

УДК 502.3

DOI: 10.17277/voprosy.2025.03.pp.007-027

### **СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ**

**Е. С. Кулакова, В. И. Сафарова, А. М. Сафаров**

*Институт химических технологий и инжиниринга,  
филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет» в г. Стерлитамаке, Россия;  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», Уфа, Россия*

**Ключевые слова:** атмосферный воздух; загрязняющее вещество; застой; инверсия; конвекция; управление качеством.

**Аннотация:** Предложен подход к оценке качества атмосферного воздуха жилых кварталов около промышленных предприятий, основанный на разновысотном контроле и разнице в рассеивании различных загрязняющих веществ (ЗВ) в зависимости от класса устойчивости атмосферы. Разработан формализованный подход к управлению промышленными выбросами для условий нормального распространения токсикантов (свободной конвекции), штиля, а также приземной и приподнятой инверсий с целью создания благоприятной среды проживания населения (соблюдения качества атмосферного воздуха селитебных территорий).

#### **Введение**

Качество атмосферного воздуха в районах с высокой антропогенной нагрузкой контролируется на различных уровнях управления: государственном, промышленном и общественном. *Во-первых*, органы исполнительной власти, имеющие полномочия в области охраны окружающей среды (ОС), как федерального, так и субъектового уровня, проводят мониторинг качества атмосферного воздуха и выполняют мероприятия по кон-

---

Кулакова Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы», e-mail: kulakova87@list.ru, Институт химических технологий и инжиниринга, филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стерлитамаке, Россия; Сафарова Валентина Исаевна – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экоинжиниринг, природообустройство и экологические технологии»; Сафаров Айрат Муратович – доктор технических наук, профессор кафедры «Экоинжиниринг, природообустройство и экологические технологии», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия.

тролю химического состава компонентов ОС в зоне влияния промышленных предприятий. На основе полученных сведений концентрации загрязняющих веществ (**ЗВ**), метеорологических параметров формируется база данных о качестве воздушной среды жилых кварталов городов. Полученная достоверная информация направлена на формирование адекватных, правильных решений в области управления качеством атмосферного воздуха селитебных территорий. *Во-вторых*, специалисты предприятия проводят производственный экологический контроль согласно установленному и согласованному графику в целях недопущения превышения нормативов по негативному влиянию на компоненты окружающей среды. Данные мероприятия направлены на соблюдение действующего экологического законодательства РФ. *В-третьих*, согласно закону об охране ОС, допускается участие различных общественных организаций, которые могут защищать права и законные интересы граждан в области охраны окружающей среды.

Все проводимые мероприятия по контролю и регулированию деятельности промышленных предприятий в области влияния на химический состав атмосферного воздуха должны обеспечивать благоприятные условия проживания населения. Несмотря на многоуровневость и всесторонность экологического мониторинга, проблемы качества компонентов ОС полностью не решаются [1]. Регистрируются случаи превышения концентрации загрязняющих веществ в жилых кварталах городов.

Причиной является нарушение технологических режимов текущих выбросов в существующей метеорологической ситуации. Например, эмиссия в период неблагоприятных метеорологических условий (**НМУ**) не согласуется с коэффициентом самоочищения атмосферного воздуха.

Для повышения эффективности экологического контроля и управления качеством атмосферного воздуха населенных пунктов различными научными коллективами ведется усовершенствование систем мониторинга. Так, в Роспатенте зарегистрирована автоматизированная система контроля ядерных и рентгеновских излучений в компонентах окружающей среды [2]. Институтом оптики атмосферы Сибирского отделения Российской академии наук разработан автоматизированный комплекс для контроля воздуха города [3]. Аналогичные системы созданы ООО «ЭКОРОС» [4], группой авторов ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» [5]. Учеными Политехнического университета Мадрида разработан инструмент, позволяющий прогнозировать влияние токсикантов на население в зависимости от изменения климата [6]. В США Центром поддержки нормативного моделирования атмосферы разработан WEB-ресурс Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM) [7].

Моментная концентрация токсиканта в атмосферном воздухе определяется массовым расходом антропогенного выброса и метеорологическими условиями. Коэффициент очищения атмосферного воздуха повышается при усилении ветра, вымывании примесей с осадками [8]. Однако, в связи с тем, что токсиканты обладают различными физико-химическими свойствами, время их жизни и поведение в воздухе отличается. С целью проведения мониторинга концентрации загрязняющих веществ на различных высотах разработана система разноуровневого пробоботбора [9, 10], кото-

рая позволяет проводить измерение и регистрацию концентрации токсикантов на уровнях от 1 м, так как сегодня население проживает и ведет трудовую деятельность на различных высотах. Тем самым разноуровневый мониторинг предоставляет возможность получать достоверную информацию о качестве атмосферного воздуха по всему слою перемешивания. Точные сведения о содержании токсикантов позволяют принимать правильные решения в области предоставления населению благоприятных условий жизни.

*Цель работы* – исследование поведения вещества в приземном слое атмосферного воздуха в зависимости от его физико-химических свойств и, как следствие, разработка рекомендаций по изменению промышленных выбросов на основе установки разновысотного пробоотбора, то есть комплекса средств измерения концентрации загрязняющих веществ, метеорологических условий на различных высотах.

Для обеспечения качества атмосферного воздуха устанавливается определенная норма эмиссии (предельно допустимых выбросов (ПДВ)) загрязняющих веществ со всех антропогенных источников, чтобы процессы природного самоочищения способствовали поддержанию их концентрации в пределах гигиенических нормативов качества, а именно комплексный показатель качества компонента ОС

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (1)$$

где  $P$  – интегральный показатель загрязнения атмосферного воздуха;  $C_i$ ,  $\text{ПДК}_i$  – концентрация  $i$ -го вещества и его предельно-допустимая концентрация соответственно,  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

При этом материальный баланс содержания вещества  $i$  описывается следующим уравнением [11]:

$$\frac{dm_i}{dt} = Q_i - N_i, \quad (2)$$

где  $m_i$  – масса ЗВ в атмосферном воздухе,  $\text{мг}$ ;  $t$  – время наблюдения,  $\text{с}$ ;  $Q_i$  – масса выброса ЗВ из промышленных источников в единицу времени,  $\text{мг}/\text{с}$ ;  $N_i$  – скорость стока ЗВ из атмосферного воздуха,  $\text{мг}/\text{с}$ .

Концентрация газа определяется по формуле

$$C_i = \frac{m_i}{V}, \quad (3)$$

где  $V$  – объем атмосферного воздуха,  $\text{м}^3$ .

Преобразуя формулу (2), получаем

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_i - N_i}{V}. \quad (4)$$

Вследствие того, что система управления качеством атмосферного воздуха должна обеспечивать благоприятное состояние для жизнедеятельности населения и сохранения биоразнообразия, то на уравнение (4) на-

кладывается условие  $C_i \leq \text{ПДК}_i$ . Концентрация эмитента на некотором расстоянии  $x$  от источника определяется по распределению Гаусса, и для соблюдения нормативных значений должно выполняться следующее условие [10]:

$$C(y, z) = \frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left( e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right) \leq \text{ПДК}_i, \quad (5)$$

где  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  – дисперсии концентрации загрязняющего вещества соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях (определяются на основе класса устойчивости по Паскуиллу) [12, 13].

Для учета физико-химических свойств веществ требуется корректировка  $\sigma_z$ ,  $\sigma_y$  по коэффициенту молекулярной диффузии

$$\sigma_{\text{диф } z}, \sigma_{\text{диф } y} = \sigma_z, \sigma_y \left( 1 + \frac{D}{D_t} \right), \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D_t$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Коэффициент  $D_t$  можно взять из справочной таблицы [14]. Молекулярная диффузия газов рассчитывается по формулам Стефана–Максвелла, Фултона и Вилке [15, 16].

В формулах (2) и (4) скорость стока ЗВ из атмосферного воздуха определяется

$$N_i = C_i v S, \quad (7)$$

где  $C_i$  – текущая концентрация ЗВ в атмосферном воздухе города,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $v$  – скорость ветра,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $S$  – площадь территории,  $\text{м}^2$ ,

$$S = l H_{\text{сл.пер}}, \quad (8)$$

где  $l$  – ширина зоны переноса,  $\text{м}$ ;  $H_{\text{сл.пер}}$  – высота слоя перемешивания,  $\text{м}$ ;

$$l = 2L \tan(\vartheta), \quad (9)$$

где  $L$  – расстояние от источника до точки расчета,  $\text{м}$ ;  $\vartheta$  – угол рассеивания загрязненной газовой смеси.

Угол рассеивания может быть установлен согласно классу устойчивости по Паскуиллу [12, 13]: А –  $\vartheta \approx 90^\circ$ ; В –  $\vartheta \approx 60^\circ$ ; С –  $\vartheta \approx 45^\circ$ ; D –  $\vartheta \approx 30^\circ$ ; E –  $\vartheta \approx 15^\circ$ ; F –  $\vartheta \approx 10^\circ$ .

Величина  $N_i$  определяется метеорологическим и орографическими условиями, влияние на которые невозможно. Поэтому для сохранения благоприятного качества атмосферного воздуха населенных мест необходимо управлять значением  $Q_i$  в зависимости от текущей метеорологической ситуации. Следовательно,  $Q_i$  является величиной управляемой,  $N_i$  – управляющей.

Таким образом, управление химическим составом атмосферного воздуха города должно основываться:

- 1) на метеорологической ситуации;
- 2) текущей концентрации токсикантов в воздухе селитебной территории;
- 3) получении репрезентативных данных при проведении мониторинга качества атмосферного воздуха.

### **Материалы и методы**

В качестве исходных данных используются модели различных метеорологических ситуаций. Примеры расчетов выполнены на основе информации, полученной на автоматизированной станции контроля атмосферного воздуха (АСКАВ) в г. Стерлитамаке (Республика Башкортостан) по ул. Фурманова. Рекомендуемый промышленный выброс рассчитывается исходя из уравнения материального баланса (поступления и стока) содержания загрязняющих веществ в воздухе города.

#### **Условие нормальной конвекции (закон Гаусса, нормальное распределение)**

Условие нормальной конвекции характеризуется постоянной скоростью ветра, классом стабильности по Паскуиллу А, В, С, D, снижением температуры атмосферного воздуха с высотой [17]. В этом случае значение  $N_i$  является значительным вследствие  $H_{\text{сл.пер}} \gg 0$ . Для расчета  $N_i$  высоту слоя перемешивания определяют любым доступным методом (температурной стратификацией, радиозондированием, спутниковой, лидарной съемками и др.), либо принять среднее значение по региону. Например, для г. Уфы  $H_{\text{сл.пер}}$  изменяется от 350 м в зимний период до 1620 м – в летний [18].

При метеорологических условиях, соответствующих высокому коэффициенту диффузии, влияние промышленной эмиссии на загрязнение атмосферного воздуха города имеет место быть в случае, если газовое облако движется, пересекая жилые кварталы. Направление ветра является опасным, и требуется установить коэффициент влияния предприятия. Под безопасным понимается направление потока ветра, когда загрязненное газовое облако направляется в сторону от города. В этом случае массовый расход промышленного выброса определяется по установленному производственному ПДВ.

В общем виде, если выброс  $i$ -го ЗВ осуществляется из нескольких источников, суммарный массовый расход определяется (рис. 1)

$$Q_i = Q_1 + \dots + Q_N, \quad (10)$$

где  $Q_1, Q_N$  – массы выброса вещества  $i$  из антропогенных источников 1 и  $N$  соответственно.

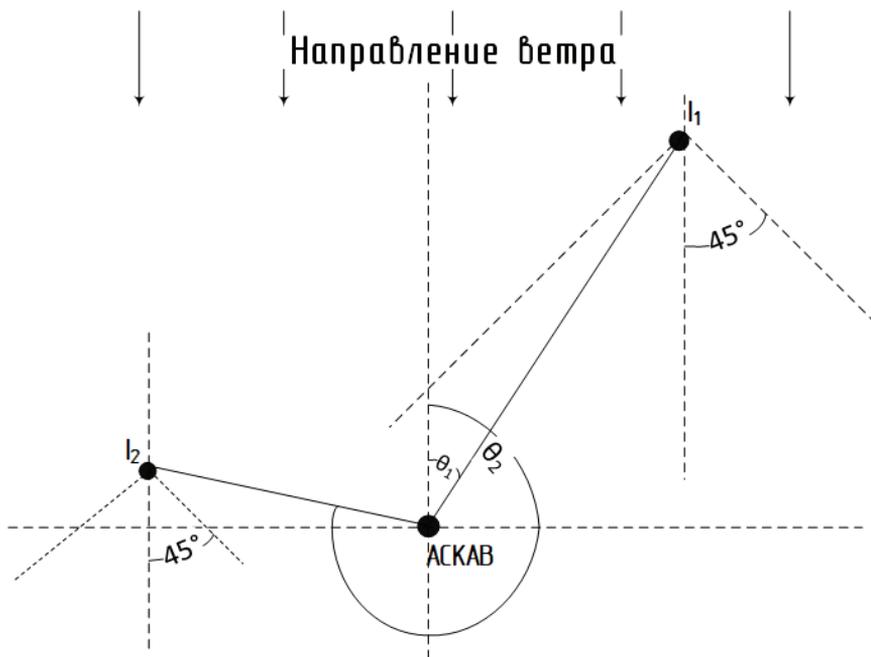


Рис. 1. Схема определения коэффициента влияния источника на концентрацию вещества

Однако при различных параметрах устойчивости атмосферного воздуха и ветрового режима влияние некоторых источников на содержание токсикантов в воздухе селитебных территорий не оказывается. Так, при стабильности типа А шлейф газового облака находится в границах сектора в  $90^\circ$ . В условиях установления класса устойчивости F зона распространения сужается до  $10^\circ$  [19]. Таким образом, формула (10) примет вид

$$Q_i = \infty_1 Q_1 + \dots + \infty_N Q_N, \quad (11)$$

где  $\infty_1$ ,  $\infty_N$  – коэффициенты влияния соответственно источников 1 и  $N$  на концентрацию вещества  $i$  в селитебной зоне.

В связи с тем, что каждый источник определяет содержание загрязняющего вещества  $i$  на АСКАВ, то

$$C_i = \infty_1 C_1 + \dots + \infty_N C_N, \quad (12)$$

где  $C_1$ ,  $C_N$  – концентрации вещества  $i$ , возникшие в результате рассеивания выброса соответственно из антропогенных источников 1 и  $N$ .

Рассмотрим влияние двух источников  $I_1$  и  $I_2$  на содержание вещества  $i$  в точке нахождения АСКАВ (см. рис. 1). Направление ветра  $0^\circ$ . Устойчивость атмосферного воздуха Паскуиллу типа А.

Для каждого источника выброса устанавливается азимут между точкой расположения АСКАВ и местом организованного выброса  $\vartheta_{\text{ист}}$ . Для источника  $I_1$  угол составляет  $\vartheta_{\text{ист}1}$ , для  $I_2$  –  $\vartheta_{\text{ист}2}$ .

При ветре  $0^\circ$  зоной охвата является сектор диапазона изменения  $(0 + 45 = 45^\circ, 0 - 45 = -45^\circ \Rightarrow 360 - 45 = 315^\circ) 315^\circ \dots 45^\circ$ . По рисунку 1 наглядно видно, что источник  $I_1$  входит в диапазон влияния, а  $I_2$  – нет. Коэффициенты  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$ .

Для построения диаграммы влияния выбросов промышленных источников на концентрацию эмитента в точке наблюдения требуется:

- 1) установить координаты точки наблюдения, для примера  $H(0, 0)$ ;
- 2) рассчитать координаты точек источников выброса по формулам:

$$x_{p_{ист1}} = r \cos(\vartheta_{ист1}); \quad y_{p_{ист1}} = r \sin(\vartheta_{ист1}); \quad (13)$$

- 3) определить класс устойчивости атмосферного воздуха по Паскуиллу;
- 4) определить угол сектора рассеивания согласно классу устойчивости атмосферного воздуха по Паскуиллу;
- 5) вычислить границы сектора влияния:

$$\vartheta_{\min} = \nu - \vartheta_{сект} / 2; \quad \vartheta_{\max} = \nu + \vartheta_{сект} / 2, \quad (14)$$

где  $\vartheta_{\min}, \vartheta_{\max}$  – соответственно максимальный и минимальный углы сектора рассеивания загрязненного газового облака;

- 6) определить точки границ сектора влияния:

$$x_{сект_{ист1}} = x_{p_{ист1}} + r \cos(\vartheta_{\min}); \quad y_{сект_{ист1}} = y_{p_{ист1}} + r \sin(\vartheta_{\min}); \quad (15)$$

- 7) определить  $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$ :

$$\sigma_{y\_base}(x) = a x^b; \quad \sigma_{z\_base}(x) = c x^d, \quad (16)$$

где  $x$  – расстояние от источника выброса до некоторой точки;  $a, b, c, d$  – коэффициенты, определяемые на основе класса устойчивости по Паскуиллу;

- 8) провести корректировку  $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$  для учета скорости ветра и расстояния от источника выброса до точки наблюдения:

$$\sigma_y(x), \sigma_z(x) = \sigma_{y\_base}, \sigma_{z\_base} \frac{r}{\sqrt{v}}; \quad (17)$$

- 9) рассчитать концентрацию вещества в точке наблюдения согласно формуле (5).

На рассеивание примесей в атмосферном воздухе оказывает влияние множество факторов, которые включают в себя параметры ландшафта и климата местности, источников выброса, поэтому формулу (12) можно преобразовать следующим образом:

$$C_i = \infty_1 d_1 Q_1 + \dots + \infty_N d_N Q_N, \quad (18)$$

где

$$d_1 = \frac{1}{2\pi v \sigma_{y1} \sigma_{z1}} e^{-\frac{y_1^2}{2\sigma_{y1}^2}} \left( e^{-\frac{(z_1 - H_1)^2}{2\sigma_{z1}^2}} + e^{-\frac{(z_1 + H_1)^2}{2\sigma_{z1}^2}} \right); \quad (\text{согласно (5)})$$

$$d_N = \frac{1}{2\pi v \sigma_{yN} \sigma_{zN}} e^{-\frac{y_N^2}{2\sigma_{yN}^2}} \left( e^{-\frac{(z_N - H_N)^2}{2\sigma_{zN}^2}} + e^{-\frac{(z_N + H_N)^2}{2\sigma_{zN}^2}} \right). \quad (\text{согласно (5)})$$

Мощность выброса источника определяется

$$Q = C_{\text{ист}} F_{\text{ист}}, \quad (19)$$

где  $C_{\text{ист}}$  – концентрация ЗВ на источнике выброса, мг/м<sup>3</sup>;  $F_{\text{ист}}$  – расход выброса источника, м<sup>3</sup>/с.

Расход газозвушной смеси определяется

$$F_{\text{ист}} = \frac{\pi D^2}{4} \omega, \quad (20)$$

где  $D$  – диаметр устья источника;  $\omega$  – скорость расхода газозвушной смеси.

С учетом формул (19) и (20), концентрация вещества в точке наблюдения определяется

$$C_i = \infty_1 d_1 C_{\text{ист}1} \left( \frac{\pi D_1^2}{4} \omega_1 \right) + \dots + \infty_N d_N C_{\text{ист}N} \left( \frac{\pi D_N^2}{4} \omega_N \right). \quad (21)$$

В условиях непрерывного выброса множественными источниками промышленных предприятий при штатных условиях выполняется условие сохранения качества атмосферного воздуха селитебных территорий и  $C_i < \text{ПДК}_i$ . При ситуации  $C_i > \text{ПДК}_i$  требуется проведение мероприятий по изменению параметров производственного выброса, а именно:

- 1) необходимо установить источники поступления ЗВ;
- 2) провести корректировку антропогенной нагрузки.

Источники поступления ЗВ в воздух выявляются на основе анализа данных, полученных на АСКАВ, по маркерным веществам и газам глобального распространения, поступающим с каждого источника. При свободной конвекции происходит распределение ЗВ по высоте, согласно их физико-химических свойствам. Кроме того, в воздухе городов образуются островки тепла, которые усиливают вертикальный транспорт примесей. Таким образом, измерение и регистрация концентрации токсикантов на различных высотах позволяет установить текущую ситуацию качества атмосферного воздуха города и на их основе принять решения по изменению объемов выброса.

Изменение параметров выброса определяется расчетным методом. Допущением является невозможность моментально оказать влияние на технологический процесс предприятия и скорректировать концентрацию токсиканта в газовой смеси, поэтому параметром изменения является расход газа на каждом из источников. Согласно формуле (15), можно определить изменение  $\omega$  на каждом из источников. Возможно несколько вариантов изменения параметров источников выброса.

Вариант 1. Источником выброса вещества  $i$  является одно предприятие. Для обеспечения условия сохранения качества атмосферного воздуха на различных высотах, согласно формуле (1), в качестве  $C_i$  необходимо использовать максимальное значение из массива измеренных концентрации вещества на различных высотах  $C_{i\max}$ . Пусть необходимо изменить массовый расход выброса на  $m$  источнике, тогда

$$\omega_m = \frac{4(C_{i\max} - \text{ПДК}_i)}{\pi D^2} \frac{1}{(\infty_m d_m C_{\text{ист } m})}. \quad (22)$$

Вариант 2. Источником выброса вещества  $i$  является  $N$  предприятий. Требуется корректировать фактический расход выброса со всех  $N$  источников равномерно, тогда

$$\omega_1 = \frac{4(C_{i\max} - \text{ПДК}_i)}{N\pi D_1^2} \frac{1}{(\infty_1 d_1 C_{\text{ист } 1})}, \dots, \omega_N = \frac{4(C_{i\max} - \text{ПДК}_i)}{N\pi D_N^2} \frac{1}{(\infty_N d_N C_{\text{ист } N})}. \quad (23)$$

Таким образом, алгоритм оценки соблюдения гигиенических нормативов вещества  $i$  в атмосферном воздухе представляет собой следующую последовательность действий:

- 1) определение перечня веществ, содержащихся на каждом источнике выброса, и коэффициентов  $d$ ;
- 2) измерение скорости и направления ветра, определение вектора пространства газового облака;
- 3) определение сектора влияния газового шлейфа;
- 4) определение перечня источников загрязнения;
- 5) измерение и регистрация концентрации вещества  $i$  в жилой зоне;
- 6) сравнение концентрации вещества  $i$  с ПДК;
- 7) при превышении концентрации вещества  $i$  на АСКАВ, расчет корректирующих коэффициентов фактического расхода выброса для каждого источника из п. 4 вышеприведенного алгоритма. Рекомендуемый расход промышленного выброса определяется на основе формул (22), (23).

Рассмотрим примеры свободного распространения загрязняющих веществ в г. Стерлитамаке (Республика Башкортостан) при благоприятных метеорологических условиях, где имеется множество источников промышленного выброса. Площадь города равна  $1,08 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ .

Пример 1. Рассмотрено рассеивание 1,2-дихлорэтана в атмосферном воздухе на основе данных АСКАВ от 25 января 2016 г. ночью в пасмурную погоду. Класс стабильности по Паскуиллу С. Угол сектора рассеивания равен  $45^\circ$ . Промышленная эмиссия осуществляется с одного источника, расположенного в северо-западном направлении на расстоянии 2,31 км до АСКАВ, азимут составляет  $330^\circ$ . Годовой выброс 439,6 т (13,9 г/с). Направление ветра  $351^\circ$ . Средняя скорость ветра 1,1 м/с. Концентрация 1,2-дихлорэтана составляет  $0,003402 \text{ мг/м}^3$ . Высота слоя перемешивания в январе 360 м [12].

Рассчитаем сектор влияния:  $\vartheta_{\min} = 351 - 22,5 = 328,5^\circ$ ;  $\vartheta_{\max} = 351 + 22,5 = 373,5^\circ$  ( $13,5^\circ$ ). Таким образом, азимут источников, оказывающих влияние на содержание эмитентов в атмосферном воздухе, находится в диапазоне  $328,5^\circ \dots 373,5^\circ$  ( $13,5^\circ$ ). Источник оказывает влияние на содержание 1,2-дихлорэтана в воздухе около АСКАВ, и  $\alpha_1 = 1$ ,  $C_i = \infty_1 d_1 Q_1$ .

Согласно (4):

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{13900 - 0,003402 \cdot 2310 \cdot 1,1 \cdot 360 \cdot \tan(45^\circ)}{39 \cdot 10^9} = 2,76 \cdot 10^{-7} \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Таким образом, за 1 с концентрация 1,2- $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$  в атмосферном воздухе города увеличивается на  $2,76 \cdot 10^{-7} \text{ мг}/\text{м}^3$ . Содержание газа через 1 ч составит  $0,004398 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Согласно расчету по распределению Гаусса, концентрация 1,2-дихлорэтана при заданных условиях составляет  $0,0056 \text{ мг}/\text{м}^3$ . На автоматизированной станции контроля атмосферного воздуха концентрация газа через 60 мин составила  $0,004889 \text{ мг}/\text{м}^3$ .

Пример 2. Проведен расчет концентрации бензола в атмосферном воздухе по данным на 3 января 2016 г., днем в пасмурную погоду. Класс стабильности по Паскуиллу С. Угол сектора рассеивания равен  $45^\circ$ . Направление ветра  $347^\circ$ . Средняя скорость ветра  $1,1 \text{ м}/\text{с}$ . Концентрация  $\text{C}_6\text{H}_6$  составляет  $0,01184 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Промышленная эмиссия осуществляется из 6 стационарных источников:

1) производство «Каустик», азимут  $330^\circ$ , годовой выброс  $\text{C}_6\text{H}_6$  –  $195,3 \text{ т}/\text{год}$  ( $6,19 \text{ г}/\text{с}$ ), расстояние до АСКАВ  $2310 \text{ м}$ ;

2) АО «Известковый завод», азимут  $0^\circ$ , годовой выброс  $\text{C}_6\text{H}_6$  –  $42,9 \text{ т}/\text{год}$  ( $1,56 \text{ г}/\text{с}$ ), расстояние до АСКАВ  $3270 \text{ м}$ ;

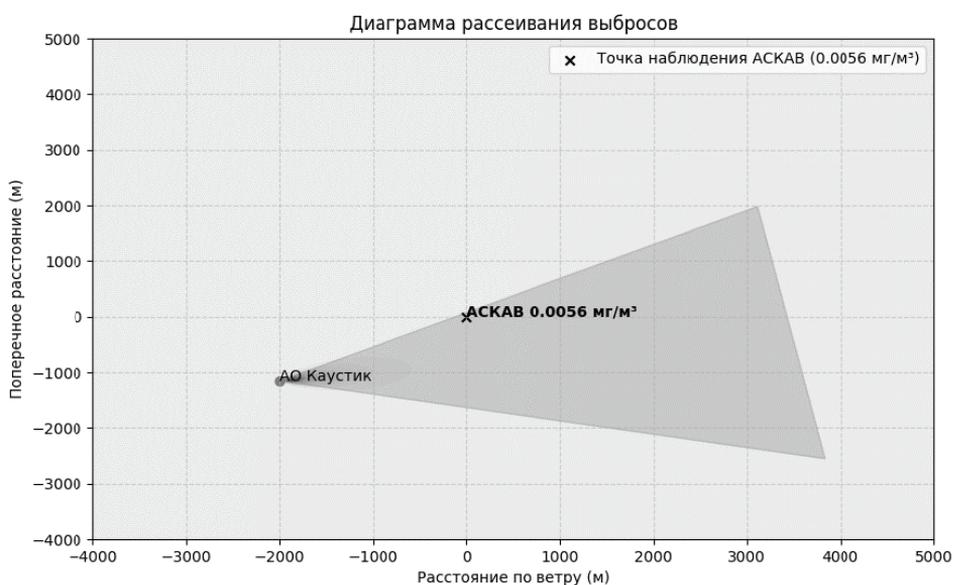


Рис. 2. Схема распространения эмиссии 1,2- $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$  согласно примеру 1

3) АО «Стерлитамакский нефтехимический завод», азимут  $5^\circ$ , годовой выброс  $C_6H_6$  – 102,7 т/год (3,25 г/с), расстояние до АСКАВ 3810 м;

4) ООО «ХайдельбергЦемент Рус», азимут  $61^\circ$ , годовой выброс  $C_6H_6$  – 625,6 т/год (19,8 г/с), расстояние до АСКАВ 2150 м;

5) АО «Башкирская содовая компания», азимут  $40^\circ$ , годовой выброс  $C_6H_6$  – 34077 т/год (1080 г/с), расстояние до АСКАВ 2790 м;

6) АО «Башспирт», азимут  $64^\circ$ , годовой выброс  $C_6H_6$  – 24,2 т/год (0,767 г/с), расстояние до АСКАВ 3530 м.

Рассчитаем сектор влияния:  $\vartheta_{\min} = 347 - 22,5 = 324,5^\circ$ ;  $\vartheta_{\max} = 347 + 22,5 = 369,5^\circ$  ( $9,5^\circ$ ). Таким образом, азимут источников, оказывающих влияние на содержание эмитентов в атмосферном воздухе, находится в диапазоне  $324,5^\circ \dots 369,5^\circ$  ( $9,5^\circ$ ).

Согласно проведенному расчету и рис. 3, на содержание бензола в воздухе близ АСКАВ оказывают влияние 3 источника 1 категории: производство «Каустик», АО «Известковый завод», АО «Стерлитамакский нефтехимический завод». Распространение газовых эмиссий ООО «ХайдельбергЦемент Рус», АО «БСК» и АО «Башспирт» осуществляется в сторону от места контроля, так как азимут не входит в диапазон  $324,5^\circ \dots 369,5^\circ$  ( $9,5^\circ$ ). В связи с этим  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\alpha_3 = 1$ ,  $\alpha_4 = 0$ ,  $\alpha_5 = 0$ ,  $\alpha_6 = 0$  и  $C_1 = d_1Q_1 + d_2Q_2 + d_3Q_3$ .

Согласно (4):

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{6190 + 1560 + 3250}{39 \cdot 10^9} - \frac{0,01184 \cdot 1,1 \cdot 360 \cdot \tan(45^\circ) \cdot (2310 + 3270 + 3810)}{39 \cdot 10^9} = -8,46 \cdot 10^{-7} \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

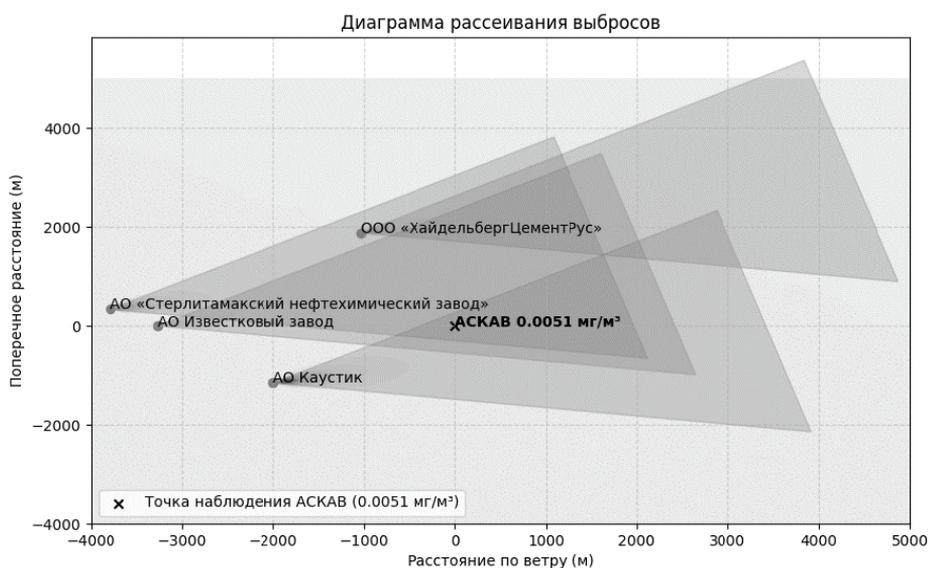


Рис. 3. Схема распространения эмиссии  $C_6H_6$  согласно примеру 2

Следовательно, за 1 с концентрация  $C_6H_6$  в атмосферном воздуха города уменьшается на  $8,46 \cdot 10^{-7}$  мг/м<sup>3</sup>, или через 1 ч содержание вещества равно 0,0087 мг/м<sup>3</sup>. Согласно данным, полученным на АСКАВ, через 60 мин концентрация бензола составила 0,0055 мг/м<sup>3</sup>.

Согласно распределению Гаусса при выбросе бензола из трех источников его концентрация на АСКАВ составляет 0,0051 мг/м<sup>3</sup>.

### Штиль (застойное явление)

Штиль (застойное явление) характеризуется малой скоростью ветра либо отсутствием движения воздушных масс. При этом коэффициент влияния всех источников организованного выброса максимальный. В соответствии с формулой (4),  $N_i = 0$ , так как  $v = 0$ . Тогда, при штиле концентрация загрязняющих веществ  $i$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_i - N_i}{V} \geq C_i = \frac{Q_i}{V} t < \text{ПДК}_i.$$

Согласно расчетным методам,  $\text{ПДК}_i$  в селитебной зоне обеспечивается при соблюдении предельно допустимого выброса (ПДВ) промышленного предприятия, поэтому в случае  $C_i \geq \text{ПДК}_i$  требуется корректировка выбросов.

Для примера рассмотрим изменение концентрации загрязняющих веществ в г. Стерлитамаке Республики Башкортостан на высоте 2 м в период штиля:

1) рассмотрено изменение концентрации 1,2-дихлорэтана в атмосферном воздухе 31.12.2015 г. Класс устойчивости по Паскуиллу А. Сектор влияния составляет 90°. Ситуация аналогична рис. 1, и если азимут источников выброса находится в диапазоне 315°...45°, то он оказывает влияние на содержание эмитента в атмосферном воздухе точки наблюдения. Источник АО «Каустик» удовлетворяет данному условию, и

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{13900}{39 \cdot 10^9} = 3,56 \cdot 10^{-7} \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

В безветренную погоду при постоянном массовом расходе промышленного выброса 1,2-дихлорэтана происходит его накопление со скоростью 3,56 мг/м<sup>3</sup> за 1 с. По данным расчета, за 60 мин увеличивается концентрация с 0,1186 до 0,11988 мг/м<sup>3</sup>. Согласно данным АСКАВ, за 1 ч содержание 1,2-дихлорэтана в воздухе повысилось с 0,1186 до 0,1218 мг/м<sup>3</sup>. Концентрации 1,2- $C_2H_4Cl_2$  по методу распределения Гаусса – 0,0182 мг/м<sup>3</sup> (рис. 4).

2) рассмотрено изменение концентрации бензола в атмосферном воздухе 31.12.2015 г. Условия рассеивания аналогичны примеру 1. Источниками, оказывающими влияние на содержание газа в точке наблюдения, согласно классу устойчивости и сектору рассеивания, являются АО «Каустик», АО «Известковый завод», АО «Стерлитамакский нефтехимический завод», АО «БСК».

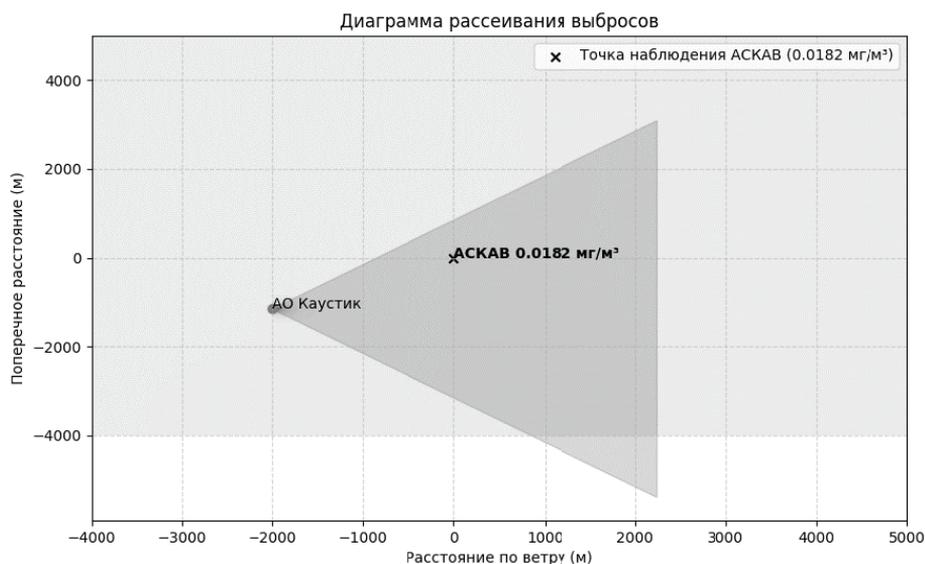


Рис. 4. Схема рассеивания эмиссии 1,2-дихлорэтана при штиле

В связи с этим

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{6190 + 1560 + 3250 + 1080000}{39 \cdot 10^9} = 2,79 \cdot 10^{-5} \text{ мг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}).$$

Застойное явление способствует темпу накопления бензола в атмосферном воздухе города  $2,79 \text{ мг}/\text{м}^3$  за 1 с или  $0,1 \text{ мг}/\text{м}^3$  за 1 ч, при постоянной эмиссии с промышленных источников. Согласно расчету, содержание газа через 1 ч возрастает до  $0,146 \text{ мг}/\text{м}^3$  (на станции за 60 мин ранее зарегистрировано  $0,04535 \text{ мг}/\text{м}^3$ ). На автоматизированной станции контроля атмосферного воздуха концентрация бензола составила  $0,04276 \text{ мг}/\text{м}^3$ . По распределению Гаусса концентрация  $\text{C}_6\text{H}_6$  –  $0,1109 \text{ мг}/\text{м}^3$  (рис. 5).

### Приземная инверсия

Факт установления приземной инверсии осуществляется путем измерения температуры атмосферного воздуха на разных высотах. Для определения изменения градиента температуры реализовано ее измерение в нескольких точках по вертикали [9, 10]. Количество позиций определяется параметрами источников промышленного выброса, которые расположены вблизи населенного пункта. Например, если около жилых кварталов имеются два действующих организованных источника выброса с высотой  $l_1$ ,  $l_2$ , то требуется три точки измерения и регистрации температуры по высоте (рис. 6):

- $T_1$  – 2 м от поверхности земли;
- $T_2$  – 10 м;
- $T_3$  – на высоте, соответствующей самому высокому зданию города.

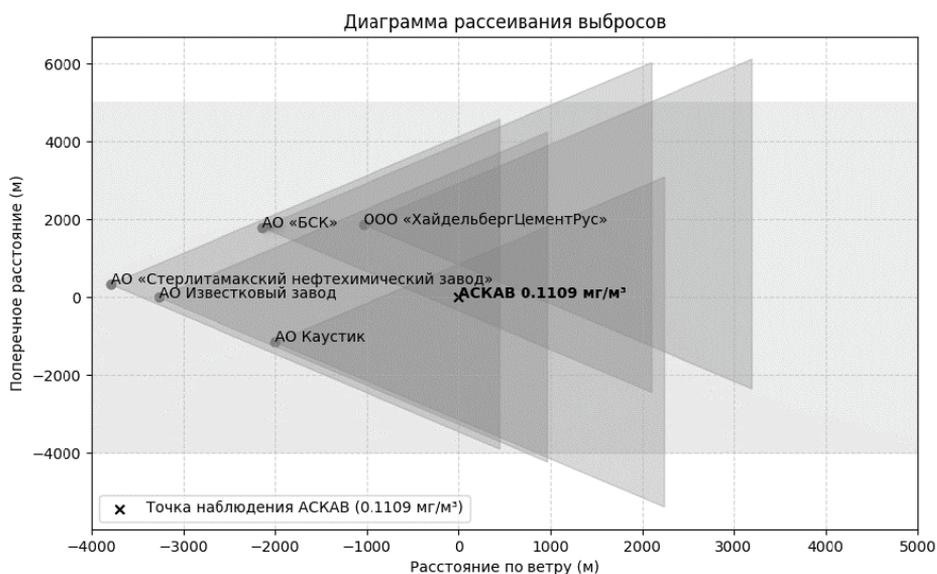


Рис. 5. Схема распространения эмиссии  $C_6H_6$  при штиле

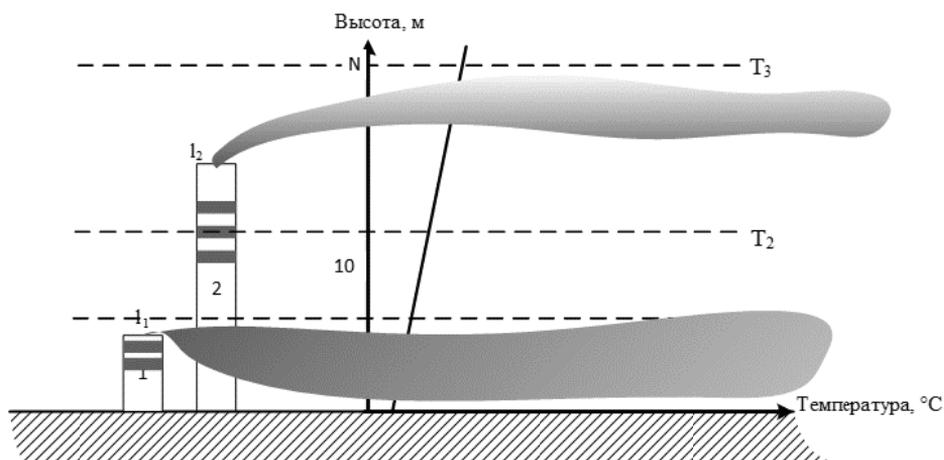


Рис. 6. Схема распространения промышленных выбросов при приземной инверсии

Ситуация приземной инверсии возникает при условии  $T_1 < T_2$ ,  $T_1 < T_3$  (см. рис. 6). В этом случае загрязняющие эмитенты, находящиеся в воздухе, прижимаются к земной поверхности. Кроме того, добавляются вещества, выбрасываемые действующими источниками.

При этом значительное влияние на гигиеническое состояние атмосферного воздуха оказывают приземные эмиссии, например, выхлопные газы автотранспорта. Между тем влияние высотных источников на компонентный состав приземного воздуха мало. Их вертикальное рассеивание затруднено. Загрязняющие вещества распространяются преимущественно в горизонтальном направлении по ветру.

На основании вышеизложенного,  $H_{\text{сл.пер}} = 0 \Rightarrow N_i = 0$ . В связи с этим массовый расход выбросов промышленных предприятий следует скорректировать. Однако в период приземной инверсии сила ветра может быть более 1 м/с, что требует выявления источника загрязнения. Для этого необходимо определение коэффициента влияния промышленных выбросов, концентрации токсикантов на различных высотах (см. рис. 6). Поведение токсикантов аналогично случаям, рассмотренным для застойных атмосферных явлений.

Проведен расчет рассеивания 1,2-дихлорэтана (рис. 7) и бензола (рис. 8) в период приземной инверсии из приоритетных источников. Скорость ветра 1 м/с. Класс устойчивости по Паскуиллу F. Сектор рассеивания составляет  $10^\circ$ . По диаграмме рассеивания 1,2- $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$  наглядно видно, что источник АО «Каустик» не оказывает влияния на содержание газа на АСКВАВ. Однако, согласно распределению Гаусса, концен-

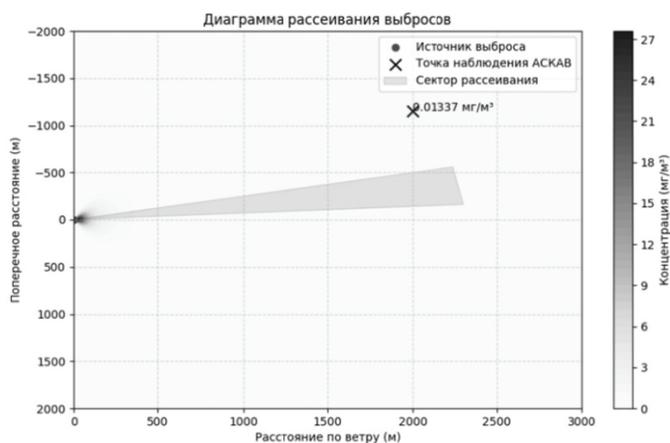


Рис. 7. Схема распространения эмиссии 1,2- $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$  в период приземной инверсии

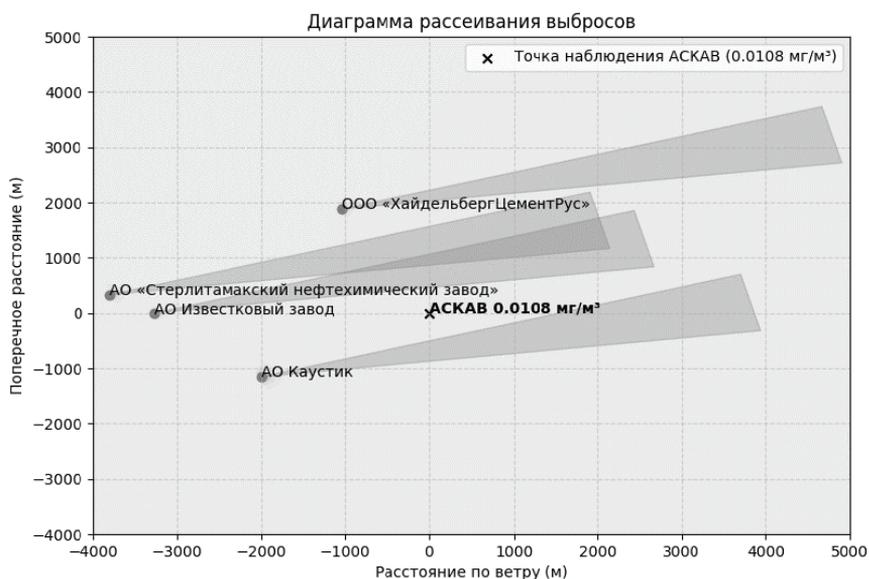


Рис. 8. Схема распространения эмиссии  $\text{C}_6\text{H}_6$  в период приземной инверсии

трация 1,2-С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> равна 0,01337 мг/м<sup>3</sup>. Аналогично рассеивание бензола: организованные источники предприятий-эмитентов не оказывают влияние на его концентрацию в точке наблюдения. Расчет по распределению Гаусса демонстрирует содержание С<sub>6</sub>Н<sub>6</sub> 0,0108 мг/м<sup>3</sup>.

Согласно данным, полученным АСКАВ, средняя концентрация С<sub>6</sub>Н<sub>6</sub> в период инверсии составляет 0,005 мг/м<sup>3</sup>, 1,2-С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> – 0,008 мг/м<sup>3</sup>.

### Приподнятая инверсия

Приподнятая инверсия возникает в случае, если  $T_2 < T_3$  и  $T_1 > T_2$  (рис. 9). Согласно схеме, нижняя граница инверсии располагается между первым  $l_1$  и вторым  $l_2$  источниками. Эмиссия токсикантов с  $l_1$  источника прижимается к земной поверхности. В этом случае высота слоя перемешивания для него составляет 10 м – это «крышка» инверсии (см. рис 9). Выбросы организованных источников, находящихся выше нее, не перемещаются в слой ниже, образуя зону высотного загрязнения.

Высота «крышки» приземной инверсии определяется в соответствии с показаниями термометров  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ . Следовательно, на основании данных по стратификации температуры воздуха составляется карта с указанием предприятия, приоритетных ЗВ, диапазона высот ( $H_1$ ,  $H_2$ ) и абсолютного значения слоя перемешивания ( $H_2 - H_1$ ) для каждого источника выброса.

Определение массового расхода выброса предприятия осуществляется на основе методики, описанной при условии свободной конвекции с учетом расположения «крышки» приземной инверсии и влияния источников.

Алгоритм оценки и реагирования при наличии приподнятой инверсии включает в себя следующую последовательность действий:

- 1) определение коэффициента влияния промышленных выбросов;
- 2) определение нижней границы инверсии;

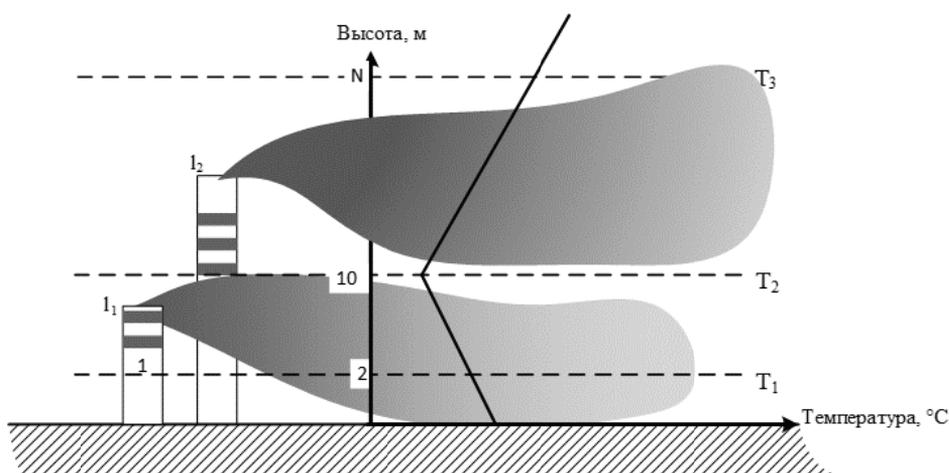


Рис. 9. Схема распространения промышленных выбросов при приподнятой инверсии



**Рис. 10. Структуры экспертной системы мониторинга атмосферного воздуха населенных мест близ промышленных предприятий (а) и ее потоков данных (б)**

3) перечень эмитентов, выбросы которых оказывают влияние содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на каждой высоте;

4) определение рекомендуемого массового расхода выброса каждого источника выброса.

Разработана экспертная система по определению предпочтительного массового расхода выброса промышленных предприятий, включающая два модуля (рис. 10, а): определение метеорологической ситуации и рекомендуемого массового расхода выброса с промышленного источника. Для установления аэрологических явлений требуются данные погоды. Входными данными являются: стратификация температуры  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , направление  $I$ , скорость  $v$  ветра, стратификация концентрации ЗВ по вертикали. Выходными переменными являются массовые расходы загрязненного газового выброса  $\omega_1, \dots, \omega_N$  с каждого промышленного источника. Структура данных экспертной системы мониторинга представлена на рис. 10, б.

### Заключение

В результате исследования разработана система управления качеством атмосферного воздуха жилых зон. Она позволяет определять текущую метеорологическую ситуацию и вырабатывать рекомендации по промышленному выбросу. Разработаны алгоритмы оценки соблюдения гигиениче-

ских норм концентрации веществ для ситуаций свободной конвекции, штиля, приземной и приподнятой инверсий.

Полученные результаты могут быть использованы на любой территории, характеризующейся влиянием промышленных предприятий на качество атмосферного воздуха населенной местности.

*Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»)*

#### *Список литературы*

1. Акчулпанов, Ю. К. Устойчивое развитие Республики Башкортостан Российской Федерации: текущее состояние и перспективы / Ю. К. Акчулпанов // Вестник университета. – 2024. – № 8. – С. 109 – 118. doi: 10.26425/1816-4277-2024-8-109-118

2. Пат. 2150126 Российская Федерация, МПК G01T 1/167. Автоматизированная система радиационного мониторинга окружающей среды региона / Соболев И. А., Соболев А. И., Проказова Л. М., Тихомиров В. А., Баринов В. С., Денисов А. А., Осадчий В. Н. ; заявитель и патентообладатель Московский НПО «Радон». – № 99102520/28 ; заявл. 08.02.1999 ; опубл. 27.05.2000. Бюл. № 15.

3. Пат. на полезную модель № 69266 Российская Федерация, МПК G01W 1/00. Автоматизированная система оперативного контроля воздушного бассейна города / Белан Б. Д.; заявитель Институт оптики атмосферы Сибирское отделение Российской академии наук. – № 2007128559/22 ; заявл. 24.07.2007 ; опубл. 10.12.2007. – Бюл. № 34. – 2 с.

4. Пат. на полезную модель № 61448 Российская Федерация, МПК G08C 19/00. Локальная автоматизированная система экологического мониторинга / Романенко С. Н., Скитев А. В.; заявитель ООО «ЭКОРОС». – № 2006110298/22 ; заявл. 31.03.2006 ; опубл. 27.02.2007. – Бюл. № 6. – 1 с.

5. Пат. № 2697571 Российская Федерация, МПК G01W 1/00. Автоматизированная система экологического мониторинга и прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха промышленного региона / Маслова А. А., Панарин В. М., Мешалкин В. П. [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (ТулГУ). – № 2018142980 ; заявл. 05.12.2018 ; опубл. 15.08.2019. – Бюл. № 23. – 15 с.

6. Impacts on the Urban Air Quality and Health of Global Climate Scenarios Using Different Dynamical Downscaling Approaches / R. García, J. Camaño, L. Pérez, R. Barras, J. Pecci, A. Garzón, M. Palacios // Journal of Geoscience and Environment Protection. – 2016. – Vol. 4, No. 4. – P. 168 – 174. doi: 10.4236/gep.2016.44020

7. Choi, Yu. Scramjet Engine Flowpath That Improves Specific Impulse Using JP-7 Fuel / Yu. Choi, Ja. F. Driscoll // Journal of Propulsion and Power. – 2023. – Vol. 39, No. 3. – P. 589 – 601. doi: 10.2514/1.B38931

8. Yang, Q. The Relationships between PM<sub>2.5</sub> and Meteorological Factors in China: Seasonal and Regional Variations / Yang Q. // International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH). – 2017. – Vol. 14, No. 12. – P. 1510. doi: 10.3390/ijerph14121510

9. Пат. № 2804767 Российская Федерация, МПК G01N 1/26. Система отбора пробы атмосферного воздуха для автоматизированного контроля качества воздуха / Сафаров А. М., Кулакова Е. С.; заявитель ФГБОУ ВО «Уфимский государствен-

ный нефтяной технический университет». – № 2022128882 ; заявл. 07.11.2022 ; опубл. 05.10.2023. – Бюл. № 28. – 8 с.

10. Кулакова, Е. С. Система автоматизированного отбора пробы атмосферного воздуха / Е. С. Кулакова, А. М. Сафаров, В. И. Сафарова // *Экология и промышленность России*. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 16 – 21. doi: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21

11. Исидоров, В. А. Органическая химия атмосферы / В. А. Исидоров ; под ред. Б. В. Иоффе. – Л. : Химия : Ленингр. отд-ние, 1985. – 265 с.

12. Pasquill, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material / F. Pasquill // *Meteorological Magazine*. – 1961. – Vol. 90, No. 1. – P. 33 – 49.

13. Gifford, F. A. The Dispersion of Pollutants in the Air / F. A. Gifford // *Journal of Meteorology*. – 1959. – Vol. 16, No. 5. – P. 505 – 511.

14. Hanna, S. R. Handbook of Atmospheric Diffusion / S. R. Hanna, G. A. Briggs, R. P. Hosker. – Technical Information Center U.S. Department of Energy, 1982. – 110 p.

15. Теляков, Э. Ш. Исследование многокомпонентной диффузии в газовых смесях / Э. Ш. Теляков, И. И. Низамов, Б. И. Таренко // *Теоретические основы химической технологии*. – 2013. – Т. 47, № 4. – С. 395 – 401. doi: 10.7868/S0040357113040155

16. Bird, R. B. Transport Phenomena / R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot. – John Wiley & Sons, 1960. – 780 p.

17. Блащинская, О. Н. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ / О. Н. Блащинская, К. Ю. Патрушев // *Вестник АНГТУ*. – 2023. – Т. 1, № 17. – С. 177 – 180.

18. Безуглая, Э. Ю. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере : справ. пособие / Э. Ю. Безуглая, Л. И. Елекоева, Е. К. Завадская. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 328 с.

19. Блащинская, О. Н. Моделирование рассеивания выброса загрязняющих веществ с учетом влияния адсорбции на изменение концентрации в атмосфере населенных мест / О. Н. Блащинская, К. Ю. Патрушев // *Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета*. – 2023. – № 20. – С. 252 – 257.

### References

1. Akhulpanov Yu. [Sustainable Development of the Republic of Bashkortostan of the Russian Federation: Current State and Prospects], *Vestnik Universiteta* [University Bulletin], 2024, no. 8, pp. 109-118. doi: 10.26425/1816-4277-2024-8-109-118 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Sobolev I.A., Sobolev A.I., Prokazova L.M., Tikhomirov V.A., Barinov V.S., Denisov A.A., Osadchiy V.N. *Avtomatizirovannaya sistema radiatsionnogo monitoringa okruzhayushchey sredy regiona* [Automated system for radiation monitoring of the regional environment], Russian Federation, 2000, Pat. 2150126 (In Russ.)

3. Belan B.D. *Avtomatizirovannaya sistema operativnogo kontrolya vozdušnogo basseyna goroda* [Automated system for operational monitoring of the city's air basin], Russian Federation, 2007, Pat. 69266 (In Russ.)

4. Romanenko S.N., Skitev A.V. *Lokal'naya avtomatizirovannaya sistema ekologicheskogo monitoringa* [Local Automated Environmental Monitoring System], Russian Federation, 2007, Pat. 61448 (In Russ.)

5. Maslova A.A., Panarin V.M., Meshalkin V.P. [et al.], *Avtomatizirovannaya sistema ekologicheskogo monitoringa i prognozirovaniya zagryazneniya atmosfernogo*

*vozdukha promyshlennogo regiona* [Automated system for environmental monitoring and forecasting of atmospheric air pollution in an industrial region], Russian Federation, 2019, Pat. 2697571 (In Russ.)

6. García R., Camaño J., Pérez L., Barras R., Pecci J., Garzón A., Palacios M. Impacts on the Urban Air Quality and Health of Global Climate Scenarios Using Different Dynamical Downscaling Approaches, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 168-174. doi: 10.4236/gep.2016.44020

7. Choi Yu., Driscoll Ja.F. Scramjet Engine Flowpath That Improves Specific Impulse Using JP-7 Fuel, *Journal of Propulsion and Power*, 2023, vol. 39, no. 3, pp. 589-601. doi: 10.2514/1.B38931

8. Yang Q. The Relationships between PM<sub>2.5</sub> and Meteorological Factors in China: Seasonal and Regional Variations, *International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH)*, 2017, vol. 14, no. 12, pp. 1510. doi: 10.3390/ijerph14121510

9. Safarov A.M., Kulakova Ye.S. *Sistema otbora probey atmosfernogo vozdukha dlya avtomatizirovannogo kontrolya kachestva vozdukha* [System for collecting atmospheric air samples for automated air quality control]; Russian Federation, 2023, Pat. 2804767 (In Russ.)

10. Kulakova Ye.S., Safarov A.M., Safarova V.I. [Automated system for collecting atmospheric air samples], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2024, vol. 28, no. 3, pp. 16-21. doi: 10.18412/1816-0395-2024-3-16-21 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Isidorov V.A.; Ioffe B.V. (Ed.) *Organicheskaya khimiya atmosfery* [Organic chemistry of the atmosphere], Leningrad: Khimiya: Leningr. otdeleniye, 1985, 265 p. (In Russ.)

12. Pasquill F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, *Meteorological Magazine*, 1961, vol. 90, no. 1, pp. 33-49.

13. Gifford F.A. The Dispersion of Pollutants in the Air, *Journal of Meteorology*, 1959, vol. 16, no. 5, pp. 505-511.

14. Hanna S.R., Briggs G.A., Hosker R.P. *Handbook of Atmospheric Diffusion*, Technical Information Center U.S. Department of Energy, 1982, 110 p.

15. Telyakov E.Sh., Nizamov I.I., Tarenko B.I. [Study of multicomponent diffusion in gas mixtures], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2013, vol. 47, no. 4, pp. 395-401. doi: 10.7868/S0040357113040155 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, 1960, 780 p.

17. Blashchinskaya O.N., Patrushev K.Yu. [Modeling the dispersion of pollutant emissions], *Vestnik AnGTU* [Bulletin of AnSTU], 2023, vol. 1, no. 17, pp. 177-180. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Bezuglaya E.Yu., Yelekoyeva L.I., Zavadskaya Ye.K. *Klimaticheskkiye kharakteristiki usloviy rasprostraneniya primesey v atmosfere: sprav. posobiye* [Climatic characteristics of the conditions for the spread of impurities in the atmosphere: reference. manual], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 328 p. (In Russ.)

19. Blashchinskaya O.N., Patrushev K.Yu. [Modeling the dispersion of pollutant emissions taking into account the influence of adsorption on changes in concentration in the atmosphere of populated areas], *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific papers of the Angarsk State Technical University], 2023, no. 20, pp. 252-257 (In Russ., abstract in Eng.)

## Decision-Making System to Monitor the Quality of Atmospheric Air in Industrial Centers

E. S. Kulakova, V. I. Safarova, A. M. Safarov

*Institute of Chemical Technologies and Engineering,  
Branch of Ufa State Petroleum Technological University in Sterlitamak,  
Russia; Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

**Keywords:** atmospheric air; pollutant; stagnation; inversion; convection; quality management.

**Abstract:** An approach to assessing the quality of atmospheric air in residential areas near industrial enterprises is proposed, based on multi-altitude monitoring and the difference in the dispersion of various pollutants (PP) depending on the class of atmospheric stability. A formalized approach to industrial emissions management has been developed for conditions of normal spread of toxicants (free convection), calm, as well as ground and elevated inversions in order to create a favorable living environment for the population (maintaining the quality of atmospheric air in residential areas).

---

© Е. С. Кулакова, В. И. Сафарова, А. М. Сафаров, 2025