

УДК 504.3.054

## РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В СОЛИГОСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ

*д-р физ.-мат. наук Н.С. ЛЕШЕНЮК, А.О. САЛИКОВ*  
*(Международный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск),*  
*канд. физ.-мат. наук В.М. ПОПОВ*  
*(Институт физики НАН Беларуси, Минск)*

*Предложена модифицированная методика Гаусса, позволяющая более точным образом рассчитывать подъем факела. Предлагаемая методика была реализована в виде компьютерной программы. Сравнение с литературными данными показывает, что результаты расчета по модифицированной методике хорошо согласуются с экспериментом. Приведены результаты расчета распространения загрязнений в районе ПО «Белкалий». Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о возможном использовании представленной методики в целях мониторинга распространения примесей в крупных промышленных регионах.*

**Введение.** В настоящее время основной нормативной методикой, применяемой в нашей стране для расчета распространения примесей, является методика ОНД-86 [1]. В основе этой методики лежат численные решения уравнения турбулентной диффузии и их последующая аналитическая аппроксимация [2, 3]. При разработке методики использовались профили скорости ветра и коэффициенты турбулентной диффузии, которые соответствуют наибольшим значениям максимума приземной концентрации, достигаемым при так называемой опасной скорости ветра. Цель, поставленная разработчиками этой методики, - создать единую для всего СССР модель (причем, не ориентированную на использование ЭВМ) - привела к необходимости принятия многочисленных приближений и допущений, которые заметно снизили достоинства результирующей методики. Прежде всего, отказ от учета конкретной реализуемой стратификации атмосферы делает проблематичным использование ОНД-86 для динамического моделирования распространения примеси.

В то же время, существующие численные методы решения уравнения турбулентной диффузии могли бы теоретически обеспечить необходимую точность решения. Но, с одной стороны, из-за невозможности задания с необходимой точностью начальных и граничных условий, а также из-за неоднозначности задания параметров, входящих в уравнение, и, с другой стороны, из-за громоздкости самого численного решения использование данного метода остается проблематичным.

В работах [6, 7] представлена оригинальная модель расчета распространения примесей в атмосфере, основанная на аналитических выражениях, полученных при решении стационарного полуэмпирического уравнения атмосферной диффузии с использованием факторизации решения диффузионной задачи. В этих же работах приведены результаты расчетов по трем методикам и сравнение с измерительными данными. Результаты данных работ показывают перспективность использования метода Гаусса для практических расчетов, поскольку данные, рассчитанные по обеим методикам близки друг к другу. Следует также отметить, что, с одной стороны, представленная в работах [6, 7] методика расчета близка по своей форме к выражениям, описывающим модель Гаусса, с другой стороны, параметры, входящие в гауссову модель факела, имеют более прозрачный физический смысл и развитие данной модели может идти по пути уточнения методов определения этих параметров.

В данной работе приводится модифицированный метод Гаусса, основным отличием которого от метода ОНД-86 является то, что он позволяет учитывать различные состояния атмосферы. С другой стороны, метод довольно прост и может быть легко реализован в виде компьютерных программ, доступных широкому кругу пользователей.

**Гауссова модель факела.** Для практических расчетов удобно использовать обобщенную гауссову модель для стационарного источника [5,7]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)}\right] \right\}, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $Q$  – мощность непрерывного точечного источника,  $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $U$  – скорость ветра,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $H$  – эффективная высота источника,  $\text{м}$ ;  $y$  – расстояние в поперечном направлении от оси факела,  $\text{м}$ ;  $z$  – высота над уровнем земли,  $\text{м}$ . Последнее слагаемое, соответствующее фиктивному отраженному источнику на глубине  $H$  под землей, описывает отражение факела от земли.

Скорость ветра  $U$  в уравнении (1) следует определять на уровне эффективной высоты источника Я. Поскольку вблизи промышленного предприятия скорость ветра измеряется лишь на одном уровне у поверхности земли (обычно 10 м), необходимо экстраполировать результаты этих измерений вплоть до эффективной высоты источника. Из анализа современных моделей, позволяющих определить скорость ветра, была выбрана [5, 7] следующая расчетная формула:

$$U(z) = U(z_1) \left( \frac{z}{z_1} \right)^p, \tag{2}$$

где  $U(z_1)$  – измеренная скорость ветра на высоте  $z_1$ . Результаты оценки расчетных значений  $p$  в зависимости от класса устойчивости и параметра шероховатости  $z_0$ , м, приведены в табл. 1 [5]. Для уровней выше 100 м скорость ветра принимается равной ее значению на высоте 100 м.

Таблица 1

Оценка показателя степени  $p$  в выражении (2)

Параметр шероховатости, $z_0$ м	Класс устойчивости					
	A	B	C	D	E	F
0,01	0,05	0,06	0,06	0,12	0,32	0,53
0,10	0,08	0,09	0,11	0,16	0,34	0,54
1,00	0,17	0,17	0,20	0,27	0,38	0,61
3,00	0,27	0,28	0,31	0,37	0,47	0,69

Используемый в исходной гауссовой модели факела метод оценки начального подъема выбросов основан на эмпирическом анализе наблюдений за дымовыми факелами, на наш взгляд, не обеспечивает необходимой точности результатов, поэтому был использован метод, предложенный Берляндом [2]. Он основан на решении системы уравнений движения, притока тепла и энергии и нахождении из этих уравнений скорости движения на оси струи  $w_m$  и температуры перегрева  $\Delta T_m$ . На основе решения этой системы в работе [2] была предложена формула для определения начального подъема:

$$\Delta H = \frac{1,5w_0R_0}{u} \left( 2,5 + \frac{3,3gR_0\Delta T}{T_a u^2} \right). \tag{3}$$

Здесь  $u$  – скорость ветра на высоте флюгера;  $R_0$  – радиус устья трубы;  $w_0$  и  $\Delta T$  – соответственно скорость и перегрев выходящих газов;  $T_a$  – температура окружающего воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения.

Значения стандартных отклонений  $a(x)$  и  $\sigma(z)$  определяются эмпирическим методом, например, с помощью кривых Пэскуила - Гиффорда. Эти кривые построены для каждого из семи классов устойчивости, начиная от A (наименьшая устойчивость) и вплоть до F (наибольшая устойчивость), и регулярно обновляются. Эти классы устанавливаются в зависимости от значений облачности, скорости ветра, инсоляции и определяются величиной масштаба Монина - Обухова  $L$  [6]:

- сильнонеустойчивый,  $L = -2$  м;
- умереннонеустойчивый,  $L = -10$  м;
- слабонеустойчивый,  $L = -100$  м;
- нейтральный,  $L = 100000$  м;
- слабоустойчивый,  $L = 20$  м;
- умеренноустойчивый,  $L = 4$  м;
- сильноустойчивый,  $L = 2$  м.

В табл. 2 представлены аналитические выражения для определения  $\sigma(x)$  и  $\sigma(z)$ , приведенные в работе [5]. Предложенные выражения позволяют достаточно точно решать задачи переноса примесей применительно к условиям городской застройки и сельской местности. Они применимы для расстояний от источника до 10 км (время отбора проб примерно 20 мин; значения параметра шероховатости примерно 3 см в сельской местности и 1 м - в городе).

**Сравнение расчетных и экспериментальных данных.** Анализ эффективности предложенной методики проводился на примере распространения загрязнений в Солигорском промышленном районе.

Для проведения расчетов была написана программа, позволяющая получать значения приземных концентраций газов и аэрозолей в зависимости от даты и времени наблюдений, скорости и направления ветра на высоте флюгера, стратификации атмосферы.

Таблица 2

Значения стандартных отклонений  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  для расстояний  $10^2 < x < 10^4$  м

Класс устойчивости по Пэскуилу	$\sigma_y$ м	$\sigma_z$ м
Сельская местность		
A	$0,22x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,20x$
B	$0,16x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	$0,11x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,0002x)^{-1/2}$
D	$0,08x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x(1+0,0015x)^{-1/2}$
E	$0,06x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x(1+0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x(1+0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x(1+0,0003x)^{-1/2}$
Городская застройка		
A – B	$0,32x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,24x(1+0,0001x)^{1/2}$
C	$0,22x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,20x$
D	$0,16x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,14x(1+0,0003x)^{-1/2}$
E – F	$0,11x(1+0,0004x)^{-1/2}$	$0,08x(1+0,00015x)^{-1/2}$

Программа позволяет производить расчет четырех рудоуправлений объединения «Белкалий» одновременно, независимо друг от друга, с последующим учетом вклада каждого источника в зависимости от направления ветра. Моделируемый район представлен как прямоугольная область размером 25 x 15 км, которая выбиралась с тем расчетом, чтобы все четыре рудоуправления и город Солигорск находились в его пределах (рис. 1). Координаты всех источников указываются относительно левого нижнего угла этого прямоугольника.

В соответствии с выбранной системой отсчета координаты источников имеют следующие значения:

- 8,3 км; 6,3 км - первое рудоуправление;
- 2,5 км; 10,5 км - второе рудоуправление;
- 10,3 км; 11,3 км - третье рудоуправление;
- 21,0 км; 4,5 км - четвертое рудоуправление.

Направление ветра задается как угол относительно оси  $Ox$ , против часовой стрелки. При работе программы на первом этапе производится расчет стандартных отклонений  $\sigma_y$  и  $\langle x_z \rangle$ , скорости ветра  $U(z)$  и начального подъема выбросов  $AH$  в отдельности для каждого источника. На следующем этапе моделируемый регион разбивается на прямоугольную сетку с шагом по осям  $Ox$  и  $Oy$  100 м и в каждом узле вычисляется значение концентрации  $C(x, y, z)$  для заданного пользователем значения  $g$ . На заключительном этапе производится учет суммарного вклада от всех четырех источников. По завершении расчета данные могут быть переданы в другие программы (например, Excel) для их дальнейшей обработки и графического отображения.

В качестве экспериментальных данных использовались данные измерений поста санэпидемстанции Солигорска (соответствующие координаты: 4,8 км; 3,2 км) в 1992 году за период март - апрель и июнь - август. Данные на станции отбираются ежедневно в 7<sup>00</sup> и 13<sup>00</sup>; проводятся измерения концентрации пыли,  $SO_2$ ,  $HC1$  и  $NO_x$ . К сожалению, после отбора имеющихся экспериментальных данных оказалось, что выборки включают не более 10... 12 точек. Основным критерием пригодности здесь является наличие требуемых для расчета концентраций метеоданных и данных о мощностях источников выбросов на время измерений. Дополнительным условием является ветер, имеющий направление во время измерений от рудоуправлений на город. В противном случае концентрации измеряемых компонентов в районе поста метеостанции определяются главным образом источниками, находящимися в городе. Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено в табл. 3.

Из приведенных данных видно, что средняя ошибка составляет примерно 100... 150 %, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными. Некоторое превышение экспериментальных данных над результатами расчетов можно объяснить наличием фоновых концентраций от городских источников.

Таблица 3

Сопоставление данных измерений поста СЭС Солигорска с результатами расчетов по методике Гаусса

Дата/время	Эксп., мг/м <sup>3</sup>	ОНД	Гаусс	Модифицированный метод Гаусса
29.04/7 <sup>00</sup>	0,004	0,0007	0,0002	0,003
29.04/13 <sup>00H</sup>	0,002	0,0001	0,00003	0,002
13.06/7 <sup>00</sup>	0,03	0,004	0,003	0,01
14.06/13 <sup>00</sup>	0,03	0,001	0,00002	0,035
15.06/7 <sup>00</sup>	0,038	0,01	0,003	0,030
25.06/7 <sup>00</sup>	0,0	0,0	0,0	0,003
26.06/7 <sup>00</sup>	0,05	0,01	0,01	0,007
26.06/13 <sup>00</sup>	0,016	0,0	0,0	0,018
27.06/13 <sup>00</sup>	0,034	0,003	0,001	0,029
28.06/7 <sup>00</sup>	0,0	0,0002	0,00004	0,015
22.11/13 <sup>00</sup>	0,004	0,0001	0,0	0,008

На рис. 2, 3 показано сопоставление результатов расчетов по двум методикам: ОНД-86 и Гауссовской методике. Сопоставлялись продольные подфакельные распределения концентраций SO<sub>2</sub> для основного источника первого рудоуправления ПО «Белкалий», мощность выброса которого равна 550 г/с. Графики приведены для нейтральной «D» и слабонеустойчивой стратификации «B».

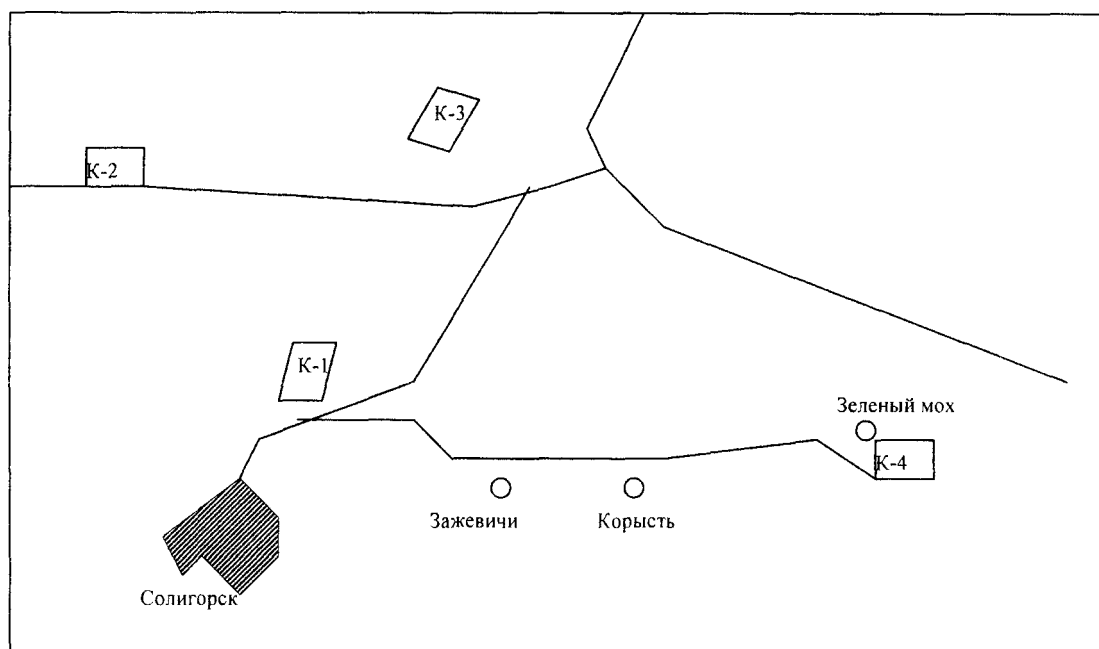


Рис. 1. План-схема Солигорского промышленного района

Для слабонеустойчивой стратификации результаты расчетов примерно совпадают. В частности, для значений, рассчитанных по методу Гаусса, наблюдается сильно выраженный максимум концентрации на расстоянии примерно 1 км от источника. С другой стороны, для нейтральной стратификации «D» и скорости ветра  $u = 5$  м/с и  $u = 10$  м/с значения концентрации, рассчитанные по методике ОНД-86, больше, чем значения, рассчитанные по методике Гаусса. В работе [7] при аналогичных атмосферных условиях большие значения принимают концентрации, рассчитанные по методу Гаусса. Различие полученных данных объясняется, по всей видимости, тем, что в работе [7] используются различные выражения для определения первоначального подъема факела. Учитывая, что методика ОНД-86 предназначена для определения максимальных концентраций при так называемых «опасных» атмосферных условиях, значения концентрации, полученные в настоящей работе, представляются более правдоподобными.

Также из анализа рис. 2 и 3 можно сделать вывод, что в модели Гаусса при нейтральной стратификации большую роль играет перенос под действием ветра, тогда как при слабонеустойчивой стратификации большую роль в распространении примеси играет диффузия.

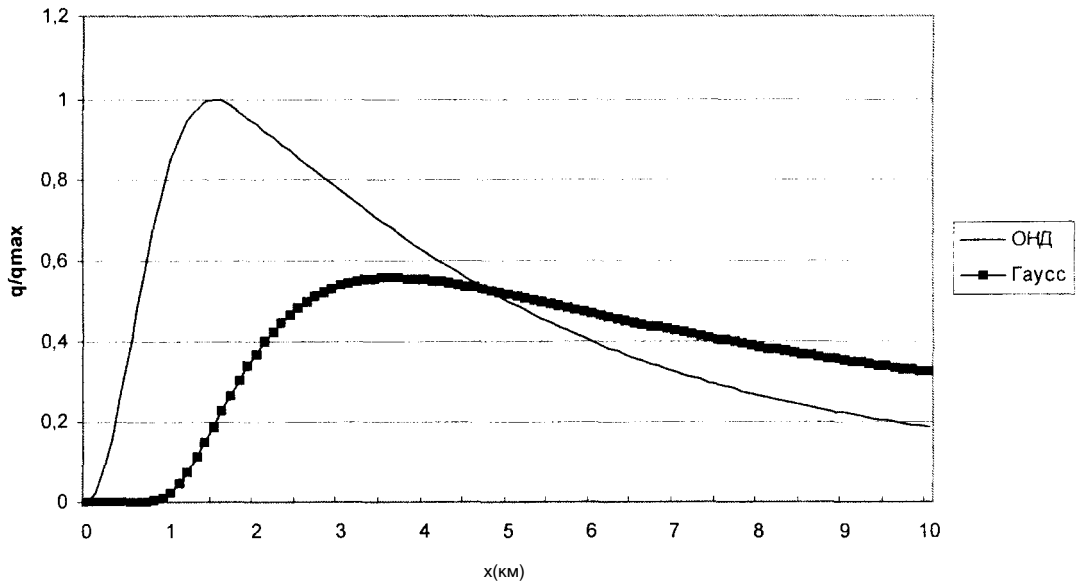


Рис. 2. Сопоставление продольных распределений концентраций, рассчитанных по двум методикам (нейтральная стратификация;  $u = 5$  м/с)

Существенные различия в результатах двух методик наблюдается при построении вертикальных профилей распределения концентраций [7].

На рис. 4 и 5 представлены данные, полученные соответственно по методике Гаусса и ОНД-86. Характерной особенностью данных, полученных по методике ОНД-86, является то, что высота, на которой достигается максимальная концентрация, остается практически постоянной при различном удалении от источника и равна примерно его высоте (рис. 5). С другой стороны, исходя из графиков для модели Гаусса (рис. 4) можно сделать вывод, что на некотором расстоянии от источника (равном примерно его двойной высоте) максимальная концентрация примеси достигается на минимальной высоте, после чего высота начинает линейно возрастать. Для модели ОНД-86 эта высота с изменением расстояния от источника остается практически постоянной.

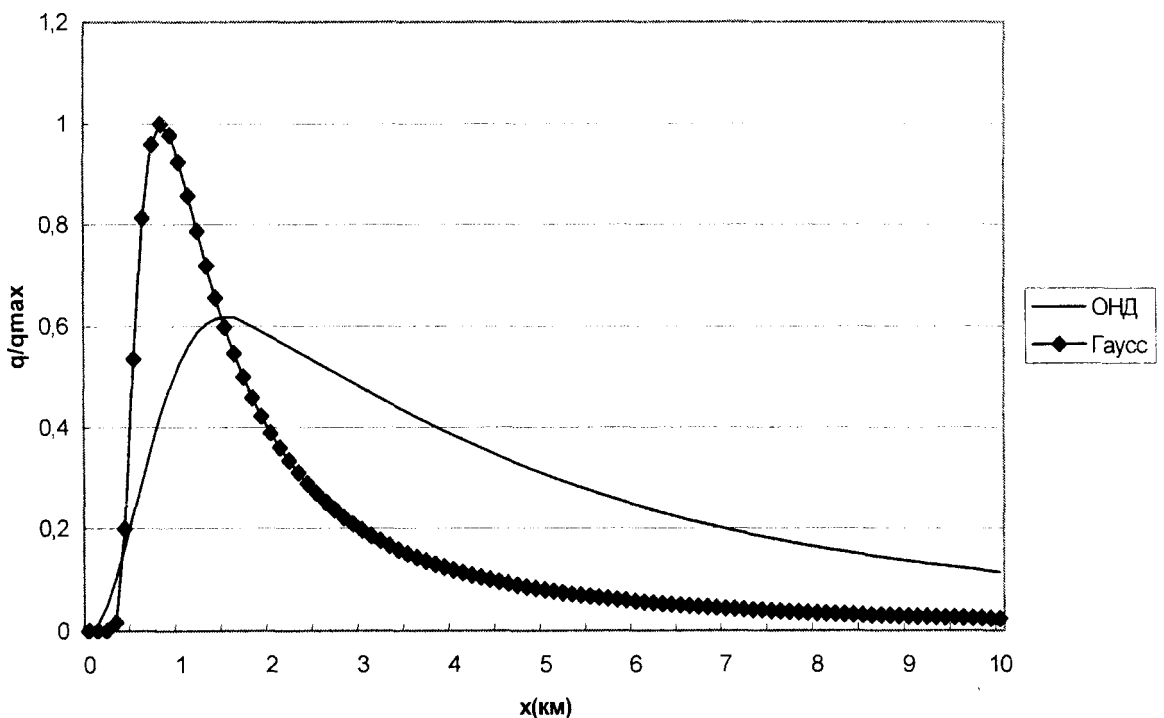


Рис. 3. Сопоставление продольных распределений концентраций, рассчитанных по двум методикам (слабонеустойчивая стратификация;  $u = 5$  м/с)

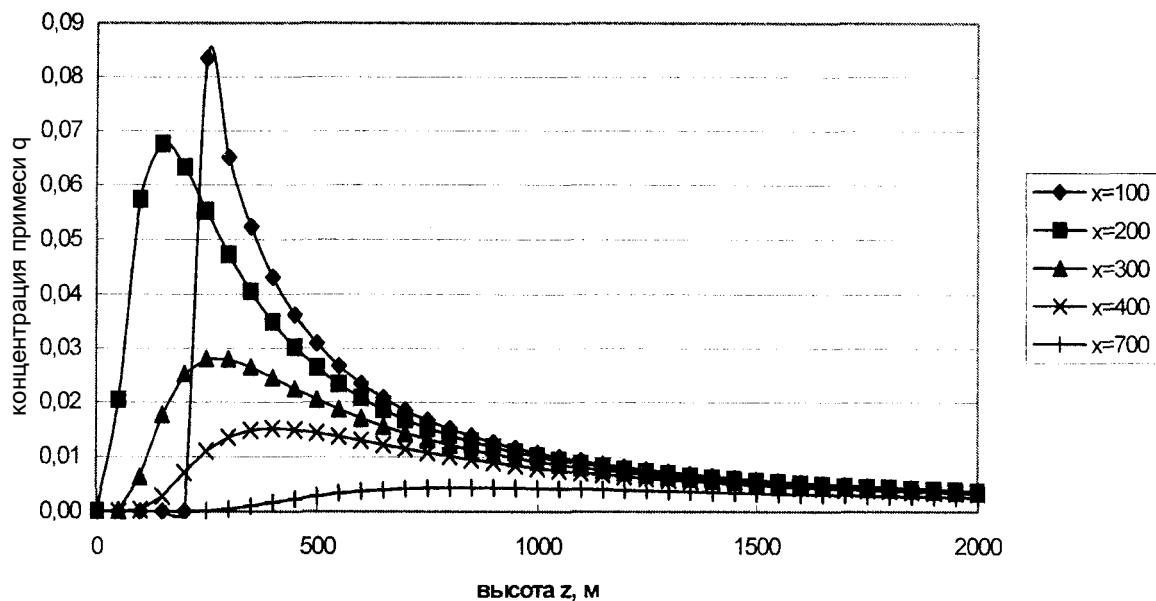


Рис. 4. Распределение примеси по вертикали в зависимости от расстояния от источника, рассчитанное по методу Гаусса (нейтральная стратификация;  $u = 5$  м/с)

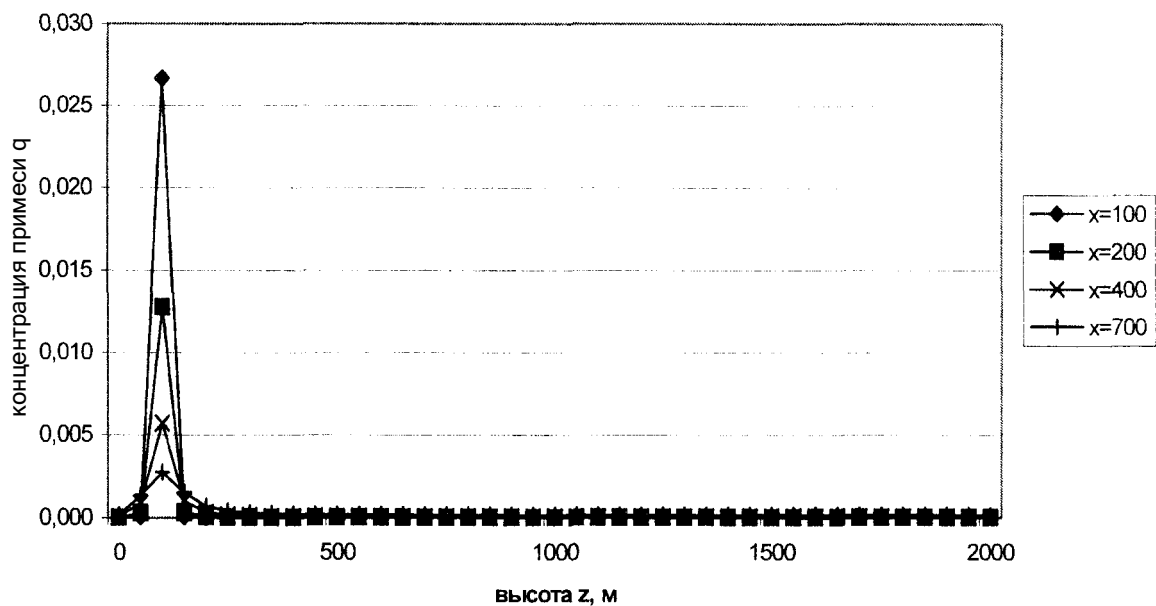


Рис. 5. Распределение примеси по вертикали в зависимости от расстояния от источника, рассчитанное по методике ОНД-86 (нейтральная стратификация;  $u = 5$  м/с)

На рис. 6 представлено поле концентраций  $S_{O_2}$ , соответствующее слабонеустойчивой стратификации северо-западному направлению ветра, полученное для всех 4-х комбинатов ПО «Белкалий».

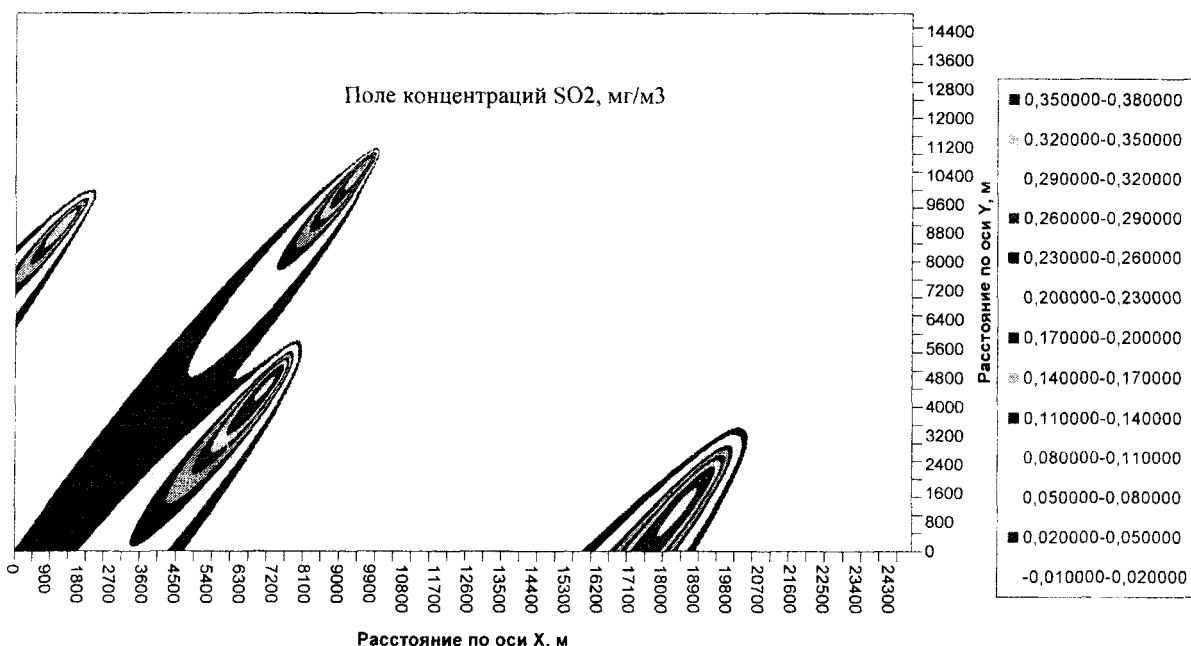


Рис. 6. Поле концентраций  $\text{SO}_2$  в районе Солигорского промышленного региона

**Выводы.** В результате проведенного анализа промышленных характеристик ПО «Белкалий», сравнения результатов расчета с приведенными данными в работах [8, 9] можно сказать, что модификация входящих в модель Гаусса параметров позволила значительно улучшить точность расчета. Наряду с этим входящие в нее параметры имеют прозрачный физический смысл и легко поддаются оценке. Несомненным преимуществом данной модели является также и то, что она позволяет учитывать стратификацию атмосферы. Представленная модель дает более правильные результаты для вертикального распределения примесей. Исходя из данных факторов, можно рекомендовать модель Гаусса для более широкого ее применения.

Также данная модель может быть дальше усовершенствована для учета фотохимических реакций, происходящих в атмосфере.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86 // Экологический вестник России. - 1991. - № 8. - С. 2 - 81.
2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. - Л.: Гидрометеоздат, 1975. - 448 с.
3. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. - Л., 1985. - 328 с.
4. Ньистадт Ф.Т.М., Ван Дон Х. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей: Пер. с англ. / Под ред. А.М. Яглома. - Л.: Гидрометеоздат, 1985. - 348 с.
5. Исследование ветрового распространения соляной пыли в Солигорском промышленном районе / А.И. Бриль, М.А. Другаченок, В.П. Кабашников и др. Препринт № 12, РНТЦ «Экомир». - Мн., 1993. - 50 с.
6. Разработка математической модели процессов поступления, рассеяния и осаждения аэрозольных примесей в воздушном бассейне Солигорского промышленного района / А.И. Бриль, В.П. Кабашников, А.А. Ковалев и др. Препринт № 20, РНТЦ «Экомир». - Мн., 1994. - 58 с.
7. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. - 448 с.