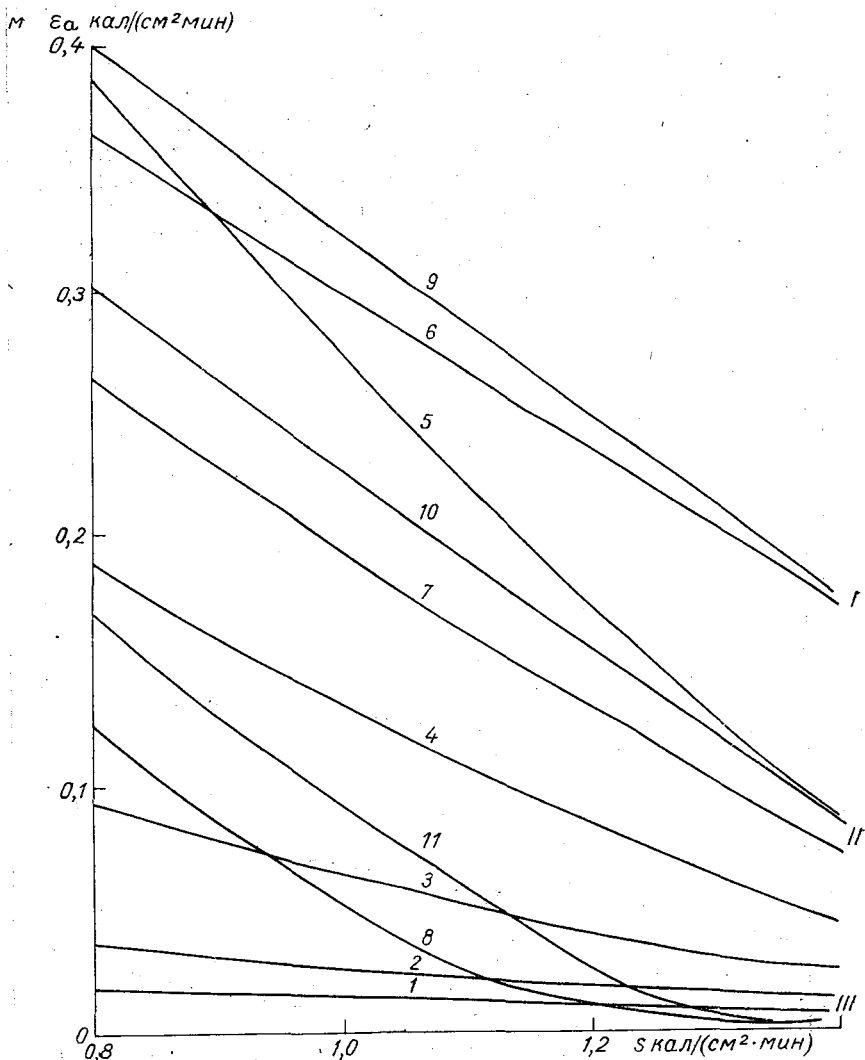


рис. 1. Зависимости от прямой радиации S высоты aerosольного слоя H_a при различных значениях метеорологической дальности видимости L_v (кривые 1—5) и притока тепла ϵ_a при различных комбинациях L_v и D (кривые 6—11):

ивая	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
км	1	2	5	10	20	1	1	1	10	10	10
кал/(см²·мин)	—	—	—	—	—	0,07	0,1	0,15	0,07	0,1	0,15

3. Примеры расчета

По разработанной схеме были проведены расчеты указанных характеристик. На рис. 1 дана зависимость высоты запыленного слоя H_a от прямой радиации s при зенитном угле солнца $\theta_{\odot}=6$ и различных значениях L_b . На этом же рисунке при альбедо $\alpha=0$ и $\theta_{\odot}=60^\circ$ для ряда сочетаний L_b и D приведены величины поглощения тепла нижним слоем атмосферы ϵ_a . Из этого рисунка следует, что в рассмотренных реальных случаях высота аэрозольного слоя изменяется в пределах от нескольких сотен метров до 1-2 км, причем при сильной запыленности нижнего слоя поглощением солнечной радиации может быть весьма существенным.

На рис. 2 приведены вертикальные распределения $\epsilon_1(z)$ при различных сочетаниях L_b , s и D для высоты солнца $\theta_{\odot}=6$

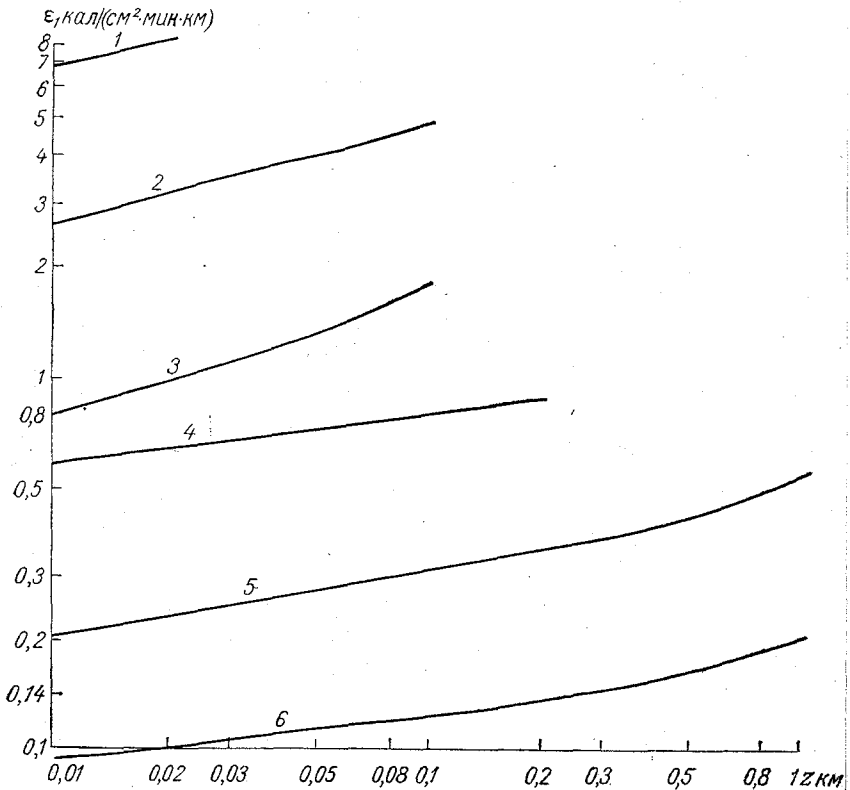


Рис. 2. Вертикальные распределения притоков тепла к единице объема воздуха ϵ_1 в кал/(см³·мин):

Кривая	1	2	3	4	5	6
L_b км	1	1	1	10	10	10
D кал/(см²·мин)	0,07	0,07	0,15	0,07	0,07	0,15
s кал/(см²·мин)	1,4	0,8	0,8	1,4	0,8	0,8

альбедо $\alpha = 0,2$. По разработанной методике были произведены расчеты оптической толщины τ_n и высоты аэрозольного слоя H_a для пригорода крупного города за несколько дней наблюдений, результаты которых приведены в таблице. В рассмотренных случаях высота аэрозольного слоя изменялась от 0,5 до 0,65 км, приток тепла ε_a — от 0,01 до 0,015 кал/(см²·мин):

Наблюдение	I	II	III
S кал/(см ² ·мин)	1,15	1,07	0,98
D кал/(см ² ·мин)	0,19	0,17	0,19
α_B км	10	10	10
H_a км	0,50	0,60	0,65
ε_a кал/(см ² ·мин)	0,010	0,015	0,010

Над городом в пределах дымовой шапки достаточно точные результаты должны также получаться при использовании следующей аппроксимации коэффициента ослабления солнечной радиации:

$$a(z) = a_p + \frac{\tau_a}{H'_a} e^{-\frac{z}{H'_a}} \quad (19)$$

здесь a_p — релеевский коэффициент ослабления.

Параметр H'_a также можно рассматривать как высоту аэрозольного слоя, так как на этой высоте коэффициент ослабления падает в e раз и ниже этого уровня сосредоточена основная масса аэрозоля. Можно показать, что при использовании (19) значение H'_a рассчитывается, как и H_a по формуле (11).

Указанная модель наиболее удобна, когда используются интегральные данные о коэффициенте прозрачности на наклонных распах (под углом φ к горизонту), например, при наблюдениях видимостью L_B вершин телевизионных мачт и других высотных сооружений. В этом случае также можно записать формулу для расчета H'_a :

$$H'_a = \frac{L'_B \varphi}{\ln \frac{\varphi}{\tau^* - \tau_0} \ln \varepsilon + \frac{\tau_0 L'_B \varphi}{H_0 \tau^* - \tau_0} + 1} \quad (20)$$

В ряде городов и промышленных районов могут проводиться наблюдения за видимостью близлежащих возвышенностей. Эти наблюдения позволяют судить о тенденции изменения прозрачности атмосферы, влиянии на нее антропогенных факторов и др. Результаты этих наблюдений также могут быть использованы для вычисления по разработанной методике вышеуказанных параметров распределения аэрозоля.

В заключение отметим, что результаты настоящей статьи свидетельствуют о необходимости организации в городах регулярных актинометрических наблюдений и измерений прозрачности атмосферы и дальности видимости, дающих важную информацию о загрязнении воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартенева О. Д. Исследование индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы. — В кн.: Актинометрия и атмосферная оптика. Л.: Гидрометеиздат, 1961, с. 187—206.
2. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
3. Берлянд М. Е. и др. К теории рассеяния и поглощения радиации и оценке глобального загрязнения атмосферы по актинометрическим данным. — Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 3—20.
4. Гаврилов В. А. Прозрачность атмосферы и видимость. — Л.: Гидрометеиздат, 1958. 168 с.
5. Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. — Л.: Гидрометеиздат, 1971. 220 с.
6. Welch P., Zdunkowski W. A radiation model of the polluted atmospheric boundary layer. Salt Lake City, Utah Univ., Utah, 1976, 55 p.
7. Atwater M. A. Radiative effects of pollutants in the atmospheric boundary layer. — J. Atmos. Sci., 1971, vol. 28, N 8, p. 1367—1373.
8. Bergström R. W., Viskanta R. Modeling of the effects of gaseous and particulate pollutants in the urban atmosphere, Part 1. Thermal structure. — J. Appl. Met., 1973, vol. 12, N 6, p. 901—912.

Е. Л. Генрихович, С. С. Чичерин

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАССЕИВАНИЯ ПРИМЕСИ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА ПРИ НОРМАЛЬНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Построение реалистической модели распространения в атмосфере примесей от промышленных источников, пригодной для аналитического использования, связано, как правило, с необходимостью численного решения уравнения турбулентной диффузии от линейного источника и табулирования полученного поля концентраций для различных сочетаний внешних параметров. В целях сокращения требуемого для этого объема вычислительных работ в [3] было предложено использовать так называемые формулы пересчета, которые позволяют переходить от значений концентраций, определяемых одним набором внешних метеорологических параметров, к значениям, соответствующим другому набору. В качестве входных данных при этом использовались скорость ветра u_1 и характеристика турбулентного обмена k_1 на фиксированном уровне $z=z_1$, параметр шероховатости z_0 , высота приземного слоя h , мощность M и высота H источника. Таким образом, в [3] метеорологические условия рассеивания примеси задавались, по сути дела, тремя внешними параметрами (u_1 , k_1 , h). Однако, хотя введение формул пересчета и сокращало число внешних параметров на единицу, количество аргументов, по которым производилось табулирование, оставалось достаточно большим, что затрудняло эффективное представление полученных результатов.

Дальнейшее сокращение числа независимых переменных оказалось возможным при изучении неблагоприятных метеорологических условий рассеивания примеси, когда для каждого параметра u_1 , k_1 и h придавались такие значения, при которых приземные концентрации максимальны. В результате была получена парапараметрическая модель, в которой метеорологические условия рассеивания примеси задаются единственным внешним параметром u_1 [4]. При таком подходе удалось осуществить наглядное представление решения в форме, пригодной для инженерных

расчетов (эта схема легла в основу нормативной методики [6]. Целью настоящей работы является развитие указанных подходов в случае двухпараметрической модели диффузии, в которой метеорологические условия задаются параметрами u_1 и k_1 . Эффективная аппроксимация вертикального профиля коэффициента турбулентного обмена k_z связана в этом случае с применением предложенной в [2] формулы для расчета высоты приземного слоя

$$h = \frac{k_1}{10f},$$

где $f = 2\omega \sin \varphi$ — параметр Кориолиса (ω — угловая скорость вращения Земли, φ — географическая широта). Выполненное в [7] сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов концентраций подтвердило применимость (1) для диффузионных задач.

Ограничимся рассмотрением легкой примеси, когда уравнение диффузии от линейного источника и краевые условия имеют в

$$u \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z},$$

$$q|_{x=0} = \frac{M}{u} \delta(z-H), \quad k_z \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad q|_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0,$$

где H и M — высота и мощность источника.

Модели для коэффициентов $u(z)$ и $k_z(z)$ выберем в соответствии с [1]:

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z+z_0}{z_0}}{\ln \frac{z_1+z_0}{z_0}},$$

$$k_z = \begin{cases} k_1(z+z_0) & \text{при } z \leq h \\ k_1(h+z_0) & \text{при } z > h, \end{cases}$$

где h определяется по формуле (1).

Приведем теперь (2) к безразмерному виду с помощью следующей подстановки:

$$\xi = \frac{k_1 \ln \frac{z_1+z_0}{z_0}}{u_1 h} x, \quad \zeta = \frac{z}{h}, \quad q = \frac{M \ln \frac{z_1+z_0}{z_0}}{u_1 h} \bar{q}.$$

Тогда получим

$$\ln \frac{\zeta+\zeta_0}{\zeta_0} \frac{\partial \bar{q}}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \zeta} p(\zeta) \frac{\partial \bar{q}}{\partial \zeta},$$

$$\bar{q}|_{\xi=0} = \frac{\partial(\zeta-\zeta_H)}{\ln \frac{\zeta+\zeta_0}{\zeta_0}}, \quad p(\zeta) \frac{\partial \bar{q}}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = 0, \quad \bar{q}|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow 0.$$

есъ

$$\zeta_H = \frac{H}{h}, \quad \zeta_0 = \frac{z_0}{h},$$

$$p(\zeta) = \begin{cases} \zeta + \zeta_0 & \text{при } \zeta \leq 1 \\ 1 + \zeta_0 & \text{при } \zeta > 1. \end{cases} \quad (7)$$

ли нам известно решение задачи (6) $\bar{q} = F(\xi, \zeta, \zeta_H, \zeta_0)$, то с учетом (5) и (1) можно получить выражение для концентрации от нейного источника:

$$q(x, z, u_1, k_1, H, z_0) = \frac{M f \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{u_1 k_1} \times \\ \times F\left(x \frac{f \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{u_1}, \frac{fz}{k_1}, \frac{fH}{k_1}, \frac{fz_0}{k_1}\right), \quad (8)$$

которого следует формула пересчета, аналогичная приведенной в [3],

$$q(x^{(1)}, z^{(1)}, u_1^{(1)}, k_1^{(1)}, H^{(1)}, z_0^{(1)}) = \\ = \frac{M^{(1)} u_1^{(2)} k_1^{(2)}}{M^{(2)} u_1^{(1)} k_1^{(1)}} a q\left(\frac{u_1^{(2)}}{u_1^{(1)}} a x^{(1)}, \lambda z^{(1)}, u_1^{(2)}, k_1^{(2)}, \lambda H^{(1)}, \lambda z_0^{(1)}\right), \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{k_1^{(2)}}{k_1^{(1)}}, \quad a = \frac{\ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{\ln \frac{z_1 + \lambda z_0}{\lambda z_0}}. \quad (10)$$

Для практических приложений прежде всего бывает необходимо определять приземные значения концентрации. В таком случае из (8) следует, что

$$q|_{z=0} = \frac{M f \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{u_1 k_1} F_1(\xi, \zeta_H, \zeta_0), \quad (11)$$

F_1 есть значение функции F при $\zeta=0$. При этом максимум названной концентрации определяется из условия $\frac{\partial F_1}{\partial \xi} = 0$, откуда получается выражение

$$\xi_m = \Phi_1(\zeta_H, \zeta_0) \quad (12)$$

и расстояния, на котором этот максимум достигается. Подстановка (12) в (11) дает формулу для расчета максимальной названной концентрации q_m :

$$q_m = \frac{M \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}}{u_1 H} \Phi_2(\zeta_H, \zeta_0). \quad (13)$$

Учитывая (12) и (13), из (11) получим

$$\left. \frac{q}{q_M} \right|_{z=0} = \Phi_3 \left(\frac{\xi}{\xi_M}, \zeta_H, \zeta_0 \right). \quad (1)$$

Форма представления решения в виде (12)–(14) выбрана аналогии с [1].

Для табулирования функций Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 задача (6) решалась численно на ЭВМ М-220 и БЭСМ-6. Результаты расчетов функций Φ_1 и Φ_2 в зависимости от параметров ζ_H и ζ_0 приведены на рис. Анализ этих результатов показывает, что в диапазоне изменен ζ_H от 0,2 до 10 и ζ_0 от 10^{-5} до 10^{-3} функции Φ_1 и Φ_2 слабо зависят от ζ_0 .

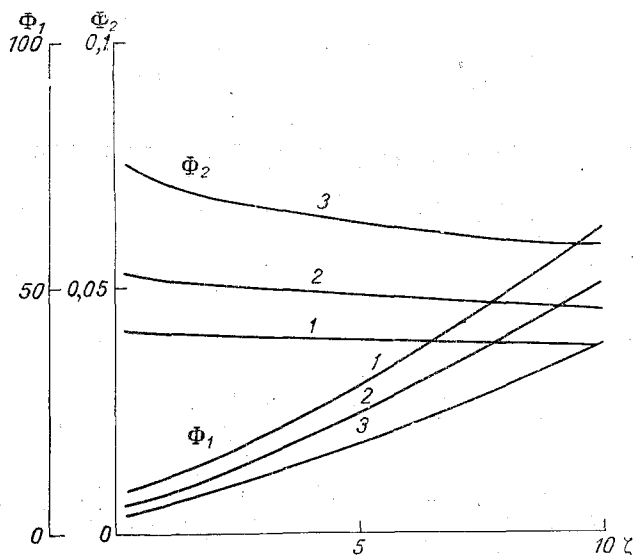


Рис. 1. Функции Φ_1 и Φ_2 при различных значениях ζ_0 .

1) $\zeta_0 = 10^{-5}$; 2) $\zeta_0 = 10^{-4}$; 3) $\zeta_0 = 10^{-3}$.

Расчеты показали, что характер функциональной зависимости $\Phi_3 \left(\frac{\xi}{\xi_M}, \zeta_H \right)$ практически не меняется, если параметр ζ_0 варьировать в широком диапазоне. Для значений ζ_H от 0,2 до 10 и параметра $\zeta_0 = 10^{-4}$ графики функций Φ_3 приведены на рис. 2. Из этого сунка видно, что графики функций $\Phi_3(\xi/\xi_M)$ при различных ζ_H располагаются между двумя кривыми, нижняя из которых соответствует уравнению

$$\Phi_3 = \frac{\xi_M}{\xi} e^{1 - \frac{\xi_M}{\xi}},$$

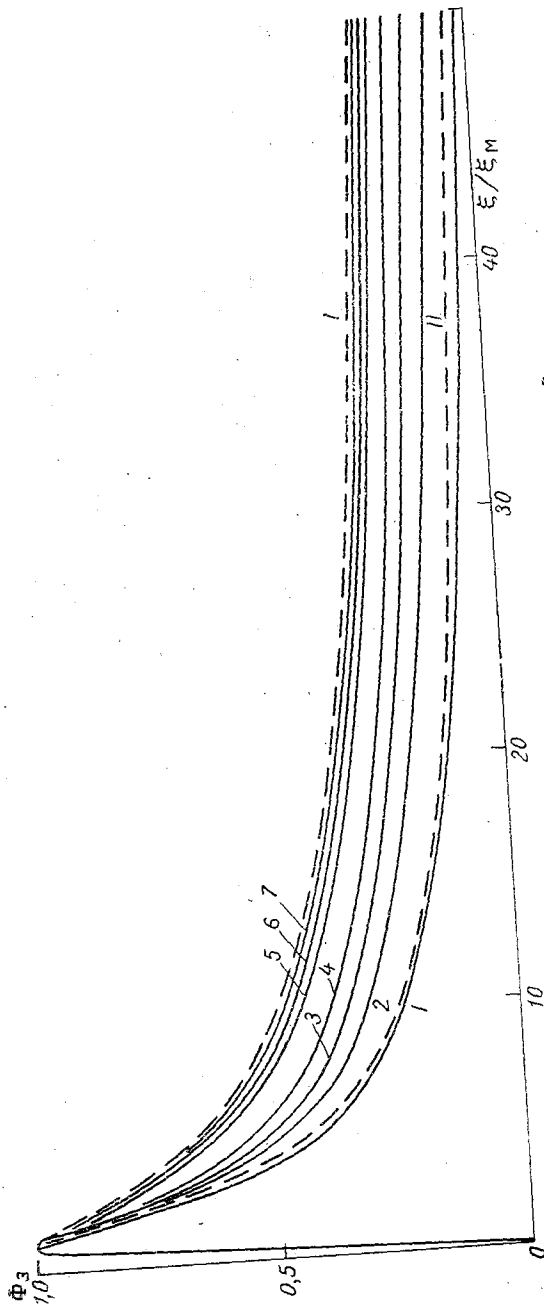


Рис. 2. Функция Φ_3 при различных значениях ξ_H .
 1) $\xi_H = 0.2$; 2) $\xi_H = 0.4$; 3) $\xi_H = 0.6$; 4) $\xi_H = 1$; 5) $\xi_H = 2$; 6) $\xi_H = 5$; 7) $\xi_H = 10$. I и II — кривые, рассчитанные соответственно по формулам (16) и (15).

а верхняя — уравнению

$$\Phi_3 = \left(\frac{\zeta_M}{\xi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\xi_M}{\xi} \right)}. \quad (16)$$

Эти формулы получены из решения (2) при степенных моделях для u и k_z [1], причем (15) относится к случаю линейно растущего k_z , а (16) — к случаю постоянных u и k_z .

Приведенные результаты могут быть использованы для расчета поля наземных концентраций от линейного источника высотой H в случаях, когда известна скорость ветра u_1 , коэффициент турбулентности k_1 и параметр шероховатости z_0 . Если примесь выбрасывается из источника с некоторой начальной скоростью или температура примеси значительно превышает температуру окружающего воздуха, то в качестве высоты источника H следует употреблять его эффективную высоту $H_э$, которая может быть рассчитана по [1]. При этом вычисления производятся в следующем порядке. Сначала определяются параметры $\zeta_H = \frac{10fH}{k_1}$ и $\zeta_0 = \frac{10fz_0}{k_1}$. Затем с помощью рис. 1 находятся значения Φ_1 и Φ_2 , а по формуле (13) определяется q_m — максимум наземной концентрации. После этого рассчитывается расстояние x_m от источника на котором этот максимум достигается

$$x_m = \frac{u_1 H}{k_1 \ln \frac{z_1 + z_0}{z_0}} \Phi_1(\zeta_H, \zeta_0). \quad (17)$$

Для любого расстояния $x \neq x_m$ по значению отношения $\frac{x}{x_m} = \frac{\zeta}{\zeta_m}$ и ζ_H с помощью рис. 2 определяется Φ_3 и по формуле

$$q = q_m \Phi_3 \quad (18)$$

рассчитывается наземная концентрация q .

Переход к концентрациям от точечного источника может быть выполнен с помощью соотношений, приведенных в [1].

В заключение отметим, что изложенные результаты могут быть использованы при решении некоторых практически важных задач атмосферной диффузии, например, таких, как расчет средних концентраций или изучение рассеивания примесей при конкретных метеорологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1975, 448 с.
2. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л. Особенности турбулентной диффузии и загрязнение воздуха в условиях стратифицированной атмосферы. Международный симпозиум по стратифицированным течениям. — Новосибирск: Изд. ВЦ СО АН СССР, 1972, 22 с.

- Берлянд М. Е. и др. Численное исследование атмосферной диффузии при нормальных и аномальных условиях стратификации/Берлянд М. Е., Генрихович Е. Л., Ложкина В. П., Оникул Р. И.—Труды ГГО, 1964, вып. 158, с. 22—32.
- Берлянд М. Е., Оникул Р. И. Физические основы расчета рассеивания в атмосфере промышленных выбросов.—Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 3—27.
- Генрихович Е. Л., Чичерин С. С. К сравнению результатов расчета вертикальных распределений концентраций примеси с данными измерений.—Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 37—40.
- Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369—74.—М.: Стройиздат, 1975. 41 с.
- Shiermeirer F. A., Niemeyer L. E. Large power plant effluent study (LAPPES).—U. S. Department of Health, Education, and Welfare. Raleigh, North Carolina, June 1970. 410'p.

В. С. Андреев, Н. С. Буренин, Б. Б. Горошко, Г. А. Панфилов

**РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
И РАСЧЕТНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ В РАЙОНЕ
ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВЫСОТОЙ ВЫБРОСА
320 м**

На современном этапе возрастающая потребность народного хозяйства в энергии приводит к созданию тепловых электростанций большой мощности. Это в свою очередь обуславливает и увеличение выбросов вредных веществ в атмосферу, а следовательно, при определенных метеорологических условиях и уровня загрязнения воздуха в районе их расположения. В связи с тем, что существующие способы очистки выбросов от вредных газообразных примесей, образующихся при сжигании топлива на тепловых электростанциях, недостаточно эффективны, важное значение приобретают косвенные способы уменьшения приземных концентраций. Таким способом может быть увеличение высоты выброса вредных веществ, что обеспечивает рассеивание примесей в больших объемах воздуха и снижение уровня концентраций.

В течение ряда лет в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова проводился широкий комплекс экспериментальных исследований распространения вредных веществ в атмосфере под факелами тепловых электростанций [1, 2, 5—8]. Полученные обширные материалы позволили проверить теоретические модели расчета максимальных концентраций вредных веществ в приземном слое атмосферы, возникающих под факелами промышленных источников. С учетом результатов этих работ были составлены Указания [10], которые в настоящее время являются нормативным документом при проектировании и эксплуатации промышленных предприятий. Необходимо отметить, что теоретические модели и окончательные расчетные формулы, изложенные в [10], проверялись в основном по материалам, полученным в районах источников с выбросом вредных веществ на высоту до 120 м и в отдельных случаях до 150 и 250 м.

Однако в настоящее время построены тепловые электростанции, на которых отработанные газы выбрасываются в атмосфере

на высоте более 300 м. В связи с этим возникла необходимость получить экспериментальные данные, которые бы позволили произвести проверку расчетных формул при более высоком выбросе вредных веществ в атмосферу.

В качестве объекта исследований была выбрана тепловая электростанция с двумя трубами высотой 320 м, в районе которой в летний период в 1976—1977 гг. проводились экспериментальные работы по изучению распространения вредных примесей в зоне от 0,5 до 15—20 км под факелом в районе ГРЭС. В них принимали участие наряду с ГГО следующие организации: Московский энергетический институт, НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана, институт экспериментальной метеорологии и др.

Не останавливаясь детально на программе эксперимента, подробно изложенной в работе [7], отметим, что она включала в себя три основных раздела: измерение поля концентраций под факелом тепловой электростанции, метеорологические и аэрологические наблюдения и определение характеристик выброса. В отличие от ранее проводимых подобных экспериментальных работ впервые более детально изучалось содержание сернистых соединений и окислов азота в воздухе. В этом плане одновременно с измерением суммы сернистых соединений по нефелометрической методике [4] определялось содержание сернистого газа с использованием сорбционных трубок и аэрозоля серной кислоты [3]. Пробы на сульфат-ион брались на фильтры из ткани ФПП-15. Фильтры помещались в специальный патрон, который устанавливался перед сорбционной трубкой для отбора проб на сернистый газ. Продолжительность отбора одной пробы составляла 60—80 мин, что обеспечивало протягивание необходимого объема воздуха для определения сульфат-иона. Таким образом, за период отбора одной пробы на сульфат-ион производился отбор трех-четырех проб на сернистый газ. Одновременно под факелом ГРЭС определялось содержание двуокиси азота по колориметрическому методу с использованием реактива Грисса [4] и окиси азота с отбором на сорбционные трубки [9]. Для измерения содержания сернистого газа в воздухе использовались не только ручные химические методы, но и автоматические газоанализаторы, которые были установлены стационарно на расстоянии около 6 км от ГРЭС, где согласно расчетам ожидался максимум концентраций в приземном слое атмосферы.

Рассмотрим распределение измеренных концентраций сернистого газа и окислов азота по мере удаления от источника выброса в приземном слое атмосферы и их соответствие расчетным значениям. Необходимо отметить, что экспериментальные данные удалось получить при различной мощности тепловой электростанции благодаря тому, что в период проведения экспедиционных работ в 1976 г. мощность ГРЭС была на 30% меньше, чем в 1977 г. Таким образом, полученные результаты позволили произвести сравнения фактических и расчетных концентраций при различной нагрузке электростанции, что также представляет зна-

чительный интерес. Тот факт, что концентрации под факелом в эти годы измерялись в летний период и при сходных метеорологических условиях, позволяет оценить тенденцию изменения уровней концентраций в зависимости от выброса вредных веществ.

Вместе с тем измерения, проведенные с наветренной и с подветренной сторон источника на близких расстояниях (начина

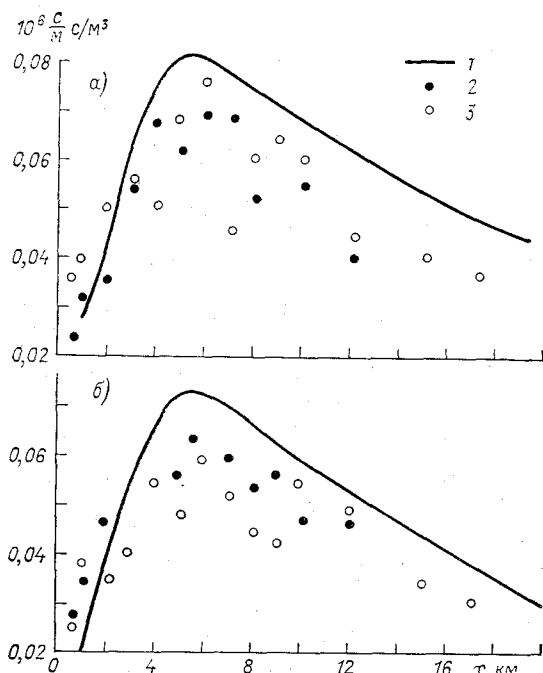


Рис. 1. Распределение максимальных концентраций сернистого газа (а) и двуокиси азота (б) под факелом ГРЭС, рассчитанных (1) и полученных экспериментально в 1976 г. (2) и в 1977 г. (3) (нормированные на выброс).

с 500 м), показали, что вблизи ГРЭС за счет неорганизованных выбросов и локальных источников существует значительный фон загрязнения. Исходя из экспериментальных данных, его значение было принято равным $0,1 \text{ мг/м}^3$ для сернистого газа и $0,035 \text{ мг/м}^3$ для двуокиси азота, что учитывалось при расчетах максимальных концентраций на близких дистанциях. На дальних расстояниях как показали экспериментальные данные, влияние фонового загрязнения незначительно и основной вклад в загрязнение атмосферы вносит ГРЭС.

На рис. 1 а представлены теоретические и экспериментальные данные о распределении нормированных на выброс максимальных концентраций сернистого газа по мере удаления от источника. Из него следует, что имеет место удовлетворительное согласование расчетных и измеренных величин концентрации при различных режимах нагрузки электростанции.

На рис. 1 б представлены данные для двуокиси азота. Изменения концентраций двуокиси азота аналогичны изменениям концентраций сернистого газа, т. е. на близких расстояниях тоже сказывается сильное влияние неорганизованных и низких выбросов. Необходимо отметить, что в выбросах ГРЭС содержится значительное количество окислов азота, поэтому концентрации их в приземном слое атмосферы только в 4 раза меньше концентраций сернистого газа.

Из выполненных расчетов по фактическим данным о параметрах выбросов в 1976—1977 гг. следует, что расстояния, на которых концентрации окислов серы и азота достигают максимальных значений, составляют 5,5—6,0 км. Из рис. 1 видно, что они в общем хорошо согласуются с положением зон максимальных концентраций, полученных по экспериментальным данным. Максимальные концентрации отмечаются на расстояниях от 4 до 7 км, при этом более часто они наблюдаются на 6 км. Это, по-видимому, объясняется тем, что на расстояниях 4—5 км влияние фона от ГРЭС может быть еще весьма заметным, в то время как на дистанциях 6—7 км оно уже незначительно и уровень приземных концентраций обуславливается исключительно организованными выбросами ГРЭС.

Полученные по расчетам значения опасной скорости ветра составляют 5,0—5,7 м/с. Так как для летних месяцев 1976—1977 гг., течение которых проводились исследования, средняя скорость ветра составляет 3,3 м/с и повторяемость скоростей ветра 5—6 м/с не превышает 15% (по многолетним климатическим данным), то можно считать, что вероятность неблагоприятных метеорологических условий, обуславливающих возникновение высоких уровней загрязнения, сравнительно мала в этот период года.

Таким образом, представленные выше результаты сопоставления данных расчета и эксперимента с учетом погрешностей изменения поля концентраций и неточностей определения параметров выброса позволяет заключить, что теоретическая модель рассеивания примесей хорошо описывает реальное распределение концентраций вредных веществ под факелом источника с высотой выброса 320 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белугина В. А. и др. Исследование распространения вредных примесей в районе высоких источников выброса/Белугина В. А., Буренин Н. С., Великая П. И., Горошко Б. Б. — Труды ГГО, 1971, вып. 254, с. 81—86.
Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1975. 448 с.

3. Вольберг Н. С., Тульчинская З. Г. Определение сернистого газа в полевых условиях с использованием сорбционных трубок.— Труды ГГО 1977, вып. 387, с. 134—137.
4. Временные методические указания по определению содержания примесей в атмосфере.— Л.: Гидрометеониздат, 1971, с. 78.
5. Гильденскиольд Р. С. и др. Результаты экспериментальных исследований загрязнения атмосферы в районе Молдавской ГРЭС/Гильденскиольд Р. С., Горошко Б. Б., Панфилова Г. А., Рихтер Б. В.— Труды ГГО, 1968, вып. 207, с. 65—68.
6. Гильденскиольд Р. С., Захариев В. И., Горошко Б. Б. Постановка эксперимента по изучению распространения примесей в атмосфере в условиях сложного рельефа.— Труды ГГО, 1976, вып. 373, с. 16—28.
7. Горошко Б. Б. Постановка экспериментальных работ по изучению распространения вредных примесей от мощных источников.— Труды ГГО 1968, вып. 234, с. 109—115.
8. Оникул Р. И. и др. Результаты анализа экспериментальных данных характеризующих распределение атмосферных загрязнений вблизи тепловых электростанций.— Труды ГГО, 1965, вып. 172, с. 23—34.
9. Павленко А. А., Вольберг Н. С. Использование твердых сорбентов при определении окислов азота.— См. наст. сборник.
10. Указания по расчету рассеивания в атмосфере вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. СН-369-74.— М.: Стройиздат, 1974, 41 с.

Б. Н. Пьянцев, Л. Р. Сонькин, В. А. Храпаченко

ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРИОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ВЫСОКОГО УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Изучение условий длительного сохранения высокого уровня загрязнения атмосферы в течение нескольких дней представляет значительный интерес с точки зрения прогнозирования опасных периодов с целью защиты атмосферы городов. Известно, что опасность от создавшегося высокого уровня загрязнения атмосферы возрастает пропорционально времени, в течение которого этот уровень сохраняется.

Для характеристики удобно использовать введенный ранее параметр P [3, 4], который указывает, какая часть от общего числа выполненных за день измерений является существенно повышенной (более чем в 1,5 раза выше среднесезонной концентрации). Среднее значение параметра P по данным ряда городов близко к 0,2.

Рассмотрена плотность распределения параметра P . Существенным оказалось отсутствие заметного различия летнего и зимнего распределения. Дни с относительно высоким уровнем загрязнения воздуха (с $P \geq 0,3$) примерно в 10 раз вероятнее в течение всех месяцев года и составляют 20—25%. На рис. 1 приводятся гистограммы параметра P , построенные по материалам Читы и Ленинграда.

В ранее выполненных работах [3—5] изучались условия формирования высокого уровня загрязнения воздуха по городу

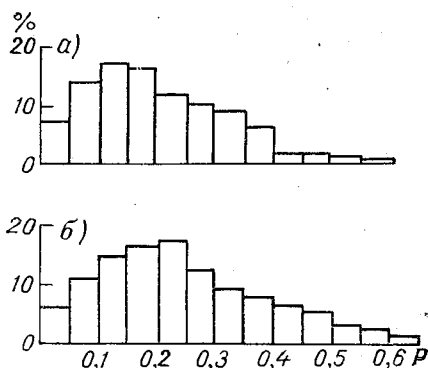


Рис. 1. Гистограммы параметра P для Читы (а) и Ленинграда (б).

в целом независимо от его длительности. Задачей настоящего исследования является изучение периодов продолжительного сохранения относительно высокого уровня загрязнения воздуха на территории городов. Возможность формирования таких периодов связана с длительным сохранением неблагоприятных метеоусловий и с проявлением инерционного фактора. Условно периодом высокого уровня загрязнения атмосферы в городе будем считать промежуток времени, когда в течение 3 дней и более $P \geq 0,30$. Выбор трехдневного периода связан с характерным временем элементарного синоптического процесса. Вместе с тем такая минимальная продолжительность необходима при скользящем графике наблюдений за концентрацией. Период 2 дня является в этом смысле недостаточно показательным, поскольку промежуток времени, охв

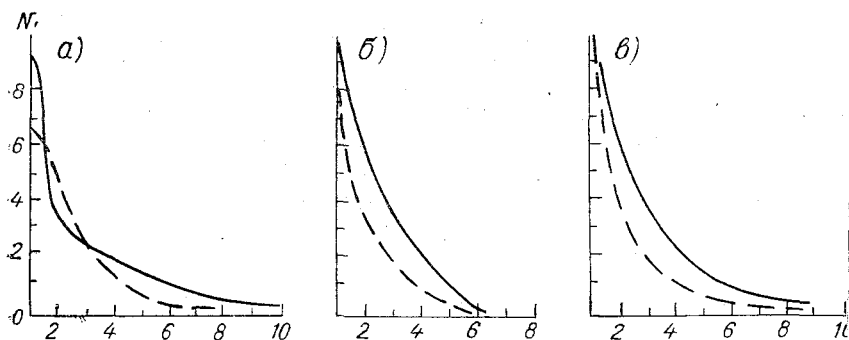


Рис. 2. Среднесезонное количество периодов ($N_{ср}$) в зависимости от их продолжительности (R) зимой (1) и летом (2).

а — Чита, б — Ленинград, в — все города вместе.

тывающий текущие наблюдения во вторую половину дня и следующие — в первую, является слишком коротким, а корреляция между соответствующими характеристиками загрязнения в духа велика. В то же время трехдневный период с высокими значениями параметра P с большой вероятностью может быть связан с устойчивыми во времени макросиноптическими процессами.

Для решения поставленной задачи были обработаны и анализированы материалы наблюдений за 3—7 лет 10 городов расположенных в различных частях Советского Союза.

На рис. 2 по данным Ленинграда и Читы, а также всех городов вместе представлено среднее количество периодов длительностью, равной или превышающей заданное число дней, отдельно для зимнего и летнего сезонов. Как видно из рисунка, продолжительность периодов в Чите больше, чем в Ленинграде и в среднем по всем городам, особенно в зимний сезон. Это, по-видимому, связано с длительным сохранением неблагоприятной теорологической ситуации и в первую очередь в связи с фор

ванием сибирского максимума. Среднее количество периодов высокого уровня загрязнения воздуха в течение сезона близко двум (табл. 1). При этом четкого географического распределения частоты таких периодов не прослеживается.

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что зимой повторяемость длительных периодов высокого загрязнения воздуха несколько выше, чем летом. Имеются, однако, исключения. Так, в Мурманске летом частота формирования таких периодов больше, чем зимой. Это

Таблица 1

среднесезонное количество периодов с $P \geq 3$ в течение 3 дней и более

Город	Зима	Лето	Город	Зима	Лето
Мурманск	1,7	2,8	Свердловск	1,6	1,5
Ленинград	3,2	2,1	Ташкент	1,0	3,1
Волгоград	1,0	1,0	Алма-Ата	2,2	0,8
Донецк	1,3	0,7	Красноярск	2,5	2,0
Ижевск	2,7	2,8	Чита	2,2	2,2

может быть связано с тем, что здесь летом при ослабленной активности синоптических процессов повышается устойчивость атмосферы (в связи с местоположением города на берегу полярного моря). Такое же сезонное соотношение частоты длительных периодов высокого уровня загрязнения воздуха отмечается и в Ташкенте. В этом районе повышенная устойчивость нижнего слоя атмосферы в летний сезон (в частности, за счет орошения) сопровождается длительными периодами высокой температуры воздуха, что способствует повышению уровня загрязнения [2].

В большинстве районов страны продолжительное сохранение опасных метеорологических условий зимой отмечается чаще, чем летом, что определяет частоту формирования периодов высокого загрязнения воздуха в городах.

Неблагоприятное влияние продолжительных периодов связано не только с длительностью сохра-

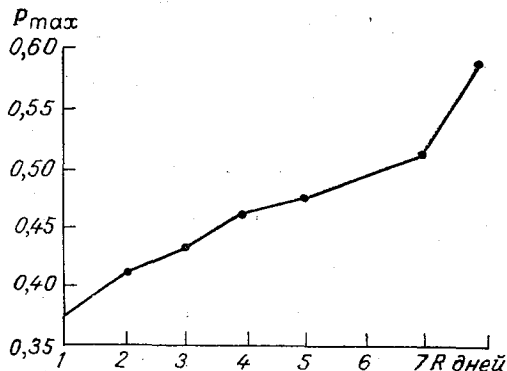


Рис. 3. Средний максимум параметра P в зависимости от длительности периодов R .

нения высоких концентраций примесей в городском воздухе, и с тем, что с увеличением числа дней с $P \geq 0,3$ возрастает уровень загрязнения атмосферы. Это видно из рис. 3, где приводятся по всем рассмотренным материалам значения среднего максимального параметра P в зависимости от длительности периодов.

Существенным является то обстоятельство, что в группе близлежащих городов, находящихся под влиянием одинаковых метеорологических условий, наблюдаются одновременные длительные периоды высокого уровня загрязнения. Это видно из анализа материала наблюдений за концентрациями примесей в трех городах Донбасса (Донецк, Макеевке и Горловке).

Таблица 2
Коэффициенты линейной корреляции между значениями параметра P в различных городах

Города	Зима	Весна
Донецк-Горловка	0,90	0,60
Донецк-Макеевка	0,79	0,48

Так, коэффициенты линейной корреляции между значениями параметра P , вычисленными по данным указанных трех городов, оказались достаточно высокими (табл. 2).

Следует отметить, что устойчивая положительная связь была найдена и между концентрациями примесей, которые были измерены в этих же городах [1].

Столь значительная корреляция указывает на наличие тенденции к одновременному изменению уровня загрязнения воздуха в рассматриваемом промышленном районе особенно в зимний сезон (табл. 3).

Из таблицы видно, что если в одном из городов $P \geq 0,3$, в большинстве случаев повышенное загрязнение воздуха формируется в двух других городах и почти всегда хотя бы в одном из них. Неслучайность данного вывода очевидна, если иметь в виду, что вероятность $P > 0,2$ составляет 50%, а одновременного осуществления $P > 0,2$ в двух городах — 25%. Оценка значимости с использованием биномиального распределения указывает на то, что неслучайность одновременного формирования повышенного загрязнения в трех городах близка к 100%.

Таблица 3
Частота повышенного загрязнения воздуха в трех городах одновременно

Город	Число случаев с $P \geq 0,30$	Из них с $P > 0,2$	
		Одновременно еще в одном городе	Одновременно еще в двух городах
Донецк	16	15	9
Горловка	18	15	8
Макеевка	16	13	9

Рассмотрена связь временных рядов параметра P городов Онеца и расположенного в 250 км к западу от него Днепротровска. Коэффициент линейной корреляции параметра P за зимние периоды нескольких лет составил 0,31. Такая связь указывает на протекание в этом районе отдельных крупномасштабных синоптических процессов с неблагоприятными метеоусловиями, которые обуславливают формирование одновременных периодов относительно высокого уровня загрязнения атмосферы в промышленных центрах, рассредоточенных на значительных площадях.

С точки зрения практического прогнозирования периодов относительно высокого уровня загрязнения воздуха представляет интерес вопрос об их возможном повторении после окончания предыдущего. Этот вопрос был рассмотрен по материалам Ленинграда и Свердловска с использованием данных о 60 периодах. Выяснилось, что после их окончания в большинстве случаев (особенно зимой) высокое загрязнение воздуха вновь формируется в промежутке от 1 до 6 дней (табл. 4).

Таблица 4

Вероятность (%) формирования
высокого загрязнения воздуха ($P \geq 0,3$)
в течение 6 дней после окончания
предыдущего периода

Город	Зима	Лето
Ленинград	90	64
Свердловск	82	74

Следует, однако, отметить, что большинство этих периодов оказались короткими и только в 13 случаях из 118 длительность достигала или превышала 3 дня.

Все представленные сведения о продолжительности и повторяемости периодов высокого уровня загрязнения воздуха полезны для изучения возможностей из прогнозирования.

В частности, эти данные большое значение имеют в тех случаях, когда необходимо знать, как часто в городах принимать меры для предотвращения случаев высокого уровня загрязнения атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А. Н., Горошко Б. Б., Пьянцев Б. Н. Некоторые особенности распределения примесей от промышленных центров. — Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 67—73.
- Роскина Ю. Я., Церфас К. Э. Метеорологические условия повышенного загрязнения воздуха в районе одиночных источников. — В кн.: Проблемы контроля и обеспечения чистоты атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
- Сонькин Л. Р., Денисова Т. П. Метеорологические условия периодов интенсивного загрязнения воздуха в городах. — Труды ГГО, 1969, вып. 238, с. 33—41.
- Сонькин Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе. — Труды ГГО, 1971, вып. 254, с. 121—132.
- Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения воздуха в городах. — Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 42—51.

*Э. Ю. Безуглая, Н. Н. Бороздина, Л. А. Лаврова,
З. И. Макроусова, Л. И. Онуфрига*

ВЫСОТА СЛОЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

При оценке потенциала загрязнения атмосферы в ряде зарубежных работ [3] в качестве одной из характеристик устойчивости пограничного слоя атмосферы используется понятие «высота слоя перемешивания». В слое перемешивания наблюдаются интенсивные вертикальные движения, вызванные радиационным нагреванием, при этом вертикальный градиент температуры приближается к сухадиабатическому или превышает его. Высота слоя перемешивания определяется по ежедневным данным аэрологического зондирования атмосферы и максимальной температуре за сутки, полученной по метеорологическим наблюдениям. На аэрологической диаграмме находится точка пересечения кривой вертикального распределения температуры в ночной срок с линией проходящей по сухой адиабате через точку максимума температуры. Проекция этой точки на ось ординат дает максимальную за сутки высоту перемешивания.

Известно, что повышение концентрации примесей в атмосфере обычно наблюдается при уменьшении слоя перемешивания [1]. Периоды высокого загрязнения часто связаны с высотой этого слоя менее 1500 м. Влияние высоты слоя перемешивания на степень загрязнения воздуха городов было проанализировано при выполнении данной работы.

По данным наблюдений в Иркутске в 1968 г. была рассчитана средняя концентрация сернистого газа при скорости ветра 0–1 м/с и высоте слоя перемешивания (H) ниже 1 км и выше 1 км. Отношение концентрации сернистого газа при $H \leq 1$ км к значению при $H > 1$ км составило 1,78 на пункте 1 и 3,00 на пункте 2, т. е. при низких высотах перемешивания концентрация была в 2–3 раза выше, чем при высоких.

Для летних месяцев (V–VIII) 1968–1970 гг. по данным наблюдений в Свердловске и Куйбышеве была подсчитана вероятность дней с повышенным загрязнением воздуха ($P \geq 0,25$

асчет P производился по методике, изложенной в [2]. Для этих месяцев определялась высота перемешивания — среднее значение из ежедневных данных. Получено, что случаи с повышенным загрязнением воздуха практически не наблюдаются при высоте перемешивания более 1,5—2,0 км (рис. 1).

В связи с существенным влиянием высоты слоя перемешивания на уровень загрязнения воздуха выполнено климатическое изучение этой характеристики.

В течение последних лет территориальными УГКС под методическим руководством ГГО проводится работа по изучению характеристик потенциала загрязнения воздуха. В УГКС были рассчитаны средние за 10-летний период (1959—1968 гг.) значения высоты слоя перемешивания по данным 55 аэрологических станций, расположенных в различных районах Советского Союза. Для некоторых городов эти данные приведены в табл. 1.

Анализ данных за отдельные месяцы показывает, что над территорией СССР отмечаются существенные различия в средних значениях высоты слоя перемешивания, но характер сезонных изменений в большинстве случаев почти одинаков: максимум отмечается летом, в июне — в августе или в мае, минимум зимой, в декабре или январе.

При низких высотах перемешивания отмечается наибольшая повторяемость значений $H \leq 0,5$ км и наоборот. В летние месяцы средняя высота слоя перемешивания в 2—3 раза выше, чем зимой. Летом самые большие высоты слоя перемешивания (1,7—3,2 км) наблюдаются в горных районах и пустынях Средней Азии, в предгорьях Алтая и в Закавказье, на побережьях Балтийского, Каспийского и Баренцева морей несколько меньшие (до 1,3 км), самые низкие (0,5—0,7 км) также на побережьях Берингова, Охотского и Японского морей. Во всей остальной территории СССР высоты слоя перемешивания составляют в летние месяцы 1,2—1,4 км.

Распределение по территории страны повторяемости высот

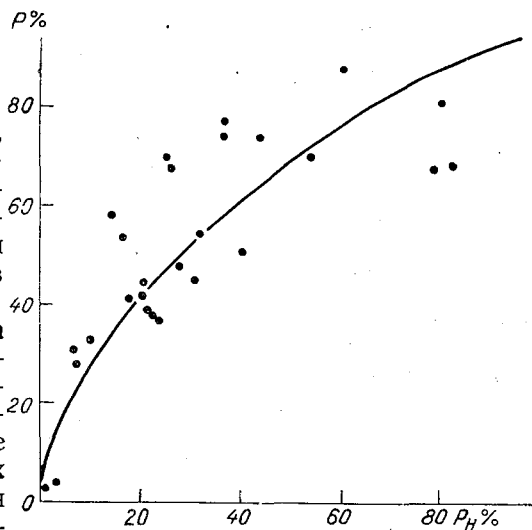


Рис. 1. Повторяемость дней с повышенным загрязнением воздуха P при различной повторяемости высоты слоя перемешивания меньше 0,5 км ($P_H \leq 0,5$) в летние месяцы.

Годовой ход высоты слоя перемешивания H (км)

Город	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Архангельск	0,32	0,36	0,63	1,01	1,38	1,53	1,40	1,10	0,76	0,51	0,32	0,31
Анадырь	0,29	0,22	0,26	0,36	0,42	0,54	0,64	0,64	0,54	0,27	0,24	0,24
Баку	0,65	0,68	0,69	0,77	0,86	1,01	1,04	1,11	1,02	0,94	0,69	0,60
Брест	0,30	0,54	0,95	1,22	1,39	1,53	1,54	1,36	1,24	0,84	0,40	0,29
Ивдель	0,47	0,67	0,96	1,59	1,94	1,87	1,69	1,60	1,17	0,73	0,54	0,43
Калининград	0,33	0,42	0,66	0,93	1,13	1,28	1,21	1,13	0,87	0,65	0,39	0,31
Ключи	0,53	0,63	0,94	1,22	1,33	1,45	1,35	1,35	1,29	1,04	0,72	0,59
Махачкала	0,47	0,52	0,60	0,64	0,68	0,90	0,90	0,89	0,85	0,79	0,60	0,47
Пермь	0,58	0,54	0,78	1,16	0,66	1,68	1,46	1,16	1,07	0,68	0,50	0,50
Свердловск	0,59	0,61	0,85	1,19	1,58	1,60	1,40	1,20	0,91	0,77	0,52	0,50
Ташкент	0,61	0,87	1,39	1,63	2,23	2,57	2,51	2,17	1,72	1,37	0,88	0,54
Уфа	0,62	0,55	0,69	1,41	1,92	1,76	1,72	1,60	1,44	0,84	0,59	0,55
Хабаровск	0,40	0,60	0,80	1,20	1,40	1,20	1,10	1,00	1,10	1,00	0,80	0,50
Якутск	0,12	0,21	0,54	1,03	1,48	1,05	1,44	1,22	0,92	0,57	0,28	0,12

юя перемешивания $\leq 0,5$ км имеет противоположный характер. етом в местах, где большие высоты слоя перемешивания, пораемость $H \leq 0,5$ км очень мала. Так, летом в горных районах пустынях Средней Азии, в Поволжье, в предгорьях Алтая, в Закавказье отмечается наименьшая повторяемость этой характеристики. Низкие высоты слоя перемешивания в летнее время чаще на побережье морей (Рига, Архангельск, Ленкорань, Баку, Магачкала). Но особенно часты они на Дальнем Востоке, где повторяемость низких высот составляет 40—55% (Анадырь, бухта Гагаева, Николаевск-на-Амуре, Владивосток).

Зимой наименьшие высоты слоя перемешивания (0,1—0,3 км) встречаются в Якутии, на севере и северо-западе ЕТС и на Урале (Иркутск, Печора, Ленинград, Каунас, Калининград, Брест). Высокие ее значения наблюдаются в пустынях и горных районах Средней Азии, на Дальнем Востоке, в предгорьях Алтая и Восточных Саян (Ашхабад, Джала-лабад, Владивосток, Красноярск).

Зимой повторяемость высот слоя перемешивания $\leq 0,5$ км по территории Советского Союза изменяется более заметно. Наибольшие ее значения отмечают в Якутии — 99%. В Средней Азии повторяемость таких высот слоя перемешивания составляет 2—34%, а на Дальнем Востоке — 13—29%. Повторяемость высот $\leq 0,5$ км, составляющая 40—50%, характерна для Каспийского побережья и Закавказья. Станции, расположенные на ЕТС, характеризуются наиболее однородными чертами, максимумом высоты слоя перемешивания 2—2,2 км и минимумом высоты слоя перемешивания 0,2—0,6 км.

Над Уралом и Предуральем высоты слоя перемешивания меняются в меньших пределах: от 2—1,8 км в мае—июне до 2—0,4 км в декабре. Диапазон изменения максимальных и минимальных значений высот слоя перемешивания на территории Сибири весьма широк, особенно по сравнению с ЕТС: максимальные высоты изменяются в пределах от 1,2 до 2,2 км

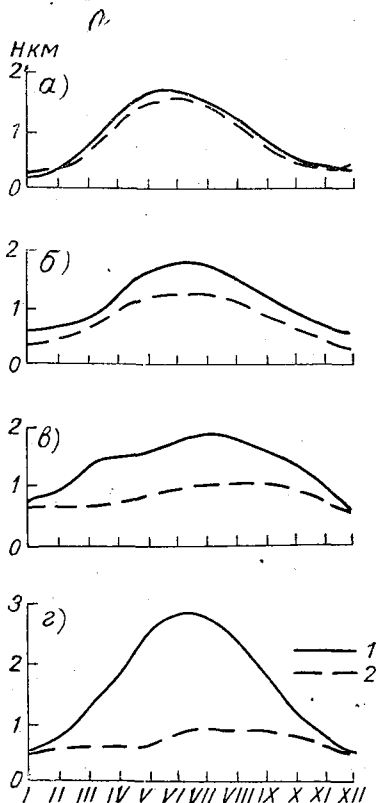


Рис. 2. Годовой ход высоты слоя перемешивания на континентальных (1) и морских (2) станциях. а — Архангельск и Печора, б — Смоленск и Калининград, в — Ереван и Баку, г — Тамды и Магачкала.

и от 2,4 до 2,6 км, минимальные — от 0,1 до 0,8 км. В горах Средней Азии в течение всего года отмечается на большая высота перемешивания. Максимальные значения составляют 2,4—3,4 км, минимальные 0,8—1,8 км.

На Дальнем Востоке наблюдается годовой ход с двумя максимумами высоты слоя перемешивания: основным — весной и дополнительным — осенью и двумя минимумами — летом и зимой. Значения высот слоя перемешивания на Дальнем Востоке весной меняются в пределах 1,0—1,4 км, летом — в пределах 0,8—1,2 км.

На высоту слоя перемешивания в значительной мере оказывает влияние близость к морю. На побережье годовой ход высот слоя перемешивания заметно сглажен по сравнению с более континентальной или горной местностью, иначе говоря, амплитуда годового хода больше на континентальных станциях.

На рис. 2 представлено изменение высоты перемешивания в течение года на парах станций, одна из которых находится на побережье, другая — в континентальной части территории (обе станции расположены на одной широте). Между морской и континентальной местностью отмечается различие в высотах слоя перемешивания, особенно в летние месяцы, причем к северу оно уменьшается. На широте 65° с. ш. разница высот слоя перемешивания не превышает 0,1—0,2 км (Архангельск — Печора). В Калининграде высота слоя перемешивания летом на 0,4—0,5 км меньше, чем в Смоленске (около 55° с. ш.). С уменьшением широты места разница высот слоя перемешивания возрастает до 0,6—0,8 км и южнее 45° с. ш. становится заметной во все месяцы года.

Высота слоя перемешивания существенно зависит от географической широты. Такая зависимость отмечается для всей территории СССР и в течение всего года. Так, например, в Предуралье высоты слоя перемешивания увеличиваются в мае от 1,56 км в Печоре до 1,66 км в Перми и 1,92 км в Уфе, в январе — от 0,28 до 0,58 и 0,62 км соответственно.

В центральной части, на севере ЕТС высоты слоя перемешивания к югу в июле изменяются от 1,20 км (Вологда) до 1,68 км (Тамбов) и до 1,92 км (Калач), в сентябре — от 0,85 до 1,15 и 1,54 км соответственно. На Дальнем Востоке в ноябре они растут от 0,24 км в Анадыре до 0,52 км в б. Нагаева и 0,6 км в Комсомольске-на-Амуре. Следует отметить, что на более южных станциях в мае и во все летние месяцы высоты слоя перемешивания близки к максимуму и больше по величине, чем для северных (последние имеют более четко выраженный максимум).

На высоту слоя перемешивания оказывает влияние рельеф местности. Косвенно эта зависимость проявляется в связи высот слоя перемешивания с высотой над уровнем моря. Эта связь особенно заметна для станций Урала и Предуралья, причем в данном случае высота над уровнем моря влияет на высоту слоя перемешивания больше, чем широта места. Так, Свердловск, расположенный на высоте 286 м, и Пермь, находящаяся на высоте

70 м, имеют высоты слоя перемешивания соответственно 1,37 и 1,42 км, в то время как для Кургана (высота 72 м над ур. м.)

Ивделя (высота 94 м над ур. м.) характерны высоты перемешивания 1,80 и 1,72 км.

Зависимость высоты слоя перемешивания от широты места, близости к морю обуславливается количеством поступающей солнечной радиации. Как известно, высота перемешивания определяется стадией развития конвективных движений, которые в свою очередь зависят от степени прогрева подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы. С ростом широты места к северу количество прямой радиации уменьшается, поэтому следует ожидать снижения высоты слоя перемешивания, что и наблюдается в действительности. Так, при прямой радиации, в 12 ч равной 0,40—0,50 кал/(см²·мин), высота перемешивания составляет 1,00—1,20 км (Таллин, Петрозаводск), при 0,60—0,70 кал/(см²·мин) она равна 1,4—1,9 км (Казань, Куйбышев).

На побережье морей обычно наблюдается повышенная облачность, поэтому поступает меньше прямой радиации, высоты перемешивания здесь тоже ниже. Связь высоты перемешивания с радиацией прослеживается в течение всего года. Так, на примере Владивостока видно (рис. 3), то годовое ход высоты слоя перемешивания полностью повторяет годовое ход солнечной радиации.

Проведенный анализ показывает значительную изменчивость высоты слоя перемешивания, зависимость ее от многих факторов, поэтому при использовании этой характеристики для прогноза загрязнения атмосферы следует устанавливать для разных зон свои пределы изменения H для условий повышенного или пониженного уровней загрязнения. Она может служить также как дополнительная характеристика при изучении потенциала загрязнения атмосферы на территории СССР.

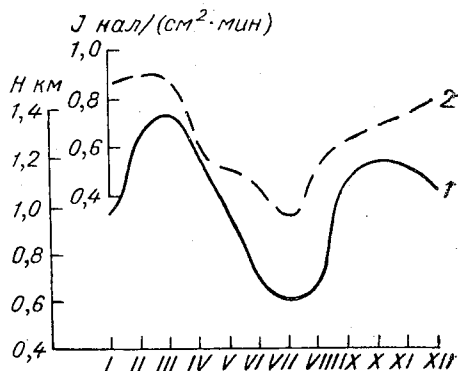


Рис. 3. Годовой ход высоты слоя перемешивания (1) и прямой солнечной радиации (2) во Владивостоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Гидрометеиздат, Л.: 1975, с. 448.
 Сонькин Л. Р. Вопросы прогнозирования фонового загрязнения атмосферы в городах. — Труды ГГО, 1974, вып. 314, с. 42—51.
 Holzworth G. C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. — Mon. Wea. Rev., 1964, vol. 92, N 5, p. 94.

Л. И. Елекеев

О СУТОЧНОМ ХОДЕ ПОВТОРЯЕМОСТИ ПРИЗЕМНЫХ ИНВЕРСИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ СССР

Изучению инверсий температуры на территории СССР посвящен ряд работ [1—5]. Однако в них не рассматривается суточный ход повторяемости инверсий, характерные особенности которых определяют уровень содержания примеси в воздухе и, следовательно, должны учитываться при расчетах концентрации примеси в воздухе.

В данной работе приведены результаты изучения суточного хода приземных инверсий по данным наблюдений 80 аэрологических станций на территории Советского Союза. В качестве исходного материала были использованы осредненные за 10-летний период (1959—1968 гг.) среднегодовые значения повторяемости приземных инверсий за сроки 03, 09, 15 и 21 ч мск; а также данные января и июля за те же сроки для девяти типичных станций, характеризующих различные районы страны.

Анализ материалов показал, что более чем в 50% городов отсутствуют данные по повторяемости инверсий в отдельные стандартные сроки (09, 15 либо 21 ч). Определение отсутствующих данных может быть выполнено путем интерполяции значений повторяемости инверсий по тем станциям, для которых они имеются либо расчетным путем, что и явилось задачей данной работы.

Территория СССР различается многообразием рельефа и обладает разнообразным термическим режимом, поэтому условия возникновения инверсий в разных районах территории значительно отличаются. В связи с этим было выделено девять типов суточного хода повторяемости приземных инверсий: I тип — север ЕТС, II — запад ЕТС и побережье морей, III — центр ЕТС, IV — Украина и юг ЕТС, V — Средняя Азия, VI — Западная Сибирь, VII — Восточная Сибирь, VIIa — Дальний Восток (континентальный район), VIIб — Дальний Восток (приморский район) (рис. 1).

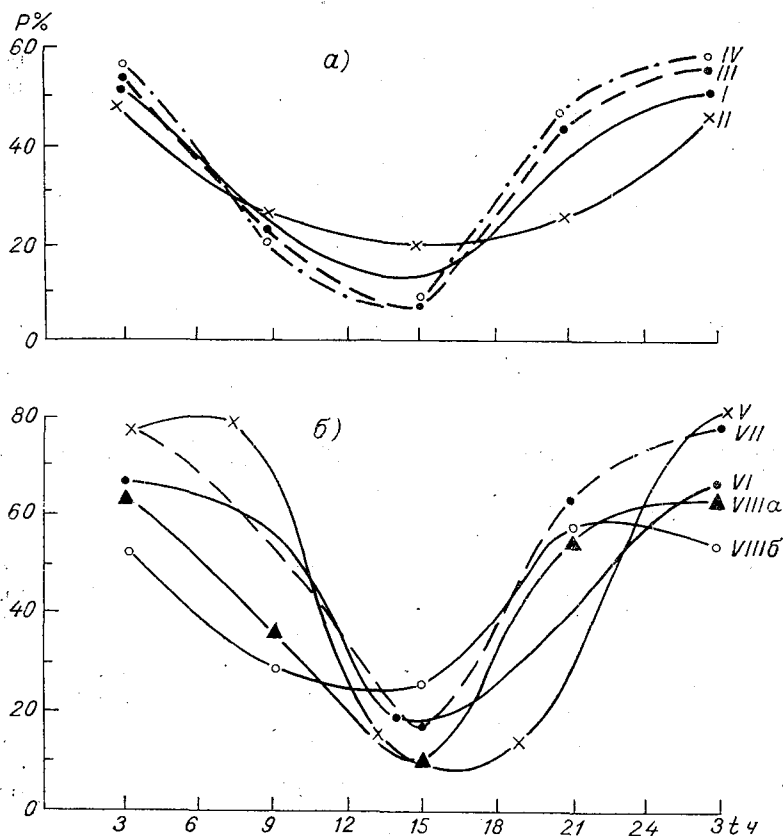


Рис. 1. Суточный ход повторяемостей приземных инверсий на Европейской территории СССР (а) и Азиатской территории СССР (б).

По каждому из девяти типов получены осредненные по срокам значения повторяемостей приземных инверсий по данным тех станций, где имелись наблюдения за все четыре срока.

Далее строился график связи средних для данного типа повторяемости приземных инверсий с их конкретными значениями на каждой станции. Рисунок 2 позволяет убедиться в достаточной однородности данных различных станций, включенных в один тип.

Как видно из рис. 1, суточный ход повторяемости приземных инверсий представляет собой периодические колебания с одним максимумом и одним минимумом и вследствие этого их можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье [6, 7].

$$P(t) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i \cos \frac{2i\pi t}{T} + \sum_{i=1}^3 b_i \sin \frac{2i\pi t}{T}; \quad (1)$$

где $P(t)$ — повторяемость инверсий в данное время суток, t — стандартные сроки наблюдений (03, 09, 15, 21 ч), T — период наблюдений, соответствующий 24 часам, a и b — коэффициенты ряда Фурье, определяемые из уравнений:

$$a_0 = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} p_{i-1}; \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{1}{2} (p_0 - p_6) - a_3, \quad a_2 = \frac{1}{4} (p_0 - p_3 + p_6 - p_9); \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} (p_3 - p_9) + b_3, \quad b_2 = \frac{1}{4} (p_1 - p_3 + p_5 - p_7); \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{1}{6} (p_1 - p_3 + p_5 - p_7 + p_9 - p_{11}); \quad (4)$$

где $p_0, p_1, p_2, \dots, p_{11}$ — значения повторяемости в последовательные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{11}$ с интервалом в 2 ч. Они снимаются непосредственно с графиков суточного хода (рис. 1). На основании уравнения (1) получены формулы для каждого из девяти районов, описывающие изменение в суточном ходе повторяемости приземных инверсий. Расчеты показали, что повторяемость приземных инверсий с достаточной точностью описывается тремя членами ряда. Эти уравнения отличаются значениями коэффициентов a и b и знаками. В уравнении (1) вместо t подставляются

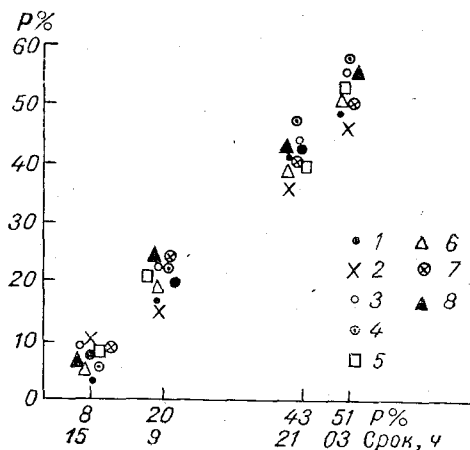


Рис. 2. Связь осредненных значений повторяемости с конкретными значениями их на станциях для III района.

Рассчитанные значения повторяемости приземных инверсий были сопоставлены с фактическими значениями за те же сроки. Расхождения в повторяемостях составили в среднем 2,2% для всех районов. В табл. 2 представлены величины погрешности расчетов суточного хода повторяемости приземных инверсий. В основном она составляет 0,1—0,3% величины повторяемости в данный срок и увеличивается до 0,45% для 15 ч, поскольку в этот срок повторяемость приземных инверсий невелика, но изменчивость ее очень большая.

В среднем за сутки среднеквадратические ошибки интерполяции составляют 0,2%, а кривые, рассчитанные по формула

экспериментальные хорошо согласуются (рис. 3), что позволяет говорить о возможности практического использования уравнения (1) для расчета повторяемости.

Анализ всех полученных материалов показывает, что суточный ход повторяемости приземных инверсий (см. рис. 1) во всех айонах характеризуется плавными изменениями от максимума 3—5 ч до минимума в 15 ч. Основные различия для отдельных айонов связаны главным образом с величиной повторяемости приземных инверсий ночью и длительностью их сохранения. Это отражается в коэффициентах и знаках уравнений для каждого айона.

Таблица 1

Значения коэффициентов a и b по районам

Район	Коэффициенты		
	a_0	a_1	b_1
I	31,1	16,6	—6,5
II	28,6	11,2	3,5
III	31,4	21,0	—10,9
IV	32,5	22,1	—11,6
V	46,0	25,0	33,0
VI	45,0	21,0	12,4
VII	53,0	28,0	—4,5
VIIIa	42,0	24,0	—8,7
VIIIб	40,9	11,7	—14,0

Над ЕТС повторяемость инверсий возрастает от 5—20% днем до 35—55% ночью в зависимости от местоположения станций, на Украине и на юге ЕТС повторяемость инверсий достигает ночью 65%.

В Прибалтике и на побережье Дальневосточных морей (районы II—VIIIб) суточный ход повторяемости приземных инверсий характеризуется примерно одинаковым числом инверсий в ночное и дневное время в течение года.

Таблица 2

Среднеквадратические погрешности интерполяции σ (%) повторяемости приземных инверсий по срокам и за сутки

Районы	Сроки, ч				За сутки
	03	09	15	21	
I—IV	0,14	0,19	0,45	0,13	0,17
V—IX	0,12	0,30	0,41	0,10	0,24

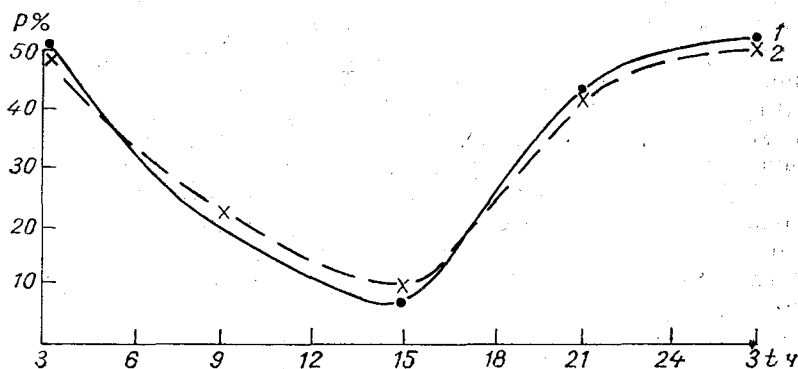


Рис. 3. Суточный ход фактических (1) и рассчитанных (2) значений повторяемости приземных инверсий.

Наибольшая повторяемость составляет ночью 45—58%, днем 28—37%.

В некоторых районах ЕТС (III, IV) и в континентальных районах Дальнего Востока (VIII а) повторяемость приземных инверсий большую часть суток составляет 65—80% и даже днем достигает 18—20%.

Наибольшие изменения в суточном ходе повторяемости приземных инверсий отмечаются в районе Средней Азии (V). Она составляет ночью 80—90% и днем 3—5%.

Суточный ход повторяемости приземных инверсий в летний (июль) и зимний (январь) периоды для характерных городов каждого типа представлены в табл. 3.

Зимой над большей частью территории СССР суточный ход выражен слабо, амплитуда увеличивается к югу за счет уменьшения

Таблица

Суточный ход повторяемости приземных инверсий

Станции (тип)	Январь				Июль			
	ночь	утро	день	вечер	ночь	утро	день	веч
Архангельск (I)	57	54	50	55	66	5	2	2
Ленинград (II)	43	48	35	45	86	13	4	2
Казань (III)	40	43	29	48	73	5	4	4
Волгоград (IV)	46	31	24	43	88	5	0	4
Ташкент (V)	76	44	28	74	98	1	1	9
Красноярск (VI)	55	49	60	62	77	6	6	8
Чита (VII)	90	92	47	86	75	21	3	1
Хабаровск (VIIIа)	73	72	13	73	63	5	2	5
Нагаева бухта (VIIIб)	67	58	60	69	52	21	33	4

ения числа дневных приземных инверсий. Летом в континентальных районах приземные инверсии температуры образуются только ночью. Их повторяемость зависит от продолжительности ветлого времени суток и увеличивается с севера на юг. На севере повторяемость составляет 50—60%, на основной территории СССР (на широтах 50—60°) — 70—80%.

В Средней Азии летом инверсии формируются перед заходом солнца и сохраняются до 9—10 ч. В этот период их повторяемость составляет 95—98%. Наибольшая амплитуда повторяемости приземных инверсий отмечается летом в Термезе (96%) (см. табл. 2).

На побережье Охотского моря (бухта Нагаева) она наименьшая за счет высокой частоты дневных адвективных инверсий холодного воздуха [3].

Автор выражает благодарность Э. Ю. Безуглой за оказанную помощь при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э. Ю. и др. Некоторые результаты изучения инверсий температуры для оценки потенциала загрязнения воздуха на Европейской территории СССР. — Труды ГГО, 1975, вып. 353, с. 78—92.
- Безуглая Э. Ю. и др. Инверсия температуры над территорией СССР. — Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 88—99.
- Безуглая Э. Ю. Температурные инверсии над территорией крайнего северо-востока СССР. — Тр. ДВНИГМИ, 1965, вып. 19, с. 154—171.
- Безуглая Э. Ю. и др. Связь приземных инверсий температуры со скоростью и направлением ветра. — Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 101—109.
- Воронцов П. А. Методы аэрологического исследования пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1961. 224 с.
- Джеффрис Г., Свирос Б. Методы математической физики. — М.: Мир, 1970, с. 279—298.
- Уитткер Э., Робинсон Г. Математическая обработка результатов наблюдений. — М.: ОНТИ, 1936, с. 245—257.

О ТЕРРИТОРИАЛЬНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Одним из факторов, определяющих потенциал загрязнения воздуха выбросами промышленных предприятий, является турбулентный обмен. Как показали теоретические и экспериментальные исследования, максимальные концентрации примесей от высоких источников наблюдаются при развитом турбулентном обмене [3, 5, 7, 11]. В первом приближении принималось, что такие условия чаще всего имеют место летом в полдень. В связи с этим и следовало распределение по территории Советского Союза средних значений коэффициента турбулентного обмена в приземном слое воздуха в июле в 13 ч [8].

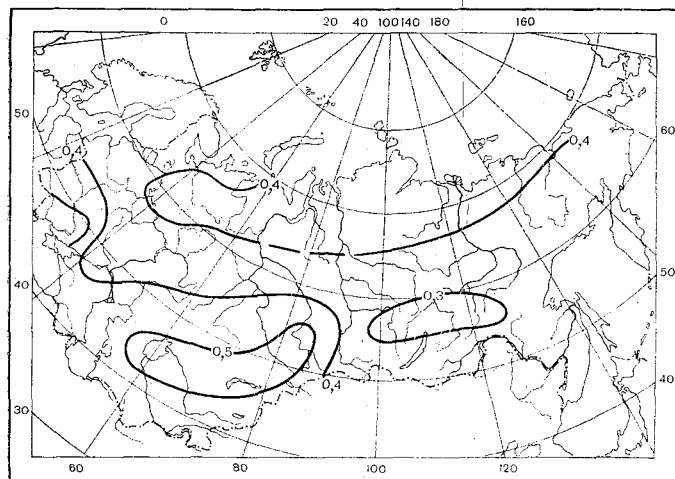


Рис. 1. Распределение абсолютных максимумов коэффициента турбулентного обмена на высоте 1 м ($K_{\max}$ м²/с). 1968—1972 гг.

В статье рассматриваются значения абсолютных максимумов коэффициента турбулентного обмена на высоте 1 м, которые могут наблюдаться в том или ином районе Советского Союза, их изменение со временем и надежность. В качестве исходного материала использовались данные градиентных наблюдений на сети аэробалансовых станций. Расчеты K_1 производились по методике, рекомендуемой Руководством по градиентным наблюдениям определению составляющих теплового баланса [10]. Опреде-

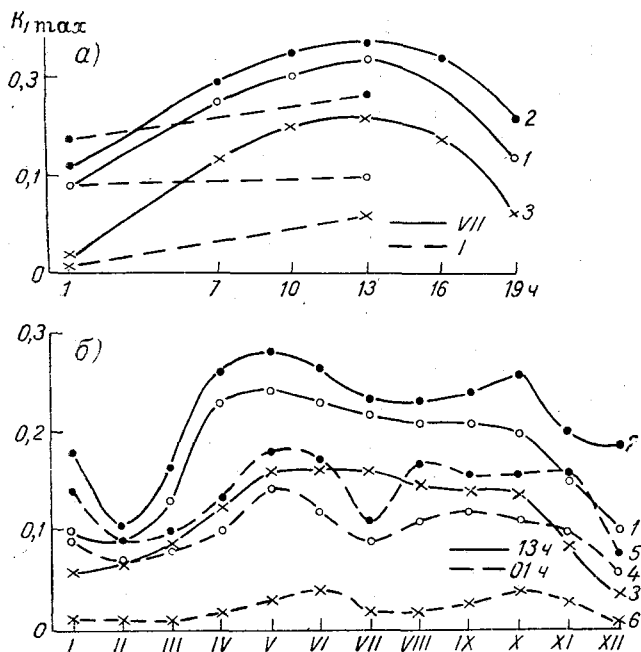


Рис. 2. Суточный (а) и годовой (б) ход $K_1, \max$ (среднего за 1968—1972 гг. и абсолютного) и K_1 (1964—1968 гг.), ст. Солянка.

1, 4 — $\overline{K_1, \max}$; 2, 5 — абс. $\overline{K_1, \max}$, кривые 3, 6 — $\overline{K_1}$.

ялись максимальные значения коэффициента турбулентного обмена в отдельные сроки за все месяцы пятилетнего периода (1968—1972 гг.) и из них выбирался абсолютный максимум K_1 для данного пункта.

В настоящее время абсолютный максимум K_1 получен для 5 станций, расположенных в различных климатических зонах СССР.

Распределение абсолютных максимумов коэффициента турбулентного обмена на высоте 1 м по территории Советского Союза

Время наступления максимальных значений K_1

Станция	Время, ч	Месяц	Станция	Время, ч	Месяц	Станция	Время, ч	Месяц
Коткино	13	VI	Сковородино	13, 10 16, 10	V, IX VI	Ершов	10	IX
Оймякон	13	VI	Чита	13, 16 16	V VII	Кушнаренково	10	VI
Оленёк	13	IV	Рига	16	V	Уральск	13	IX
Архангельск	16	VII	Торжок	13, 10	VI, VIII	Западно-Казахстанская	13	IV
Петрозаводск	13	VIII	Пинск	13	VI	Рудный	16, 13, 10	IV, VI, VII
Усть-Вымь	13	VI	Советск	13, 10	VI, VII	Огурцово	10	V
Николаевское	13	VI, IX	Нолинск	16	VI	Целиноград	10	V
Верхоянск	10	VII	Солянка	10	IX	Айдарлы	16	VI
Туруханск	13	VIII	Якутск	13	IV	Беки-Бент	16	V
Тура	19	VI	Полтава	13	IV	Шевченко	10	VIII
Среднеколымск	13	V	Аскания-Нова	13	IV	Чурук	10, 16	VII, XI

едставлено на рис. 1, а месяц и срок, когда они наблюдались, ны в табл. 1.

Выполненное исследование позволило выделить области с различными значениями абсолютных максимумов K_1 . Так, в пустынных районах Средней Азии (ст. Чурук), на юге ЕТС (ст. Полтава, жания-Нова) и в предгорьях Тянь-Шаня (ст. Айдарлы) значения $K_{1\max}$ наибольшие (около $0,50 \text{ м}^2/\text{с}$). В центральных районах С и Сибири значение абсолютного максимума K_1 колеблется $0,30$ до $0,40 \text{ м}^2/\text{с}$. По направлению к северным районам значения $K_{1\max}$ снова возрастают (примерно до $0,45 \text{ м}^2/\text{с}$).

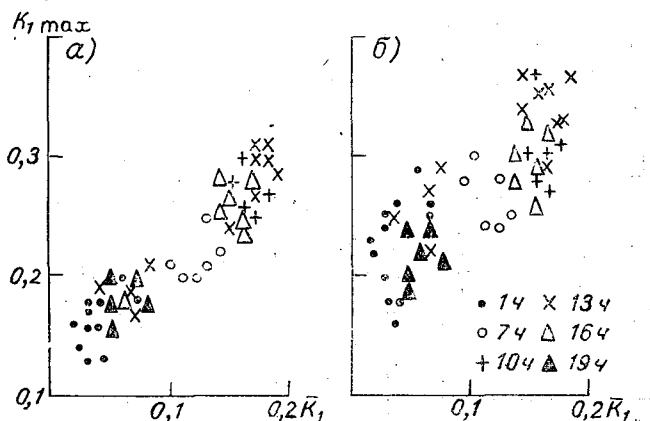
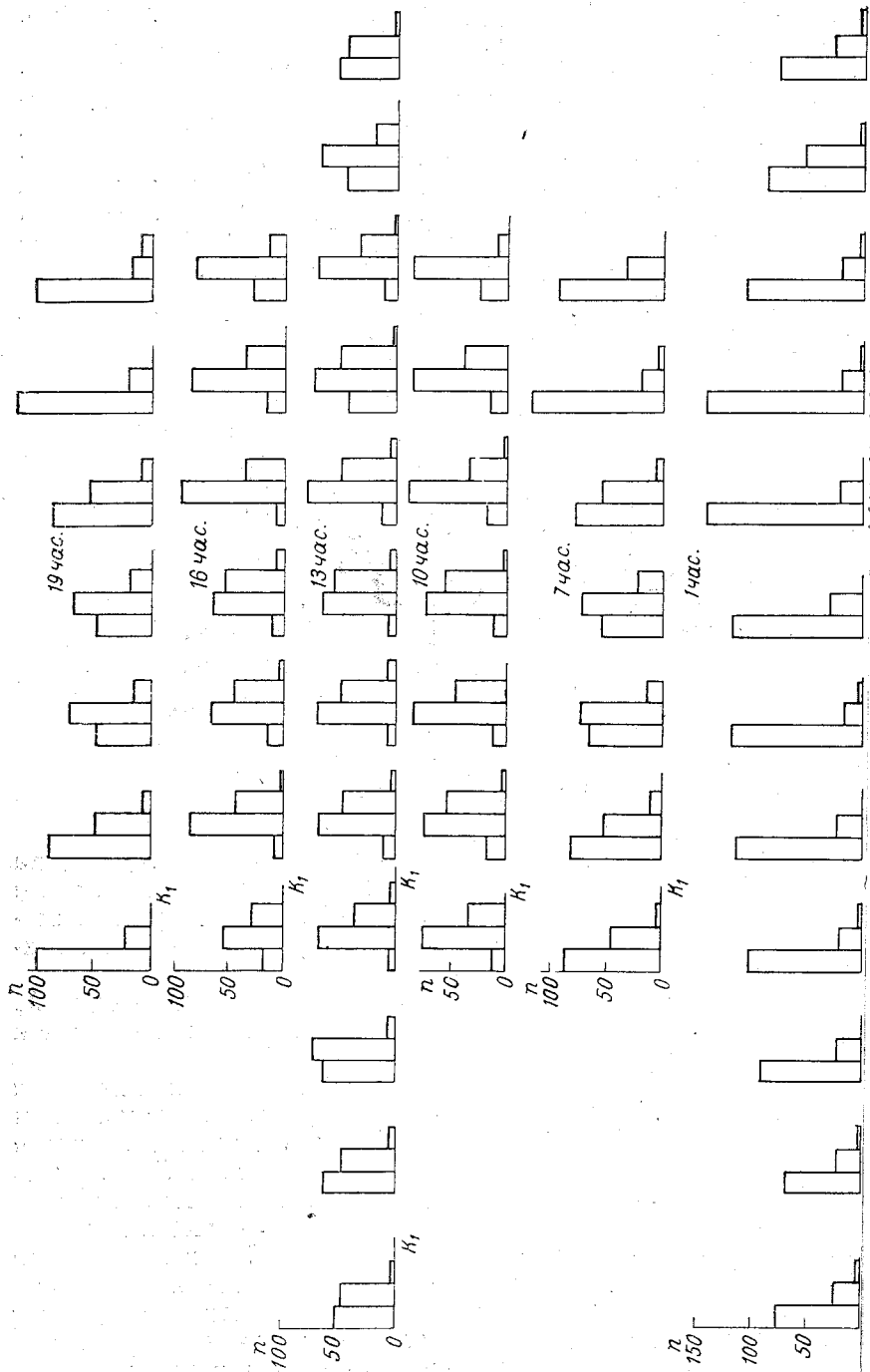


Рис. 3. Зависимость $K_{1\max}$, среднего (а) и абсолютного (б), от K_1 по данным ст. Торжок.

Для большинства пунктов максимальные значения K_1 от года к году меняются незначительно. Эти изменения более заметны превышают $0,10 \text{ м}^2/\text{с}$ в районах со значительной скоростью ветра, а следовательно, и с более высоким уровнем ее изменчивости.

По средним за 5 лет данным о максимальных значениях K_1 отдельные сроки и месяцы для всех 35 станций получен годовой суточный ход $K_{1\max}$.

Прежде всего следует отметить, что особенности изменения максимальных значений K_1 со временем подобны изменениям отдельных значений $K_1(K_1)$ (по данным пунктов, для которых ранее были получены сведения о годовом и суточном ходе K_1). В свою очередь изменения со временем $K_{1\max}$ средних за 5-летний период подобны изменениям абсолютных значений $K_{1\max}$, выбранных для отдельных сроков и месяцев в отдельные годы. Так же, как и при изучении годового хода средних значений K_1 , годовой ход максимальных значений коэффициента турбулентности $K_{1\max}$ (как среднего, так и абсолютного) на станциях различных климатических зон отличается некоторым своеобразием как в отношении на-



ступления максимума и минимума, так и значениями годовой амплитуды (под амплитудой подразумевается разность между наибольшими и наименьшими значениями $K_{1\max}$).

Наступление экстремумов $K_{1\max}$ зависит в значительной мере от развития циклонической деятельности в том или ином районе и ряда других факторов. Так, на станциях ЕТС в связи с преобладанием циклонической деятельности в этих районах летом [6] наибольшие значения $K_{1\max}$ в годовом ходе в дневной срок имеют место весной или в более ранние летние месяцы. В некоторых районах наблюдаются два максимума (главный весенний и второстепенный осенний), более или менее резко выраженные (ст. Николаевское, Торжок, Аскания-Нова, Полтава).

На станциях Казахстана и Средней Азии (Рудный, Целиноград, Беки-Бент) высокие значения $K_{1\max}$ в мае — июне обуславливаются большими значениями радиационного баланса в это время года [9]. В годовом ходе для 13-часового срока $K_{1\max}$ имеет, как правило, наиболее низкие значения в зимний период.

В годовом ходе в ночной срок $K_{1\max}$ имеет значения более высокие зимой, более низкие летом. Изменения $K_{1\max}$ зависят главным образом от годового хода скорости ветра, поскольку повсеместно в это время суток в течение всего года наблюдаются инверсии. При ослаблении инверсий, как, например, на ст. Айдарлы в мае (период дождей) в ночной срок, кроме зимнего, может наблюдаться второй максимум летом, а на станциях зон избыточно влажного и влажного климатов вообще наблюдается один летний максимум (ст. Туруханск, Тура, Среднеколымск, Оленёк и др.).

Годовая амплитуда $K_{1\max}$ как в дневной, так и в ночной срок для всех районов отлична от нуля. В ночной срок она примерно в 2 раза меньше, чем в дневной, и почти не меняется с широтой и долготой.

В дневной срок годовая амплитуда $K_{1\max}$ несколько больше на Азиатской территории Советского Союза по сравнению с ЕТС (за счет более низких зимних значений) и уменьшается примерно вдвое от зоны влажного к зоне сухого климата.

В суточном ходе наиболее высокие значения $K_{1\max}$ более вероятны в полуденные часы, низкие — в ночные. В отдельные месяцы в некоторых районах максимум смещается на более ранние утренние или более поздние вечерние сроки в зависимости от суточного хода облачности в этих районах.

В зимние месяцы изменения $K_{1\max}$ от дня к ночи очень малы, летом суточная амплитуда увеличивается до $0,1-0,2 \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 2 приведен суточный (для июля и января) и годов (для 01 и 13 ч) ход $K_{1\max}$ (среднего и абсолютного) и $\bar{K}_1$ ст. Солянка. Хотя значения $K_{1\max}$ и $\bar{K}_1$ получены для разных периодов (1968—1972 и 1964—1968 гг. соответственно), суточный ход и годовой ход их в общем подобны.

На рис. 3 приводятся зависимости $K_{1\max}$ от $\bar{K}_1$ для станции Торжок, построенные по данным всех сроков и месяцев. Подобные зависимости получены и для других станций.

При осадках, туманах, метелях, пыльных бурях и скорости ветра по флюгеру более 10 м/с градиентные наблюдения не проводятся.

Т а б л и ц а

Максимальные ($K_{1\max}$) и средние ($\bar{K}_1$) значения коэффициента турбулентного обмена и среднее квадратическое отклонение (σ_{K_1}), полученные с помощью кривых распределения, а также наблюдаемые максимальные значения $K_1(K'_{1\max})$ (ст. Западно-Казахстанская)

Месяц	10 ч				13 ч				16 ч			
	$\bar{K}_1$	σ_{K_1}	$K_{1\max}$	$K'_{1\max}$	$\bar{K}_1$	σ_{K_1}	$K_{1\max}$	$K'_{1\max}$	$\bar{K}_1$	σ_{K_1}	$K_{1\max}$	$K'_{1\max}$
IV	0,17	0,06	0,34	0,30	0,17	0,06	0,42*	0,43	0,17	0,06	0,37	0
V	0,18	0,06	0,38	0,34	0,18	0,06	0,36	0,32	0,19	0,06	0,35	0
VI	0,18	0,06	0,34	0,31	0,17	0,06	0,41*	0,39	0,18	0,07	0,39	0
VII	0,19	0,06	0,36	0,35	0,19	0,06	0,36	0,31	0,20	0,07	0,41	0
VIII	0,14	0,06	0,40*	0,35	0,15	0,07	0,48*	0,33	0,18	0,05	0,33	0
IX	0,16	0,06	0,32	0,30	0,18	0,06	0,36	0,34	0,17	0,06	0,35	0
X	0,12	0,05	0,35*	0,32	0,15	0,06	0,41*	0,40	0,12	0,06	0,41*	0
XI					0,12	0,08	0,36	0,34				

Примечание. Звездочкой (*) отмечено логнормальное распределение ($P = 99,8$).

водятся. Коэффициенты турбулентного обмена выбранным методом не определяются. Поэтому для ряда пунктов, особенно расположенных в районах с сильным ветром, получены заниженные максимальные значения $K_{1\max}$. Более точная оценка вероятного экстремального значения может быть получена с помощью теоретической кривой распределения, подобранной к наблюдаемому распределению K_1 . С этой целью на одной из станций (Западно-Казахстанская) были определены ежедневные значения коэффициента турбулентного обмена на высоте 1 м за 5 лет (1968—1972 гг.) и установлена повторяемость различных значений K_1 (градациям) в отдельные сроки и месяцы.

Вид гистограмм, построенных по этим данным и представленных на рис. 4, для разных сроков и месяцев различен (по оси ординат отложено число случаев, по оси абсцисс — значения граций K_1).

Спрямление эмпирической кривой обеспеченности на вероятностной бумаге нормального (или логнормального) распределения [4] дает возможность считать, что рассматриваемая величина распределена нормально (или логнормально, если по оси абсцисс отложен логарифм этой величины).

Стандартные параметры (среднее значение K_1 и среднее квадратическое отклонение σ_{K_1}) кривых распределения определялись графическим методом. Параметры логнормальных кривых распределения вычислялись по трем опорным ординатам по методике А. Алексеева [1]. Полученные значения K_1 и σ_{K_1} приводятся в табл. 2. В табл. 2 дается также значение $K_{1\max}$, рассчитанное по правилу «трех сигм» в случаях нормального распределения коэффициента турбулентности, и значение, снятое с графика логнормального распределения при накопленной вероятности 99,8%, также абсолютный максимум K_1 , полученный из наблюдений ($K'_{1\max}$).

Как и следовало ожидать, рассчитанные значения $K_{1\max}$ несколько выше наблюдаемых, но незначительное расхождение их дает возможность считать, что эмпирические величины $K_{1\max}$ являются вполне надежными.

Приведенные данные предназначены для использования их в качестве потенциальной характеристики загрязнения атмосферы промышленными выбросами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г. А. Определение стандартных параметров логарифмически нормальной кривой распределения по трем опорным ординатам. — Труды ГГИ, 1962, вып. 99, с. 261—273.
- Байков Б. А. и др. Проверка методики расчета рассеивания в атмосфере холодных выбросов на материалах обследования предприятий искусственного волокна. — Труды ГГО, 1971, вып. 254, с. 72—81.
- Берлянд М. Е. Основные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения воздуха. — Труды ГГО, 1967, вып. 218, с. 295—308.
- Брукс К. Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. — Л.: Гидрометеониздат, 1963. 408 с.
- Бызова Н. Л., Оникул Р. И. Анализ поля концентраций тяжелой примеси по данным опытов на 300-метровой метеорологической мачте. — Труды ГГО, 1965, вып. 172, с. 35—41.
- Вительс А. А. Месячные, сезонные и годовые характеристики барикоциркуляционного режима 1900—1964 гг. — Л.: Гидрометеониздат, 1965. 128 с.
- Горошко Б. Б. Некоторые особенности распространения вредных примесей от высоких источников в зависимости от синоптико-метеорологических условий. — Труды ГГО, 1968, вып. 207, с. 69—75.
- Грачева В. П. О коэффициенте турбулентного обмена в приземном слое воздуха летом в дневное время в различных географических районах СССР. — Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 152—161.

9. Жирков К. Ф. Некоторые черты радиационного баланса степей Зап. Сибири и Казахстана по данным наблюдений. — Труды ГГО, 1967, вып. 19, с. 60—72.
10. Руководство по градиентным наблюдениям и определению составляющих теплового баланса. — Л.: Гидрометеиздат, 1964. 128 с.
11. Сонькин Л. Р. Некоторые результаты синоптико-климатического анализа загрязнения воздуха. — Труды ГГО, 1968, вып. 207, с. 56—64.

А. А. Павленко, Н. Ш. Вольберг

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ СОРБЕНТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОКИСЛОВ АЗОТА

1. Определение двуокиси азота

Целью настоящего исследования явилась разработка способа улавливания двуокиси азота с помощью твердых сорбентов. Ранее было показано, что использование сорбционных трубок, содержащих гранулы непористого материала, покрытого пленкой высушающего поглотительного раствора имеет ряд преимуществ перед жидкостными поглотительными приборами [1—3]. Поэтому подбор специального раствора для эффективного улавливания двуокиси азота был главным моментом в разработке такого способа отбора проб NO_2 .

В СССР при анализе атмосферного воздуха для отбора проб двуокиси азота наибольшее распространение получил 8%-ный раствор иодида калия [4]. В разных странах в последние годы был предложен ряд новых поглотительных растворов, таких, как триэтаноламин с добавками н-бутанола [9] или гваякола [14], щелочь с добавками R-соли [7], гваякола [6] или арсенита натрия [13]. Некоторые из этих растворов были использованы для приготовления твердых сорбентов на основе различных пористых носителей, молекулярных сит, целита (11). Однако в недавних работах было показано, что триэтаноламин способствует восстановлению NO_2 в NO , причем в наибольшей степени это проявляется на сорбентах с сильно развитой поверхностью, таких, как молекулярные сита [9].

Использование пористых сорбентов требует тщательного проведения операции извлечения отобранной пробы перед анализом, связано с риском потерь определяемого вещества. Поэтому мы остановились на использовании в качестве носителя стеклянных гранул диаметром 1—2 мм, обеспечивающих легкое и полное извлечение. Эти гранулы значительно удобнее, чем пористые носители, при серийной работе. В стеклянную трубку с внутренним

диаметром 6 мм и с двумя дырчатыми перегородками помеща-
1 мм таких гранул. Гранулы смачивали исследуемым раствором
и при помощи резиновой груши выдували его избыток. В качестве
пропитывающих были проверены растворы едкого натра, иодист
го калия и триэтаноламина. Растворы едкого натра различных
концентрации (4—20%) с добавкой этиленгликоля и арсени
натрия при скорости отбора 0,25 л/мин не обеспечивали полно
поглощения NO_2 (проскок 10—40%). Растворы триэтанолами
с добавкой глицерина и ацетона почти не задерживали NO_2 . На
более пригодными оказались растворы иодистого калия. При
пользовании 10%-ного раствора иодистого калия проскок соста
лял $\sim 10\%$. Попытка снизить этот проскок добавлением хлор

Таблица 1
Эффективность поглощения NO_2

Температура, °С	Скорость отбора, л/мин	Проскок, %
20	0,25	$0,9 \pm 2,18$
	0,5	$1,8 \pm 3,00$
	1	$5,2 \pm 4,78$
40	0,25	$4,6 \pm 4,17$
	0,5	$38,7 \pm 8,47$
—10	0,25	$0,5 \pm 1,92$
	0,5	$22,8 \pm 23,60$
—27	0,25	0

стого лития, этиленглико
глицерина, триэтанолами
не привела к существенн
му изменению поглотите
ной способности раство
тогда как увеличение ко
центрации иодистого кал
повышало эффективнос
улавливания NO_2 . Расте
40%-ного иодистого кал
с добавкой в него 15% э
ленгликоля практичес
полностью поглощал NO_2
при скорости отбо
0,25 л/мин (проскок соста
лял $< 2\%$).

Поскольку растворы и
дистого калия при дл
тельном хранении разл

гаются с выделением I_2 , представилось целесообразным для
вышения устойчивости раствора и уменьшения влияния окис
телей и солнечного света добавить соединение восстано
тельного характера. Было найдено, что такие восстановители, к
аскорбиновая кислота, метол, фенидон, гидразин, гидроксилам
непригодны для этой цели в связи с тем, что в их присутств
не наблюдалось образование азокрасителя или же появляла
побочная окраска, затрудняющая дальнейшее колориметрическ
определение. Положительные результаты были получены с доба
кой арсенита натрия. Поэтому в дальнейшем в работе исполь
вался пропитывающий раствор следующего состава: 40% KI , 0,1
0,2% арсенита натрия, 15% этиленгликоля, вода. Сорбционн
трубки, пропитанные этим раствором, обеспечивали высокую э
ффективность поглощения NO_2 при температуре 20—25°C и ск
ростях отбора до 1 л/мин (табл. 1).

В реальных условиях при отборе проб температура доволь
часто существенно отличается от комнатной, что может оказа
влияние на полноту поглощения. К сожалению, в литературе им

тся очень мало сведений о влиянии этого параметра на получаемые результаты. Влияние температуры на эффективность поглощения NO_2 описанными сорбционными трубками, пропитанными раствором выбранного состава, изучали в диапазоне температур, наблюдаемых на территории СССР (от -30 до $+40^\circ\text{C}$). Проверка эффективности поглощения NO_2 при температуре $+40^\circ\text{C}$ проводилась в воздушном термостате, а при отрицательных температурах (в зимнее время) — при температуре окружающего воздуха, для чего система, состоящая из двух последовательно соеди-

Таблица 2

Устойчивость отобранных проб, хранящихся при комнатной температуре

Задано, мкг	Найдено в % от заданного через:				Состав пропитывающего раствора
	7 дней	14 дней	21 день	28—30 дней	
0,65	72,3	—	—	—	40% KI + 15% этиленгликоль + + вода
1,35	54,1	—	—	—	
0,80	100	94,5	—	—	40% KI + 0,1% Na_3AsO_3 + 15% этиленгликоль + вода
1,04	—	—	56,7	—	
0,82	61,0	—	—	—	
0,92	74,0	41,0	—	—	
2,82	—	97,8	—	94,3	40% KI + 0,2% Na_3AsO_3 + 15% этиленгликоль + вода
1,46	—	99,3	—	102,7	
2,24	98,2	—	105,3	—	
1,71	91,2	—	75,4	—	

енных сорбционных трубок, и источник микропотока двуокиси зота выводились на открытый воздух. Проверка влияния температуры на эффективность поглощения показала, что при скорости тбора 0,25 л/мин проскок составляет не более 5% в диапазоне температур от -30 до $+40^\circ\text{C}$. В то же время при скоростях отора 0,5 и 1 л/мин влияние температуры сказывается довольно существенно (проскок может быть до 40%) (табл. 1). Поэтому при температурах, значительно отличающихся от 20°C , целесообразно отбор проб производить со скоростью 0,25 л/мин.

Специально проверялась устойчивость отобранных проб. Результаты проверки показали, что добавка арсенита целесообразна не только для повышения устойчивости пропитывающего раствора, но и для лучшей охраняемости отобранных проб. При пропитывающем растворе состава 40% KI, 0,2% Na_3AsO_3 , 15% этиленгликоля отобранные пробы могут сохраняться до месяца (табл. 2). В случае же если концентрация арсенита составляет 1%; пробы лучше хранить в холодильнике (табл. 3). Каждая из

Таблица 3

Устойчивость отобранных проб, хранящихся в холодильнике (состав пропитывающего раствора: 40% KJ, 0,1% Na_3AsO_3 , 15% этиленгликоля, вода)

Задано, NO_2 , мкг	Найдено в % от заданного через:			
	7 дней	14 дней	21 день	28—30 дней
0,47	100,2	—	—	—
1,04	91,3	—	—	—
0,80	118,1	102	95,8	—
0,23	103,0	100	—	—
0,62	100,0	100	—	—
0,86	96,5	—	93,9	91,8

величин, приведенных в табл. 2 и 3, представляет среднюю из 3—5 определений при относительной погрешности 7—8%.

Как известно, степень перехода NO_2 в нитрит-ион зависит от состава поглотительного раствора. Поэтому данному вопросу было уделено специальное внимание. В опытах использовался стабильный источник микропотока (СИМП), представляющий собой трубку из фторопласта 4МБ, заполненную жидкой двуокисью азота, термостатированную при температуре 27°C. Периодически взвешиванием трубки в течение четырех месяцев было установлено, что скорость генерации NO_2 составляет $1,052 \pm 0,092$ мкг/мин (относительная погрешность определения 8,74%). Опыты проводились следующим образом. В поток очищенного от NO_2 воздуха, пропускаемого через сорбент, вводим небольшой вспомога-

Таблица 4

Выход NO_2 по отношению к заданному количеству NO_2

Задано NO_2 , мкг	Найдено NO_2 , % от NO_2	Относительная погрешность определения выхода NO_2 , %
0,1	93,9	32,3
0,2	95,2	30,0
0,4	81,0	19,7
0,5	89,3	10,6
0,8	82,1	6,5
1,0	86,5	16,4
2,0	84,6	2,8

тельный поток от СИМПа в точно заданный промежуток времени. При этом через сорбент вместе с воздухом пропущено от 0,1 до 1 мкг NO_2 . Полученные данные показывают, что выход нитрит-иона по отношению к заданному количеству NO_2 при отборе на твердый сорбент данного состава составляет в среднем 87,5%, причем при отборе самых малых количеств двуокиси азота это отношение близко к 100. (табл. 4).

Самостоятельный интерес представило выяснение мешающего влияния наиболее часто встречающихся примесей, в св

и с чем было проверено влияние озона, двуокиси серы, окиси азота. Проведенные опыты показали, что присутствие озона в концентрациях, соизмеримых с концентрациями NO_2 , не мешает определению O_2 . Влияния NO не было замечено при концентрациях, в несколько раз превышающих концентрации O_2 , тогда как присутствие двуокиси серы занижает результаты (табл. 5).

Возможность использования данного способа отбора для определения фоновых концентраций ($0,001-0,008 \text{ мг/м}^3 \text{ NO}_2$) требовала специальной проверки эффективности улавливания NO_2 сорбционными трубками при протягивании больших объемов воздуха, остаточных для определения концентраций на уровне фоновых ($100-200 \text{ л}$). Было найдено, что при скорости $0,25 \text{ л/мин}$ и большом объеме отобранной пробы проскок может увеличиться до $10-15\%$, если же скорость отбора составляет $0,1-0,2 \text{ л/мин}$, то проскок не превышает 10% (табл. 6), т. е. для среднеточных отборов можно рекомендовать скорость $0,1-0,2 \text{ л/мин}$.

Таблица 5
Результаты проверки мешающего влияния O_3 , NO , SO_2 .

Задано NO_2 , мкг	Отношение количества NO_2 к количеству добавленной примеси	Найдено NO_2 , % от заданного
1,09	$\text{O}_3(1:1)$	99,1
1,23	$\text{O}_3(1:1)$	97,6
1,39	$\text{NO}(1:10)$	120,8
0,39	$\text{NO}(1:10)$	102,6
2,38	$\text{NO}(1:1)$	99,6
0,76	$\text{SO}_2(1:2)$	90,1
1,39	$\text{SO}_2(1:2)$	71,2
2,28	$\text{SO}_2(1:1)$	58,3

Таблица 6
Эффективность поглощения NO_2 при длительных отборах

Объем пробы, л	Скорость отбора, л/мин	Проскок, %
70—80	0,25	1—5
120	0,25	4,8
126	0,25	12,0
225	0,25	8,1
381	0,25	17,0
324	0,20	5,0
561	0,20	3,8
640	0,1—0,2	9,6
738	0,1—0,2	10,0

2. Определение окиси азота

Поскольку определение NO в воздухе, как правило, производится после окисления ее до двуокиси, для отбора проб можно также использовать сорбционные трубки после предварительного окисления NO . При разработке метода определения окиси азота особое внимание уделялось подбору окислителя, обеспечивающего достаточную полноту перевода окиси в двуокись и не за-

держивающего последнюю. В первых работах для этой цели был предложена бихроматная бумага [15], представляющая собой. плоски стеклянной бумаги, пропитанные окислительной смеси (2,5 г $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 2,5 г концентрированной H_2SO_4). Позднее метод был усовершенствован за счет увеличения концентрации $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ в импрегнирующем растворе и улучшения условий пропитывания и высушивания обработанной бумаги.

Метод Хелстеда, Нейшена и Фурнера [8] предусматривает окисление окиси азота бихроматом натрия, нанесенном на стеклянные шарики диаметром 1 мм. Ряд авторов рекомендует проводить окисление NO перманганатом калия в кислой среде. В настоящее время известны различные модификации перманганатного метода [5]. Некоторые авторы указывают, что перманганат калия дает недостаточно стабильные результаты, которые зависят от конструкции поглотительного прибора, пористости пластинок качества реактива, скорости пропускания воздуха, температуры освещенности и других факторов. Наилучшей окисляющей смесью, по мнению М. Т. Дмитриева и др: [5], является 3% ный раствор $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в 2,5%-ном растворе H_2SO_4 . Степень окисления окиси азота до двуокиси этой смесью достигает на инертном диатомите 98,0—99,9%, на стеклянном порошке 97,2—99,9%.

Для эффективной работы окислителя авторы предлагают использовать осушитель воздуха, представляющий пемзу, обработанную концентрированной H_2SO_4 . В работе [10] в качестве окислителя рассмотрен 17%-ный CrO_3 на пористом инертном материале. В ней указывается, что оптимальная относительная влажность рабочей зоны CrO_3 составляет 35—90%. Использование смеси водного и безводного ацетата натрия обеспечивает относительную влажность в пределах 40—70%. По мере отработки окислителя окраска его меняется от желтого цвета гидратированного CrO_3 до зеленовато-коричневого цвета восстановленной формы. При контролируемых условиях эффективность окислителя варьируется в пределах 98—100% [12].

Из всех рассмотренных методов наибольшего внимания заслуживает метод окисления NO хромовым ангидридом, поскольку в этом случае возможна визуальная оценка степени отработки сорбента, допустимая влажность рабочей зоны может изменяться в широких пределах (35—90%) при эффективности окисления 90—100%.

На основании изложенного хромовый ангидрид был выбран как наиболее предпочтительный окислитель при количественном определении NO. В качестве носителя использовался инертный диатомитовый носитель — сфероохром. Для выбора оптимального объема окислителя были проверены различные объемы сорбента (2, 5, 10 мл). При скорости 0,25 л/мин и объеме окислителя 5 мл эффективность окисления составляла 98,5%, а объем окислителя 10 мл обеспечивал практически полное окисление анализируемого газа (проскок $<1\%$). Такой объем можно считать достаточным. При отработке половины объема окислителя необходима замена

рбента. Для поддержания влажности в нужных пределах использовался регулятор влажности, представляющий смесь водно-и безводного ацетата натрия.

При необходимости одновременного определения NO и NO_2 проводился последовательный отбор проб на эти ингредиенты. В этом случае установка для отбора проб состоит из двух сорбционных трубок для поглощения NO_2 , между которыми помещается патрон, содержащий регулятор влажности и окислитель.

Метод отбора проб NO и NO_2 с использованием твердых сорбентов был проверен в полевых условиях в период экспедиции г. Энергодаре в июне—июле 1977 г. Раздельное определение O и NO_2 проводилось при измерении выбросов от Запорожской ЭЭС.

Результаты, полученные при анализе 400 проб, отобранных параллельно на сорбционные трубки и в поглотители, были сопоставимы, и расхождение в среднем составило 8%. Таким образом, в результате проведенной работы подобран пропитывающий раствор для инертного непористого носителя, обеспечивающий эффективное улавливание NO_2 . Предложенный способ отбора показал преимущества перед традиционным, обусловленные компактностью сорбционных трубок удобствами хранения и транспортировки.

Установлено, что трубки с тонкопленочным сорбентом могут быть использованы для отбора проб воздуха на NO_2 как при обычных, так и при повышенных температурах анализируемого воздуха при определении фоновых концентраций. Проверена возможность использования сорбционных трубок для одновременного определения окиси и двуокиси азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вольберг Н. Ш., Шарикова О. П. Применение сорбционных трубок для отбора проб воздуха при определении двуокиси серы.—Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 152—160.
- Вольберг Н. Ш., Павленко А. А. Сравнительная характеристика методов определения сероводорода в атмосфере с помощью абсолютного дозатора.—Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 179—184.
- Вольберг Н. Ш., Тульчинская З. Г. Определение двуокиси серы в атмосфере парарозалинии—формальдегидным методом с отбором проб сорбционными трубками.—Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 163—168.
- Временные методические указания по определению содержания примесей в атмосфере.—Л.: Гидрометеиздат, 1971, с. 33—34.
- Дмитриев М. Т. и др. Раздельное определение окислов азота в атмосферном воздухе Дмитриев М. Г., Соловьев Т. В., Сербина Л. П., Фомина С. А.—Гигиена и санитария, 1971, № 9, с. 60—64.
- Fuerst R. G., Margoson I. H. An evaluation of TGS-ANSA procedure for the determination of nitrogen dioxide ambient air. Reserach Triangle Park, N. C., 27 711, 1974.
- Huygen C., Sterman P. H.—Atmos. Environ., 1971, B, p. 887—889.
- Haestead C. I., Nation G. H., Furner L.—Analyst, 1972, vol. 97, N 1150, p. 55—63.
- Levaggi D. A., Siu W., Faldstein M.—J. APCA, 1973, vol. 23, N 1, p. 30—33.
- Levaggi D. e. a.—Environ. Sci and Technol., 1974, vol. 8, N 4, p. 348—350,

11. Levaggi D. A., Feldstein N., Kothny E. L.—Environ. Sci. and Technol., 1972, vol. 6, N 3, p. 250—252.
12. Methods of air sampling and analysis. Amer. Public Health Assoc. Washington, D. C. 1972.
13. Marryman E. L. Spicer C. W., Levy A.—Envir. Sci. and Technol. 1973, vol. 7, N 11, p. 1956—1959.
14. Mulik I. e. a. — Envir. Anal. chem., 1974 vol. 3, N 4, p. 333—348.
15. Kirley D. I., Glingempul I. M., Huen R. W. — Int. J. Air. Water Pollut. 1964, N 8, p. 455—463.

В. А. Ионин, Н. А. Першина

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ

Различают два вида коррозии: 1) химическую, которая имеет место при действии на металлы сухих газов (кислород, сероводород и др.), и 2) электрохимическую, возникающую при взаимодействии металла с влажным воздухом или с раствором электролита и обусловленную возникновением местных электрических ков.

Атмосферная коррозия металлов в общем счете сводится к электрохимическому виду.

Известно, что потери металла с процессами атмосферной коррозии огромны. Так, определено, что 2—3% стали и чугуна, находящегося в эксплуатации, ежегодно теряются в результате коррозии [4]. В США расходы, связанные с коррозией, составляют 1 млрд. долларов, в Великобритании 600 млн. фунтов стерлингов, во Франции 250 млн. франков, в Канаде 500 млн. долларов в год [4]. Поэтому изучение коррозионной агрессивности атмосферы имеет огромное народнохозяйственное значение.

Известно, что на скорость атмосферной коррозии существенно влияют два фактора: 1) продолжительность увлажнения поверхности металла и 2) степень загрязнения воздуха коррозионно-агрессивными веществами (сернистый газ, хлориды, сульфаты и т. д.). Так, добавка всего 0,01% сернистого газа в чистый воздух и относительной влажности 75% увеличивает скорость коррозии примерно в 100 раз [2].

Для определения коррозионной агрессивности атмосферы, связанной только с загрязнением атмосферы, необходимо проводить испытания металлических образцов на небольшой территории, на которой влияние метеорологических факторов окажется одинаковым для любого образца. Такого типа исследования были проведены П. Луйгои [1] на территории Таллина. Были изготовлены образцы из одной партии стали марки СТ-2 размером $100 \times 120 \times 2$ мм. Один край шириной 20 мм загибался под углом 45° для

прикрепления к месту наблюдения на высоте 3 м от поверхности земли. Образцы укреплялись вдали от стен домов и одинаково ориентировались относительно частей света.

Исследование проводилось на 41 пункте. Результаты трех серий наблюдений показали, что в малонаселенных районах скорость коррозии стали в 2 раза выше фоновой скорости, которая наблюдалась в ненаселенных районах. В густонаселенных районах города скорость коррозии в 3 раза больше фоновой.

Подобные исследования проводились в некоторых городах Литовской ССР под руководством К. К. Шопанускаса. Были составлены карты этих городов, на которых отмечались районы с разной коррозионной агрессивностью атмосферы.

У нас определение коррозионной агрессивности атмосферы проводилось на побережье Черного и Баренцева морей. Металлические образцы выставлялись на прибрежных станциях на равном удалении от берега моря. Были получены зависимости скорости коррозии образцов от концентрации хлоридов и изучено изменение скорости коррозии образцов с удалением от берега моря [3].

При определении коррозионной агрессивности атмосферы серьезное внимание уделяется методике определения скорости коррозии образцов.

Как известно, скорость коррозии образцов определяется убыли металла с единицы площади:

$$K = \frac{\Delta P}{St},$$

где ΔP — коррозионные потери на образце (граммы), S — площадь поверхности образцов (м^2), t — время экспозиции (месяцы).

Существует два способа определения коррозионных потерь на образцах: механический и химический. В первом случае продукты коррозии удаляются наждачной бумагой. Но при этом трудно оценить потерю чистого металла. Поэтому обычно отдается предпочтение второму способу — травлению образцов какой-нибудь кислотой с ингибитором.

Ингибиторы — вещества, замедляющие кислотную коррозию. Они не реагируют с металлами, а адсорбируются на них и препятствуют растворению металла в кислоте. С другой стороны они не адсорбируются окисленной поверхностью, благодаря чему ингибированная кислота не действует на чистый металл, но в то же время растворяет окислы.

Нами был проведен анализ химических методов удаления продуктов коррозии с поверхности образцов. В результате сравнения травления образцов несколькими видами растворов мы остановились на травлении 10%-ным раствором соляной кислоты с добавлением 0,1% кобальтазотнокислого уротропина. Образцы подвергались травлению в течение 20—30 мин при комнатной температуре. После окончания травления образцы помещались по

рую воды и продукты коррозии легко снимались обыкновенной прандашной резинкой.

Затем определялись потери чистого металла при травлении образцов этим раствором. Так, при травлении чистых образцов течение 20—30 мин происходит потеря металла, равная в среднем 0,02% общего веса образца.

Данная методика определения скорости коррозии была испытана при определении коррозионной агрессивности атмосферы Ленинграде (территория ГГО) и Воейково. Для этой цели образцы из стали марки СТ-2, имеющие размеры $100 \times 105 \times 2$ мм,

Таблица 1

Даты начала и окончания экспозиции	Продолжительность экспонирования, дни	Скорость коррозии, г/(м ² ·мес)	
		Ленинград	Воейково
14 IX—26 X 1976 г.	42	26	21
26 X—1 XII	36	30	25
26 X 1976 г.—4 I 1977 г.	70	31	20
5 I—18 VIII	225	26	25

оставлялись в Воейково на метеоплощадке, а в Ленинграде над вышей павильона ПОСТ-1. Перед экспонированием образцы очищались от ржавчины и взвешивались. После экспонирования образцы подвергались травлению и с них удалялись продукты коррозии. Затем после просушивания (обычно на следующий день) образцы взвешивались. По разности масс образцов до экспонирования и после удаления продуктов коррозии определялись коррозионные потери на образце и вычислялась скорость коррозии образцов.

В Ленинграде и Воейково были проведены четыре параллельных серии наблюдений в период с сентября 1976 г. по август 77 г. Продолжительность экспонирования менялась от 30 до 5 дней. Результаты определения скорости коррозии представлены в табл. 1.

Из полученных результатов видно, что скорость коррозии образцов в Ленинграде несколько выше, чем в Воейково (в среднем 1,2 раза). Если принять, что влияние метеорологических факторов на скорость коррозии одинаково для двух пунктов наблюдений, то полученную разницу в величине скорости коррозии можно объяснить более высокой концентрацией коррозионно-агрессивных имесей в атмосфере Ленинграда по сравнению с Воейково.

Такие же исследования проводились в районе Иркутского алюминиевого завода в период экспедиционных исследований

18 июля—6 августа 1977 г. Образцы были выставлены в пяти пунктах: два из них на территории завода (причем один в центре, а другой на окраине), два на улицах города, расположенные в 2 км от завода, и один на территории метеостанции. В результате были получены следующие скорости коррозии ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес})$): 60 для территории завода, 21 для города, 18 для метеостанции.

Как видно, скорость коррозии металлов на территории завода в 3 раза выше, чем за его пределами, что объясняется наличием коррозионно-агрессивных примесей в атмосфере на территории завода.

Таким образом, с помощью метода определения коррозионной агрессивности атмосферы по воздействию на металлические образцы можно определить районы с более высоким содержанием коррозионно-агрессивных примесей в атмосфере, оценивать возможные потери от коррозии и в соответствии с этим принимать меры по борьбе с коррозией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луйга П., Рээт Л., Таммисте П. Коррозионные испытания при оценке загрязненности атмосферного воздуха.— Изв. АН ЭССР, Химия, геология, 1972, т. 21, № 4, с. 295—298.
2. Петренчук О. П. О влиянии метеорологических факторов на коррозионную агрессивность атмосферы в прибрежных районах.— Труды ГГО, 1977, вып. 352, с. 119—129.
3. Петренчук О. П. Оценка коррозионной агрессивности атмосферы в прибрежных районах.— Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 116—121.
4. Скорчеллетти В. В. Теоретические основы коррозии металлов. Л.: Химия, 1973.

И. А. Янковский

ОПЫТ И ПРАКТИКА РАБОТЫ СЛУЖБЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕМ АТМОСФЕРЫ

В настоящее время все большее развитие получает Общегосударственная служба наблюдения и контроля за уровнем загрязнения природной среды, создание которой возложено на Госкомдромет СССР. При этом углубляется сотрудничество по этим вопросам Гидрометеорологической службы с Министерством завоохранения СССР, а также с другими министерствами и ведомствами. Возрастает потребность в освещении деятельности территориальных УГКС и НИГМИ и их успехов, достигнутых на поле использования разработанных принципов комплексного следования загрязнения воздушной среды.

В плане развития Общегосударственной службы большое внимание уделяется повышению эффективности и качества работы их подразделений, изучающих загрязнения атмосферы. С этой целью в последние годы выполнен ряд разработок и проведены многие организационно-методические мероприятия. Наряду с исследованием химического состава атмосферного воздуха изучают метеорологические условия, сопутствующие его загрязнению, общаются и анализируются вредные выбросы промышленных предприятий и автотранспорта.

В ходе выполнения плана исследований территориальные УГКС и научно-исследовательские учреждения накопили ценный опыт по совершенствованию различных видов работ и улучшению содержания. Выявлены некоторые факторы, мешающие получению достоверных данных о состоянии атмосферы, и определены пути их устранения. В основу всех этих работ положено развитие сети пунктов наблюдения, расширение числа исследуемых примесей в каждом городе и повышение достоверности результатов измерений.

Проделана значительная работа по улучшению оперативного служивания народнохозяйственных организаций систематической информацией и прогнозами об уровнях загрязнения воздуха о возможных ее изменениях в результате хозяйственной дея-

тельности и гидрометеорологических условий. Хорошее начало в улучшении эффективности оперативного обслуживания положено специалистами Иркутского УГКС при участии Б. Б. Чебанеко, где наряду с информацией о состоянии загрязнения атмосферного воздуха, приводятся сведения о мероприятиях по очистке вредных выбросов промышленных предприятий. Этот опыт уже находит применение во многих УГКС и НИГМИ.

Большие мероприятия проводятся по внедрению новой техники на сети Общегосударственной службы. Разработаны, серийно изготавливаются и поступают на сеть комплексные лаборатории ПОСТ-1, оснащенные автоматическими газоанализаторами на сернистый газ ГКП-1, окись углерода ГМК-3. В качестве пера в пишущем устройстве потенциометра ПСР1-02 использована головка шарикового стержня. Изготовленный С. И. Обуховым пишущий узел ГКП-1 обеспечивает устойчивую и четкую запись на ленту указанного прибора. В ЦВГМО получен довольно большой опыт по эксплуатации комплексных лабораторий ПОСТ-1 и автоматических газоанализаторов.

В настоящее время в Гидрометслужбе проводится работа по широкому внедрению автоматических газоанализаторов ГКП и ГМК-3. Для более рационального их использования разработаны рекомендации, согласно которым вначале требуется определить переходный коэффициент от ручного анализа с применением фотозлектрокалориметра ФЭК-56 и газоанализатора СВ-7633 к анализу в автоматическом режиме путем проведения параллельных анализов проб воздуха автоматическими газоанализаторами и ручными способами. После этого осуществляется переход к непосредственному практическому использованию приборов ГМК. Приборы на сернистый газ ГКП-1 после двухмесячного сравнительного анализа на стационарных постах переводятся на самостоятельный режим работы.

Полезная работа в этом отношении выполняется в Лавийском, Забайкальском, Северном и ряде других УГКС, где в течение продолжительного времени осуществлялись сравнительные измерения содержания в воздухе окиси углерода с помощью ГМК-3 и ручного способа.

Заслуживают внимания вопросы создания методов и форм наблюдения за содержанием в воздухе тяжелых металлов. В этих целях в ГГО, ЛГУ и Грузинском УГКС при участии Н. Н. Александрова, Н. А. Паничева, А. И. Гунченко, Д. Р. Монселидзе разработана методика определения 14 различных металлов. В ряде УГКС (Грузинском, Северо-Западном) и ЦВГМО организованы регулярные наблюдения за указанными элементами.

Одним из важных моментов работы сети постов контроля загрязнением воздуха является разработка параметров, характеризующих деятельность стационарного поста наблюдения. В Лавийском УГКС при участии И. Л. Люлько разработан макет технического дела поста. В нем представлены многие факторы, отражающие как достоверность получаемых данных, так и соде

ание работы поста. Наличие такого документа позволяет судить о репрезентативности места расположения поста, его оборудовании и оснащенности приборами, а также о программе исследований в данном пункте, о наличии в районе расположения поста тех или иных источников загрязнения воздуха. Кроме того, здесь помещаются сведения о способах обработки данных измерений, составе обслуживающего персонала, результатах проверки работы поста, а также излагаются рекомендации по улучшению работы.

Говоря об опыте изучения и защиты воздушной среды, нельзя не указать на библиографический указатель литературы, составленный в Западно-Сибирском региональном научно-исследовательском институте, изданный в 1976 г. В этом довольно обширном издании (134 с.) помещены научные и научно-популярные статьи, монографии и авторефераты диссертаций, опубликованные в период с 1970 по 1975 г., а также статьи зарубежных авторов, переведенные на русский язык. Среди более 1650 наименований содержится много разработок, которые могут быть использованы практической деятельностью на сети. Здесь имеются работы по охране природы, загрязнению воздуха, воды и почвы, а также по изучению загрязнения природной среды с помощью ИСЗ. В некоторых работах затронуты вопросы международного сотрудничества и др.

Известно, что наглядная иллюстрация играет существенную роль в повышении эффективности пропаганды опыта работы, расширяет возможности восприятия информации, позволяет увидеть на фотографии, плакате, схеме, рисунке, диаграмме результаты исследования в области охраны атмосферного воздуха. Все это довольно удачно используется в САРНИГМИ, ЗСРНИГМИ, ВНИГМИ, ЦВГМО, Украинском УГКС и др. Представляется целесообразным повсеместно широко использовать эту форму сообщения материалов наблюдений и принять активное участие в показе на ВДНХ достижений УГКС и НИУ в вопросах охраны воздушной среды.

В повышении эффективности и качества работы сети пунктов контроля за состоянием воздуха важное место занимают всесоюзные и региональные научно-методические семинары, которые проводятся поочередно через год. В них принимают участие специалисты химики и метеорологи от всех УГКС и НИГМИ. Семинары способствуют повышению уровня знаний, мастерства работников сети. Их участники имеют возможность получить взаимную информацию о состоянии дела на местах, о положительных и отрицательных сторонах работы, обогатить свои знания и привести их в систему. В ходе семинара выявляются немало соображений, которые имеют важное практическое значение и могут быть использованы для совершенствования организационных и методических форм будущих семинаров и работы сети в целом.

В этом отношении очень полезными оказываются семинары, проводимые УГКС и НИГМИ с участием специалистов различных лабораторий. В 1977 г. такой внутриреспубликанский семинар

проведен в Украинском УГКС. Ранее подобные семинары проводились в Казахском, Грузинском, Уральском, Северо-Кавказском УГКС и др.

Как правило, все семинары и совещания заканчивают свою работу принятием решений, в которых дается оценка работы в местах, излагаются конкретные рекомендации, направленные на совершенствование методов и способов контроля за загрязнение воздуха.

В интересах изучения и обобщения опыта работы подразделений Госкомгидромета ежегодно составляется и издается Обзор, в котором анализируется работа сети по изучению состояния атмосферного воздуха и даются рекомендации по ее дальнейшему развитию и совершенствованию. Это издание заняло важное место среди других методических пособий и является основой для дальнейшей работы.

В настоящее время в центре внимания Общегосударственной службы находятся задачи повышения качества и эффективности работы всех ее органов, направленной на оздоровление и защиту воздушной среды.

*В. С. Матвеев, В. А. Садаков,
Г. В. Осипов, И. А. Янковский*

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ТРАКТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТА НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОЗДУХА

В плане развития сети Общегосударственной службы наблюдения и контроля за уровнем загрязнения природной среды значительная роль принадлежит автоматизации. В последнее время ему вопросу уделяется большое внимание. Проведен ряд мероприятий и разработок по техническому оснащению постов наблюдения [1, 2]. Сейчас ведутся работы по модернизации комплектной лаборатории ПОСТ-1 и созданию на ее основе автоматизированного поста ПОСТ-1М. В состав этого поста входит ряд систем. К ним относятся: система, обеспечивающая поддержание данного температурного режима в павильоне поста ПОСТ-1М, системы отбора проб воздуха и первичных датчиков для измерения заданных ингредиентов и выдачу результатов измерения в виде электрических сигналов, а также система, обеспечивающая преобразование электрических сигналов от первичных датчиков их регистрацию на машинном носителе.

В настоящей статье анализируется структура системы измерения и регистрации (измерительно-регистрирующий тракт) применительно к задачам, решаемым в автоматизированном стационарном посту наблюдения и контроля за загрязнением атмосферного воздуха ПОСТ-1М. Функциональными особенностями поста ПОСТ-1М являются в первую очередь автономная работа аппаратуры в течение 1—1,5 суток в отсутствие оператора, а также построение измерительно-регистрирующего тракта (ИРТ) на основе серийно выпускаемых блоков и модулей. Машинным носителем информации принимается перфолента.

Технические средства, входящие в ИРТ, могут быть разделены следующие группы:

— средства измерения и регистрации сигналов от первичных датчиков;

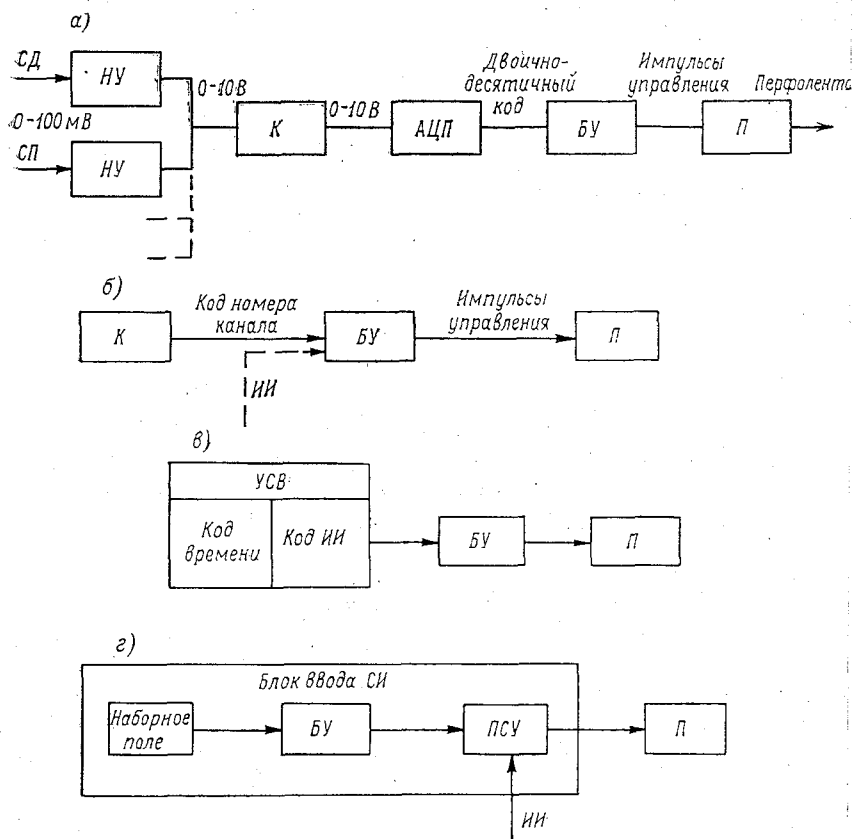


Рис. 1. Структурные схемы функциональных групп.

— средства визуального отображения информации;
— средства обеспечения необходимого логико-временного режима работы аппаратуры.

При выборе рационального состава группы средств измерений и регистрации основным критерием был выбран минимум технических средств, располагаемых непосредственно в павильоне поста с возложением максимума решаемых задач на обработку информации на универсальных ЦВМ. Поскольку состав технических средств этой группы в значительной степени определяется составом и структурой информации, фиксируемой на перфоленке, задача решалась путем минимизации основной и служебной информации как по числу регистрируемых реквизитов, так и по их информационным объемам.

Наличие на перфоленке показаний датчиков обеспечивает функциональную цепочку, приведенной на рис. 1 а. Нормирующий усилитель (*НУ*) осуществляет усиление низковольтных сигналов.

лов от первичных датчиков (СД) до уровня напряжений, необходимых для прохождения через коммутатор (К). Коммутатор осуществляет последовательное подключение выходных сигналов усилителей ко входу аналого-цифрового преобразователя (АЦП), обеспечивая тем самым последовательную регистрацию информации от первичных датчиков на перфоленте. Аналого-цифровой преобразователь осуществляет преобразование аналогового сигнала в двоично-десятичный код. Исходя из точности существующих и разрабатываемых газоанализаторов, количество регистрируемых десятичных разрядов АЦП выбрано равным.

Полученный параллельный двоично-десятичный код преобразуется блоком управления (БУ) в последовательность импульсов управления электромагнитами перфоратора (П), обеспечивающих перфорацию соответствующих кодовых комбинаций на перфоленте. Каждый десятичный разряд при этом перфорируется в виде отдельной строки. Кодовая группа из n строк, изображающая разрядное десятичное число, отделяется от следующей кодовой группы разделителем информации.

Для дальнейшей обработки измерительной информации показания датчиков сопровождаются идентификатором соответствующего информационного канала. Таким идентификатором служит двоично-десятичный код номера коммутируемого канала, вырабатываемый коммутатором. Код номера канала поступает на блок управления вместе с кодом измерительной информации (ИИ) перфорируется с ней в одной кодовой группе. Функциональная блок-схема в этом случае имеет вид, приведенный на рис. 1 б.

Двоично-десятичный код времени поступает от устройства сигналов времени (УСВ) на блок управления и далее на перфоратор. Однако ограниченность разрядной сетки блока управления (от 12 до 24 двоичных разрядов) приводит к необходимости последовательного подключения к кодовой магистрали кода времени кода измерительной информации. Эти функции выполняет узел коммутации кодов, входящий в устройство сигналов времени. Блок-схема кодовой магистрали имеет вид, представленный на рис. 1 в. Ввод в канал регистрации служебной информации, определяющей день и месяц получения основной информации, а также номер поста в городе целесообразно осуществлять оператору один раз в сутки через блок ввода служебной информации.

Через блок ввода служебной информации (СИ), структурная схема которого представлена на рис. 1 г, может быть введена на перфоленту информация от визуальных средств регистрации атмосферных параметров, не имеющих выхода в виде электрических сигналов, а также необходимые разделители информации. Совместная работа блока с приборами измерительно-регистрирующего тракта обеспечивается переключателем управляющих сигналов (УС), представленным также на рис. 1 г.

Для распознавания отказов измерительно-регистрирующей аппаратуры производится регистрация калибровочных напряжений,

подаваемых на специально выделенные для этой цели канал коммутатора (первый и последний каналы). Для проверки правильности преобразования сигнала в цепи, представленной на рис. 1 а, необходима подача не менее чем двух калибровочных напряжений. Проверка регистрирующего тракта может быть осуществлена также по команде оператора с выводом результатов проверки на цифropечать или световое табло.

При работе аппаратуры ПОСТ-1М осуществляется визуальное отображение текущего времени, регистрируемого на перфоленту

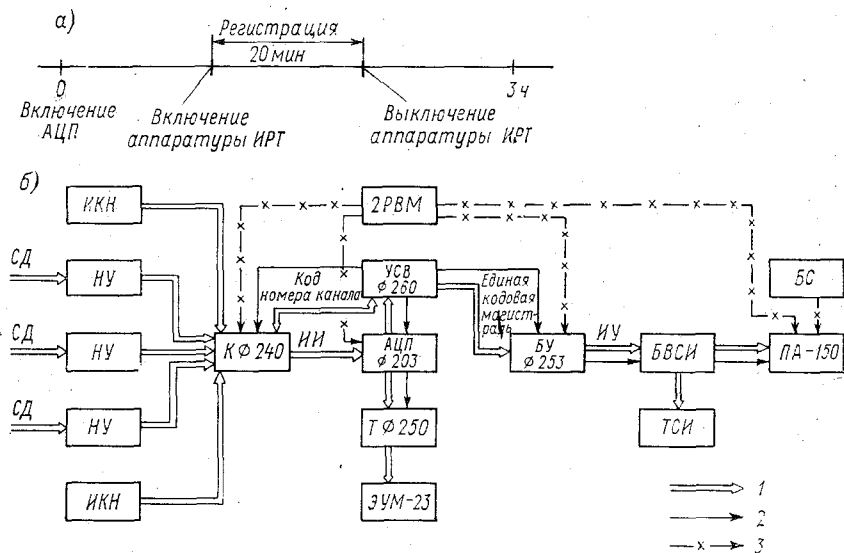


Рис. 2. Циклограмма работы (а) и структурная схема (б) измерительно регистрирующего тракта.

СД — сигнал датчика, ИКН — источник калибровочных напряжений, НУ — нормирующий усилитель, К — коммутатор, ИИ — измерительная информация, РВМ — реле времени, УСВ — устройство сигналов времени, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, Т — транскриптор, ЭУМ — электроуправляемая пишущая машина, БУ — блок управления, ИУ — импульсы управления, БВСИ — блок ввода служебной информации, ТСИ — табло служебной информации, БС — блок синхронизации, ПА — перфоратор.

1 — кодовые магистрали, 2 — магистрали синхронизации, 3 — цепи питания.

с целью определения необходимости корректировки показаний устройства сигналов времени, а также вводимой вручную в канал регистрации информации для ее визуального контроля и результатов тестовых проверок для оперативного контроля правильности работы измерительно-регистрирующего тракта. Отображение информации осуществляется с помощью знаковых индикаторов и цифropечати.

В автоматизированном посту ПОСТ-1М информация первичной обработки не подвергается, а задачи обработки полностью возлагаются на универсальную ЦВМ при дальнейшей обработке перфоленты.

Средствами, обеспечивающими логико-временной режим работы аппаратуры, являются источник синхроимпульсов (устройство игпалов времени), программный механизм типа реле времени, обеспечивающий цикличность включения и выключения приборов по заданной программе, и логические схемы, обеспечивающие требуемое состояние коммутатора кодов УСВ и необходимый режим работы перфоратора (блок синхронизации). При этом обеспечивается логико-временная диаграмма работы измерительно-регистрируемого тракта (за каждые 3 часа работы ПОСТ-1М), представленная на рис. 2 а. Структурная схема измерительно-регистрирующего тракта в целом имеет вид, представленный на рис. 2 б.

Рассмотренный комплекс технических средств и выбранная структура измерительно-регистрирующего тракта автоматизированного поста ПОСТ-1М позволяют осуществить регистрацию информации о загрязнении атмосферного воздуха на машинном носителе, обеспечить возможность дальнейшей обработки этой информации на универсальных ЦВМ и дает возможность в дальнейшем осуществить вывод информации в канал связи для ее непосредственной передачи в ЦВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров Н. Н. и др. Стационарный пост для комплексных наблюдений за загрязнением атмосферы Александров Н. Н., Завирухо Э. И., Ключев Р. П., Корнилов Е. В., Янковский И. А. Труды ГГО, 1975, вып. 325, с. 109—115.
- Янковский И. А. и др. Передвижная лаборатория анализа загрязнения атмосферы Янковский И. А., Корнилов Е. В., Ключев Р. П., Царев А. М., Александров Н. Н.— Труды ГГО, 1975, вып. 352, стр. 235—238.

*В. Н. Владимирова, Р. К. Гови
Т. И. Чугунова, А. М. Цар*

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ ТУМАНОВ ПРИ ИНВЕРСИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Важное значение при разработке методов защиты воздушного бассейна от загрязнения промышленными выбросами имеет учет метеорологических условий, способствующих рассеиванию и удалению поступающих вредных примесей. Эта характеристика атмосферы получила название потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА). Изучение ряда метеорологических характеристик, определяющих ПЗА, было выполнено в [1, 2, 3]. В них приведены некоторые результаты изучения распределения по территории СССР приземных и приподнятых инверсий температуры и скорости ветра.

Как известно, сочетание тумана с инверсией приводит к более интенсивному росту концентраций примеси в воздухе [4, 6]. Распределение продолжительности и повторяемости туманов по территории СССР также неоднократно исследовалось [5].

При изучении ПЗА немаловажное значение имеет рассмотрение комплексных характеристик и, в частности, таких, как наличие инверсионных условий при тумане и скорости ветра меньше 2 м/с.

Для изучения связей температурных инверсий с туманом были использованы данные обобщений 4-срочных аэрологических наблюдений за 10-летний период (1959—1968 гг.), выполненных в управлениях Госкомгидромета на 36 станциях. Одновременно были привлечены материалы наблюдений за тот же период 20 станций, имеющих 3-срочные наблюдения. На основании этих материалов были вычислены повторяемости инверсий с туманом каждый месяц по срокам (от числа наблюдений). Влияние инверсий, формирующихся на разных уровнях, по-разному сказывается на источниках, имеющие различную высоту выброса примеси. Поэтому в работе отдельно рассматриваются приземные и приподнятые инверсии. Приподнятой инверсией считалась инверсия с нижней границей ниже 0,5 км. Интенсивность тумана при этом учитывалась.

Как известно, территория СССР подразделяется на ряд климатических областей, имеющих свои особенности, обусловленные как атмосферной циркуляцией, так и другими факторами. Поэтому распределение таких характеристик, как повторяемость и продолжительность инверсий и туманов, весьма неоднородно. Однако для каждого из рассматриваемых элементов можно выделить некоторые закономерности, которые и определяют специфику комплексной характеристики.

Таблица 1
Повторяемость (%) приземных и приподнятых инверсий с туманом при скорости ветра меньше 2 м/с в городах СССР (1959—1968 гг.)

Пункт	Теплое полугодие		Холодное полугодие	
	Приземная инверсия	Приподнятая инверсия	Приземная инверсия	Приподнятая инверсия
Ашхабад	0,0	11,4	11,4	16,3
Ашгабат	6,3	2,3	3,8	0,5
Хангельск	4,0	0,0	8,0	0,0
Ашгабат	6,0	0,0	12,0	10,0
Ташкент	0,0	0,0	6,0	6,0
Узбекистан	1,9	1,7	2,5	2,2
Ташкент	1,9	0,8	2,8	2,1
Ашгабат-на-Амуре	8,9	2,3	22,2	7,3
Ашгабат	9,0	2,0	5,3	2,3
Ашгабат	4,0	3,0	20,0	15,0
Ашгабат, бухта	9,1	6,8	0,1	0,1
Ашгабат-на-Амуре	17,0	3,3	4,3	9,4
Ашгабат-на-Дону	0,0	0,0	7,0	3,0
Ашгабат	3,4	0,6	68,2	0,7
Ашгабат	0,1	0,3	8,4	7,2
Ашгабат	4,0	2,0	70,0	7,0

Предварительный просмотр материала показал, что существенные различия в повторяемости инверсии с туманом при ветре меньше 2 м/с наблюдаются в основном между холодным и теплым периодами года. В связи с этим были подсчитаны повторяемости инверсий за теплое и холодное полугодия отдельно, которые для городов представлены в табл. 1. Из данных таблицы видно, что на всей рассматриваемой территории приземные инверсии с туманом наблюдаются более часто, чем приподнятые.

В теплое полугодие (апрель — сентябрь) повторяемость приземных инверсий с туманом для всей ЕТС и Средней Азии невелика.

лика и колеблется в пределах от 0 до 1,5%. Однако повторяемость их несколько возрастает на побережьях морей. Так, в Прибалтике она достигает 1,9% (Калининград, Каунас), на севере 4% (Архангельск), а на побережье Каспийского моря — до 6% (Баку). Довольно высокая повторяемость инверсий с туманом наблюдается в Москве (9%), что вполне можно объяснить влиянием крупного города.

Для восточных районов территории СССР также характерно некоторое увеличение повторяемости приземных инверсий с туманом на побережье морей по сравнению с внутриконтинентальными районами. Так, в п. Анадырь повторяемость инверсий с туманом достигает 6,3%, в Николаеве — 17%. Для внутриконтинентальных районов Сибири эта характеристика колеблется в среднем в пределах 3—5%.

Более однородно распределение по территории повторяемости приподнятых инверсий с туманом. Их повторяемость для большей части Советского Союза не превышает 2% и лишь несколько увеличивается на побережьях южных и восточных морей. Так, на побережье Каспийского моря повторяемость приподнятых инверсий с туманом возрастает до 3—4%, на Дальнем Востоке 7% (бухта Нагаева).

Как видно из приведенного краткого обзора, основной особенностью теплого полугодия является повышенная повторяемость приземных и приподнятых инверсий с туманом в прибрежных районах морей при относительно небольшой повторяемости в центральных районах континента. Такой характер распределения в значительной степени обусловлен повторяемостью туманов в теплый период и условиями бризовой циркуляции, способствующими возникновению в этих районах адвективных инверсий.

В холодное полугодие (октябрь — март) распределение приземных инверсий с туманом существенно отличается от теплого полугодия и в первую очередь по абсолютным значениям.

Районом высокой повторяемости приземной инверсии с туманом является Центральная Якутская равнина и Колымская низменность (до 70% случаев). Повторяемость приземных инверсий с туманом резко уменьшается по мере приближения к восточному побережью. Так, в бухте Нагаева она составляет только 0,1 в п. Анадырь — 3,8%.

Для ЕТС можно выделить две зоны с более высокой повторяемостью приземных инверсий с туманом: побережье северных морей и юго-восточную часть ЕТС (Волгоград — 6%, Ростов — 7%, Дону — 7%) с западным побережьем Каспийского моря (в Махачкале до 20%). Для остальной части ЕТС она не превышает 3%.

Существенные отличия в повторяемости инверсий с туманом между теплым и холодным полугодиями наблюдаются в районе Средней Азии. Высокая температура и малая абсолютная влажность воздуха в теплый период неблагоприятны для конденсации водяного пара и только при адвекции воздушных масс главным образом в холодный период года могут образовываться туманы.

менно поэтому в холодное полугодие здесь местами наблюдается 8—11% случаев приземных инверсий с туманом.

Повторяемость приподнятых инверсий с туманом в холодное полугодие по всей территории Советского Союза несколько выше, чем в теплое, и равна в среднем около 2%. Исключение составляет ряд районов, в которых наблюдается некоторый рост повторяемости приподнятых инверсий. К ним относятся побережье Каспийского моря (в Махачкале до 15%), некоторые районы Средней Азии (в Ташкенте 7,2%, в Алма-Ате 16,3%) и район Дальнего Востока (в Комсомольске-на-Амуре 7%, в Николаевске-на-Амуре 9%).

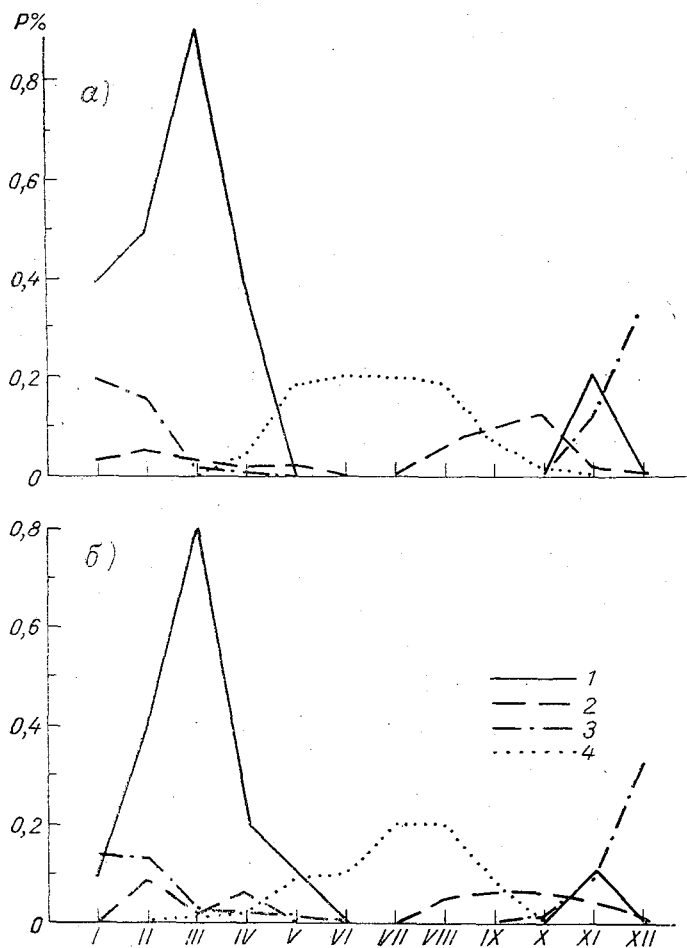


Рис. 1. Годовой ход повторяемости (%) приземных (а) и приподнятых (б) инверсий с туманом при скорости ветра меньше 2 м/с.

1) I тип, 2) II тип, 3) III тип, 4) IV тип.

Таким образом, для холодного полугодия характерна высокая повторяемость приземных и приподнятых инверсий с туманом в центральных районах Восточной Сибири, а также в районе Каспийского моря, что обусловлено наличием мощных инверсий температуры и высокой повторяемостью туманов в этот период года.

На основании данных о распределении приземных и приподнятых инверсий с туманом в течение года можно выделить несколько характерных типов распределений этой характеристики. Основное различие типов годового хода заключается в положении максимума повторяемости инверсии с туманом.

Нами были выделены четыре типа (рис. 1). Первый и второй типы — максимум повторяемости инверсий с туманом наблюдается в весенний или осенний период года. Для первого типа характерно почти полное отсутствие инверсий с туманом в летние месяцы. Для второго типа характерен более сглаженный годовой ход по сравнению с первым типом и то, что в летние месяцы наблюдаются инверсии с туманом. Первый тип распределения инверсий с туманом наблюдается в городах юго-восточной части ЕТС и на побережье Каспийского моря. Второй тип является характерным для большей части ЕТС и отдельных городов Сибири.

Третий тип — максимальное число дней с инверсиями и туманом приходится на зимние месяцы, минимальное — на летние. Этот тип характерен для районов Средней Азии и Восточной Сибири.

Четвертый тип — максимум повторяемости инверсий с туманом наблюдается летом, а минимум — в холодный период года. Он характерен для побережья Дальнего Востока и обусловлен в первую очередь муссонной циркуляцией в этих районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э. Ю. К определению потенциала загрязнения воздуха. — Труды ГГО, 1968, вып. 234, с. 69—79.
2. Безуглая Э. Ю. Инверсии температуры над территорией СССР. — Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 88—100.
3. Безуглая Э. Ю. и др. Связь инверсий температуры со скоростью и направлением ветра. — Труды ГГО, 1977, вып. 387, с. 101—109.
4. Берлянд М. Е., Оникул Р. И., Рябова Г. В. К теории атмосферной диффузии в условиях тумана. — Труды ГГО, 1968, вып. 207, с. 3—13.
5. Пеньков А. П. Продолжительность туманов на территории СССР. — Труды ВНИИГМИ-МЦД, 1975, вып. 24, с. 48—53.
6. Царев А. М. К вопросу о загрязнении воздуха при туманах. — Труды ГГО, 1975, вып. 352, с. 113—118.

СОДЕРЖАНИЕ

Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, Я. С. Канчан, Р. И. Оникул, С. С. Чичерин. О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников	3
Е. Берлянд, Е. Л. Генихович, И. Г. Грачева, Р. И. Оникул. Особенности распределения примесей в пересеченной местности	19
Г. Грачева. К разработке методики расчета рассеивания примесей в условиях сложного рельефа	36
Г. Хуршудян. Распространение тяжелых примесей в условиях сложного рельефа местности	45
Б. Киселев. К расчету рассеивания промышленных выбросов с учетом начального подъема в холмистой местности	54
Е. Берлянд, М. Г. Гольдберг, М. Н. Зашихин, Р. И. Оникул. К теории распространения солнечной радиации и оценке содержания аэрозоля в городской атмосфере	59
Л. Генихович, С. С. Чичерин. Двухпараметрическая модель рассеивания примеси от линейного источника при нормальных метеорологических условиях	67
С. Андреев, Н. С. Буренин, Б. Б. Горошко, Г. А. Панфилова. Результаты сравнений экспериментальных и расчетных концентраций в районе тепловой электростанции с высотой выброса 320 м	74
Н. Пьянцев, Л. Р. Сонькин, В. А. Храпаченко. Повторяемость и продолжительность периодов относительно высокого уровня загрязнения воздуха	79
Ю. Безуглая, Н. Н. Бороздина, Л. А. Лаврова, З. И. Макроусова, Л. И. Онуфриева. Высота слоя перемешивания	84 ✓
И. Елекоева. О суточном ходе повторяемости приземных инверсий температуры на территории СССР	90
П. Грачева. О территориальном распределении максимальных значений коэффициента турбулентного обмена в приземном слое атмосферы	96
А. Павленко, Н. Ш. Вольберг. Использование твердых сорбентов при определении окислов азота	105
А. Ионин, Н. А. Першина. Методика определения коррозионной агрессивности атмосферы по воздействию на металлические образцы	113
А. Янковский. Опыт и практика работы службы наблюдения за загрязнением атмосферы	117
С. Матвеев, В. А. Садаков, Г. В. Осипов, И. А. Янковский. К выбору рациональной структуры измерительно-регистрирующего тракта автоматизированного поста наблюдения за загрязнением воздуха	121
Н. Владимирова, Р. К. Говш, Т. И. Чугунова, А. М. Царев. Некоторые результаты изучения повторяемости туманов при инверсии температуры для оценки потенциала загрязнения воздуха	126

CONTENTS

- M. E. Berlyand, E. L. Genikhovich, Ja. S. Kanchan, R. I. Onikul, S. S. Chicherin. On estimation of mean annual pollutant concentrations from industrial sources
- M. E. Berlyand, E. L. Genikhovich, I. G. Gracheva, R. I. Onikul. Peculiarities of pollutant diffusion over crossed terrain
- I. G. Gracheva. On elaboration of the estimation technique for pollutant diffusion under complex relief conditions
- L. G. Khurshudyan. Dispersion of heavy pollutant under complex relief conditions
- L. B. Kiselev. On the calculation of the dispersion of industrial emissions in hilly relief including plume rise effects
- M. E. Berlyand, M. G. Golderg, M. N. Zashikhin, R. I. Onikul. On the theory of solar radiation dispersion and estimation of aerosol content in the urban atmosphere
- E. L. Genikhovich, S. S. Chicherin. Two-parametrical model for pollutant dispersion from linear source under normal meteorological conditions
- V. S. Andreev, N. S. Burenin, B. B. Goroshko, G. A. Panfilova. Comparison results of experimental and calculated concentrations in the region of thermal power station with emission height of 320 m.
- B. N. Pyantzev, L. R. Son'kin, V. A. Khrapachenko. Occurrence and duration of relatively high air pollution level
- A. Ju. Bezuglaya, N. N. Borozdina, L. A. Lavrova, Z. I. Macrousova, L. I. Onufrieva. Mixing layer height
- E. I. Jelikoeva. On diurnal variations of occurrence of near ground temperature inversions for the territory of the USSR
- V. P. Gracheva. On distribution of maximum values of turbulent exchange coefficient over territory in the near ground air layer
- A. A. Pavlenko, N. Sh. Volberg. Application of solid sorbents to determination of nitrogen oxides
- V. A. Ionin, N. A. Pershina. Estimation technique for corrosion activity of the atmosphere on basis of its effect on metal samples
- I. A. Jankovsky. Experience and practice of operation of the service for air pollution observations
- V. S. Matveev, V. A. Sadakov, G. V. Osipov, I. A. Jankovsky. On choosing the rational structure of measuring-recording device of automatized observation posts for air pollution
- V. N. Vladimirova, R. K. Govsh, T. I. Chugunova, A. M. Tzarev. Certain results of the study of fog occurrence under temperature inversions for estimation of air pollution potential

К 551.510.04

О расчете среднегодовых концентраций примеси в атмосфере от промышленных источников. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Канчан Я. С., Оникул Р. И., Чичерин С. С. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 3—18.

Рассмотрены физические основы определения осредненных за длительный период времени (сезон, год) концентраций примеси от одного и группы источников. Проведены расчеты на ЭВМ с использованием климатологических данных о совместной плотности вероятности распределения скоростей ветра и коэффициентов турбулентности, а также розы ветров. Выполнены теоретические оценки отношения максимальных средних и разовых концентраций для одного источника и совокупности источников в зависимости от параметров вы-
броса.

Илл. 5. Библ. 17.

К 551.510.04

Особенности распространения примесей в пересеченной местности. Берлянд М. Е., Генихович Е. Л., Грачева И. Г., Оникул Р. И. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 19—35.

Проведено теоретическое исследование закономерностей рассеивания примесей в пересеченной местности. На основе численного решения системы уравнений турбулентного пограничного слоя получены распределения скорости воздушного потока и характеристики турбулентного обмена. Установлены пределы применимости метода потенциальных течений. Представлены графики, позволяющие оценить влияние рельефа произвольной формы на поле концентрации примесей.

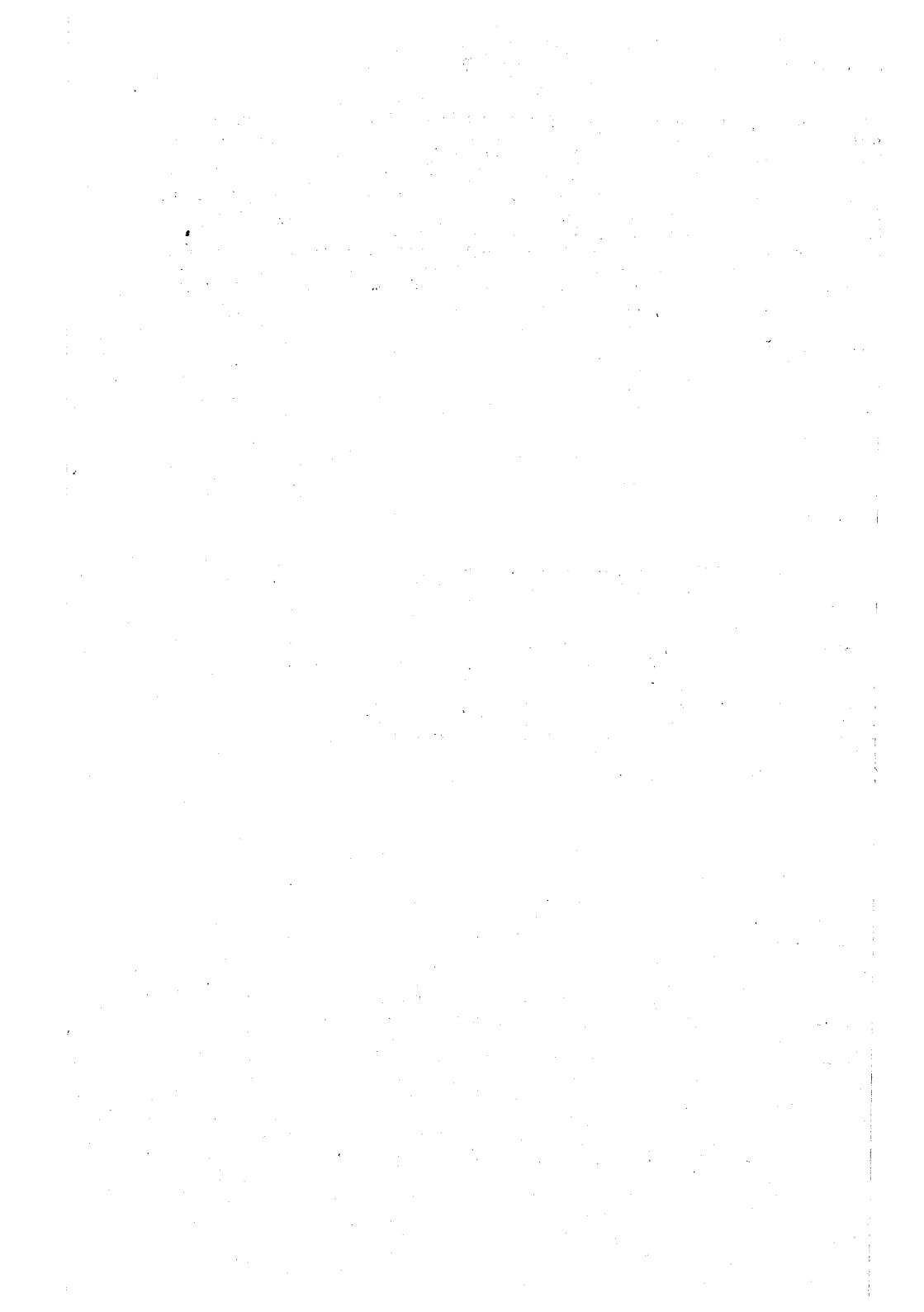
Табл. 2. Илл. 5. Библ. 15.

К 551.510.04

К разработке методики расчета рассеивания примесей в условиях сложного рельефа. Грачева И. Г. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 36—44.

Излагается методика систематизации результатов решения задачи о распространении примесей в условиях холмистой местности. Описаны универсальные графики и номограммы, позволяющие рассчитывать поправочные множители к максимальной наземной концентрации, к расстоянию от источника до точки, где достигается этот максимум, и к высоте трубы. Приведена схема расчета концентраций на рельефе и даны практические рекомендации по ее использованию.

Табл. 1. Илл. 3. Библ. 6.



Распространение тяжелых примесей в условиях сложного рельефа местности. Хуршудян Л. Г. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 45—53.

На основе численного решения уравнения турбулентной диффузии исследовано рассеяние тяжелой примеси от приподнятого точечного источника, расположенного на местности со сложным рельефом. Рассчитаны поправочные множители к максимальной наземной концентрации легкой примеси, рассеиваемой в условиях холмистого рельефа, и тяжелой примеси, рассеиваемой на ровной местности. Приведены зависимости этих множителей от положения точечного источника и скорости осадки примеси. Полученные результаты могут быть использованы при оценке загрязнения воздуха промышленными объектами.

Табл. 2. Илл. 1. Библ. 7.

К расчету рассеивания промышленных выбросов с учетом начального подъема в холмистой местности. Киселев В. Б. Труды ГГО, 1979, вып. 7, с. 54—58.

Рассчитаны поправочные множители к максимальной наземной концентрации примеси при опасной скорости ветра в холмистой местности. Предложен метод приближения полученной зависимости номографируемыми функциями. Построены номограммы для определения поправочных множителей.

Илл. 1. Библ. 4.

К теории распространения солнечной радиации и оценке содержания аэроля в городской атмосфере. Берлянд М. Е., Гольдберг М. Г., Зашиин М. Н., Оникул Р. И. Труды ГГО, 1979, вып. 417, с. 59—66.

Находится численное решение системы уравнений, описывающих перенос лучевой радиации в городской атмосфере, в которой выделяется нижний слой, наиболее существенно загрязненный аэрозолями. Результаты расчетов позволяют оценить высоту и оптическую толщину аэрозольного слоя над городом, притоки тепла к нему и некоторые другие характеристики на основании данных о прямой и рассеянной солнечной радиации и дальности видимости или озаренности вблизи подстилающей поверхности. Приводятся примеры расчета. Разработана также теоретическая схема, дающая возможность использовать решения поставленной задачи наклонную дальность видимости.

Табл. 1. Илл. 1. Библ. 8.

