

УДК 528.94 (004.6)  
ББК 78.34

## **МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МИНИМИЗАЦИИ УЩЕРБА ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Кушникова Е. В.<sup>1</sup>, Резчиков А. Ф.<sup>2</sup>, Иващенко В. А.<sup>3</sup>,  
Филимонюк Л. Ю.<sup>4</sup>**

*(ФГБУН Институт проблем точной механики  
и управления РАН, Саратов)*

*Предложена постановка задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий. Разработан алгоритм решения этой задачи, позволяющий повысить эффективность функционирования промышленных предприятий за счет снижения штрафов, предотвращения экологических правонарушений, а также уменьшить ущерб от загрязнения атмосферы.*

Ключевые слова: промышленное предприятие, загрязнение, алгоритм минимизации ущерба, информационно-логическая схема, критерий оптимальности.

### **1. Введение**

Во многих странах мира рост промышленного производства зачастую сопровождается интенсивным загрязнением приземного слоя атмосферы, в том числе воздушных бассейнов

---

<sup>1</sup> Елена Вадимовна Кушникова, аспирантка ([elenak3366@ya.ru](mailto:elenak3366@ya.ru)).

<sup>2</sup> Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН ([iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)).

<sup>3</sup> Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ученый секретарь ([iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)).

<sup>4</sup> Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук, научный сотрудник ([iptmuran@san.ru](mailto:iptmuran@san.ru)).

над городами, селами, местами отдыха, объектами сельскохозяйственного назначения, лесами, природными заповедниками, океанами, морями, озерами, реками и т.д.

Это приводит к изменению климата на планете, росту заболеваемости населения, вызывает нарушения генетического аппарата у человека, животных и растений, снижает продолжительность и качество жизни, уменьшает производительность труда, снижает урожайность сельхозугодий, усиливает коррозию металлоконструкций зданий и сооружений, увеличивает издержки на средства их защиты, разрушает исторические памятники, повышает затраты на ведение домашнего хозяйства, служит причиной социальных волнений, а также приводит к массовой миграции жителей из районов и городов с экологически грязным производством.

Величина только прямого ущерба от загрязнения атмосферы выбросами промышленных предприятий, тепловых электростанций и выхлопными газами автомобилей по оценкам ряда авторов ежегодно составляет сотни миллиардов долларов. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения за 2014 год от последствий загрязнения атмосферы ежегодно умирает примерно 7 млн человек. При этом особенно большие материальные и людские потери приходится на страны с развивающейся экономикой, такие как государства Южной и Восточной Азии, Бразилия, а также Россия.

Исследования в области защиты атмосферы и биосферы от выбросов вредных веществ в настоящее время интенсивно ведутся на стыке таких наук как физика, математика, химия, медицина, биология, кибернетика, машиностроение, приборостроение, метеорология и др.

Один из перспективных путей частичного решения указанных проблем непосредственно связан с применением аппарата системного анализа, теории управления и современных средств обработки информации, используемых для мониторинга процессов формирования и распространения атмосферных поллютантов, прогнозирования степени загрязненности контролируемых объектов и территорий, а также для управления технологическим оборудованием промышленных предприятий с

целью снижения ущерба, причиняемого их атмосферными выбросами.

Теоретическое обоснование принципов функционирования систем экологического мониторинга и управления осуществлено в работах таких отечественных и зарубежных ученых как Г.И. Марчук, Ю.А. Израэль, М.Е. Берлянд, Г. Бригс, Ф. Гиффорд, Ф. Паскуилл, Ж. Заккур и др. [2, 4, 9, 13, 15, 16, 17]. В результате практического применения результатов этих исследований созданы и положительно зарекомендовали себя на практике многие современные математические, аппаратные и программные средства экологического мониторинга и управления, например, такие как единая государственная система мониторинга окружающей среды Российской Федерации, системы экологического мониторинга США, Европейского Союза и т.д.

Тем не менее, в настоящее время в специальной литературе практически отсутствуют сообщения о системах управления, осуществляющих регулирование состава и производительности технологического оборудования предприятий с целью минимизации различных видов ущерба, причиняемого их атмосферными выбросами населению, промышленности, сельскому хозяйству, природной среде, а также самим предприятиям в результате выплаты экологических штрафов.

Причиной этого, на наш взгляд, является отсутствие специализированного математического обеспечения, включающего постановки задач, формальные модели и алгоритмы, описывающие сложные причинно-следственные взаимосвязи между техническими, экологическими и экономическими параметрами, характеризующими процесс формирования, подъема и переноса атмосферных поллютантов, а также возникновение различных видов экономического ущерба от их воздействия.

Приведенные выше соображения обуславливают актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость данного исследования, предусматривающего разработку математических моделей и алгоритмов для минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленного предприятия.

## **2. Формирование и распространение выбросов вредных веществ как объект мониторинга и управления**

К управляющим воздействиям, используемым при управлении атмосферными выбросами промышленных предприятий, относятся: состав и производительность технологического оборудования промышленного предприятия; состав и производительность оборудования, используемого для очистки атмосферных выбросов; специальные мероприятия, направленные на уменьшение величины атмосферных выбросов предприятия; температура газов, выбрасываемых в атмосферу; диаметр и высота дымовой трубы.

Специальные мероприятия, направленные на уменьшение величины атмосферных выбросов, зависят от вида промышленного предприятия. В частности, на предприятиях черной металлургии к ним относятся: уменьшение уровня загрузки шихты, укрупнение помола, обеспечение полного сгорания избытков доменного газа и др. [2, 4].

К управляемым воздействиям принадлежат ущерб, связанный с ростом заболеваемости населения из-за воздействия атмосферных поллютантов; потери сельского хозяйства от воздействия атмосферных выбросов; потери, связанные с изменением окружающей природной среды; потери из-за ухудшения качества жизни населения; потери промышленного предприятия, возникающие из-за отключения технологического оборудования, уменьшения его производительности при регулировании величины атмосферных выбросов, а также из-за выплат штрафов за нарушение предельно допустимых концентраций вредных веществ.

Возмущениями являются состояния окружающей среды: давление, температура и относительная влажность атмосферного воздуха, направление ветра, интенсивность выпадения осадков, продолжительность работы технологического оборудования, изменение характеристик производственной программы, неисправности систем местной и общеобменной вентиляции, климатические условия и др.

Структурная схема процесса формирования и распространения атмосферных выбросов промышленного предприятия как объекта мониторинга и управления приведена на рис. 1.

Проведенная формализация процесса формирования и распространения атмосферных выбросов промышленного предприятия позволяет разработать формальную постановку задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий.

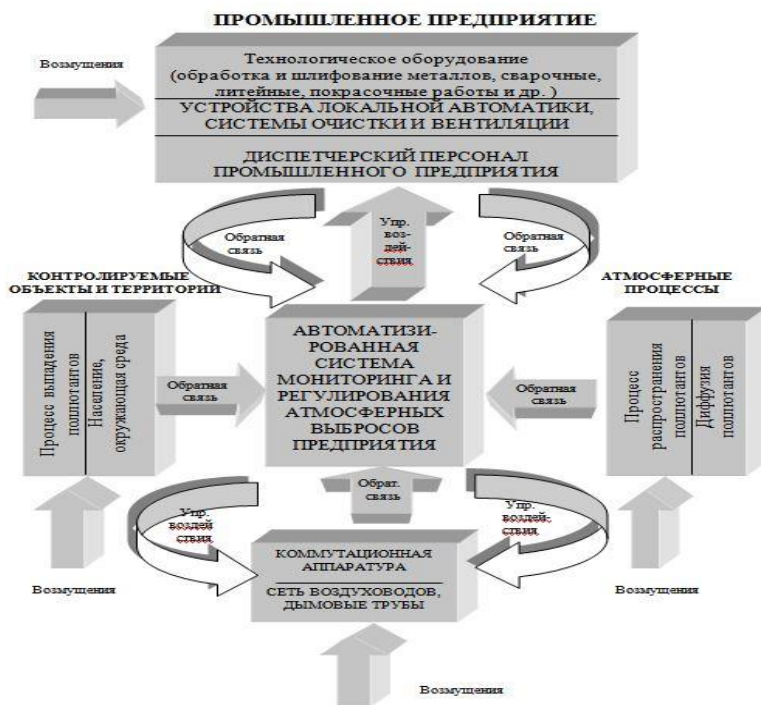


Рис. 1. Процесс формирования и распространения атмосферных выбросов промышленного предприятия как объект мониторинга и управления

### 3. Общая постановка задачи

Требуется выполнить синтез управляющих воздействий

$$\mathbf{u}^*(t) \in \{U(t)\}, t \in [t_1; t_2]$$

по изменению состава и производительности технологического оборудования при возмущениях

$$\mathbf{x}(t) \in \{X(t)\},$$

минимизирующих векторный критерий, характеризующий ущерб от атмосферных выбросов промышленных предприятий

$$Cf = ((Cf_1(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t))), \dots, Cf_5(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t)))$$

при ограничениях и граничных условиях:

$$R_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t)) > 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, k_1\},$$

$$R_i(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t)) \leq 0, \quad i \in \{n_1 + 1, \dots, k_2\},$$

$$F_j^{(1)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t)) = 0, \quad j \in \{n_2 + 1, \dots, k_3\},$$

$$F_j^{(2)}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{x}'(t), \mathbf{u}'(t)) = 0, \quad j \in \{n_3 + 1, \dots, k_4\},$$

где  $Cf_1$  – ущерб, связанный с ростом заболеваемости населения из-за воздействия атмосферных загрязнителей;  $Cf_2$  – потери сельского хозяйства в результате воздействия атмосферных выбросов;  $Cf_3$  – потери, связанные с изменением природной среды;  $Cf_4$  – потери из-за ухудшения качества жизни населения;  $Cf_5$  – потери промышленного предприятия, возникающие из-за отключения технологического оборудования, уменьшения его производительности при регулировании величины атмосферных выбросов, а также из-за штрафов за нарушение предельно допустимых концентраций вредных веществ;  $\{X(t), U(t)\}$  – множества допустимых значений векторов  $\mathbf{x}(t)$  и  $\mathbf{u}(t)$  соответственно;  $\mathbf{x}'(t)$ ,  $\mathbf{u}'(t)$  – первые производные векторов состояния окружающей среды и управляющих воздействий соответственно;  $t$  – текущее время;  $k_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , – известные константы.

Производные векторов состояния окружающей среды и управляющих воздействий отражают изменение концентрации загрязняющих веществ по контролируемым объектам и территориям. Они присутствуют в моделях описания процесса подъема и распространения загрязнителей в атмосфере.

### **Методика решения задачи.**

Решение задачи классическими методами связано со значительными трудностями. Данное обстоятельство делает целесообразным применение метода кусочно-линейной аппроксимации, традиционно используемого при решении данного класса задач.

Реализация указанного метода решения на выделенных линейных участках требует предварительной разработки математических моделей и алгоритмов для определения:

- состава и количества загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном выбросе промышленного предприятия;
- высоты подъема поллютантов;
- закономерностей распространения загрязняющих веществ в атмосферном воздухе при различных метеоусловиях;
- скалярных составляющих векторного критерия  $Cf$ , характеризующего различные виды ущерба, связанного с выбросом атмосферных поллютантов.

При решении задачи используются квазистационарные модели, описывающие поведение объекта управления после затухания переходных процессов.

Поставленная задача принадлежит к классу задач векторной оптимизации. Ее решению должно предшествовать установление отношений порядка между отдельными составляющими векторного критерия и определение области конфликта составляющих векторного критерия (области Парето).

Общий алгоритм решения многокритериальной задачи приведен на рис. 2.

Составляющие векторного критерия выбраны, исходя из степени их влияния на результаты решения поставленной задачи. При этом имеет место корреляция между отдельными критериями, однако ее несущественность не позволяет исключить из рассмотрения ни один из них.



Рис. 2. Общий алгоритм решения задачи минимизации атмосферных выбросов промышленных предприятий

Предлагаемый подход применим, когда установка дополнительных фильтров или очистных сооружений требует затрат, превышающих затраты на реализацию варианта снижения атмосферных выбросов за счет изменения режима работы технологического оборудования, а также в том случае, когда еще не установлены дополнительные фильтры и очистные сооружения, если их установка экономически целесообразна.

Анализ особенностей процедуры принятия решений, используемой в настоящее время на отечественных промышленных предприятиях при регулировании атмосферных выбросов, позволяет сделать вывод о том, что свертку критериев целесообразно осуществить с использованием весовых множителей, не присваивая абсолютного приоритета ни одному из них. Это позволит свести задачу векторной оптимизации к решению



однокритериальной задачи за счет проецирования вектора  $Cf$  на пять выбранных направлений, совпадающих с вектором весовых коэффициентов

$$\mu = (\mu_1, \dots, \mu_1, \dots, \mu_5), \mu_i \geq 0, \sum_{i=1}^5 \mu_i = 1.$$

С учетом вышеизложенного целевая функция примет следующий вид:

$$Cf_S = \sum_{i=1}^5 \mu_i Cf_i,$$

где  $Cf_S$  – целевая функция после свертки критериев.

#### 4. Метод решения задачи

Структурная схема комплекса математических моделей, используемых для решения задачи, приведена на рис. 3.

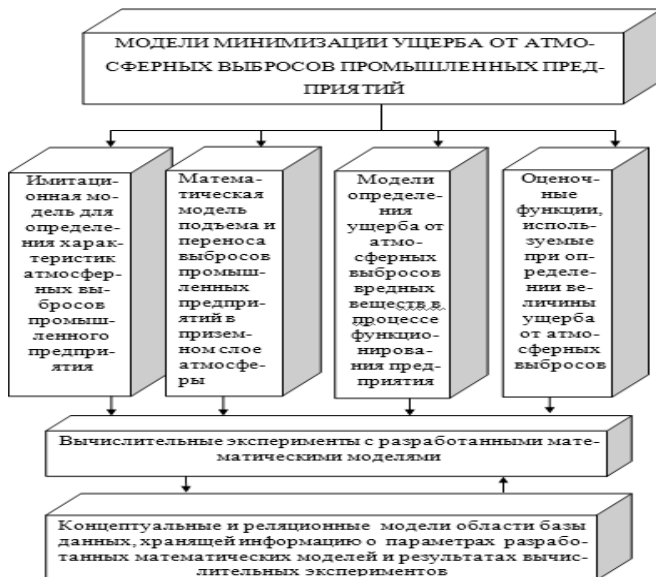


Рис. 3. Математические модели задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий

### Математическая модель для определения массового и суммарного выброса загрязнителей.

Все производственное оборудование, в процессе функционирования которого образуются атмосферные поллютанты, подразделяется на 10 групп.

При расчете массового  $M_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , и суммарного  $W_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , выбросов загрязнителей делается допущение, что поллютанты от источников загрязнений попадают в помещения, оснащенные газопылеуловителями, работающими без утечек воздуха ( $n$  – количество поллютантов). Удаление поллютантов производится с помощью местной и общеобменной вентиляции.

Структурная схема процесса удаления атмосферных выбросов технологического оборудования системами местной и общеобменной вентиляции, положенная в основу разрабатываемой имитационной модели, приведена на рис. 4.

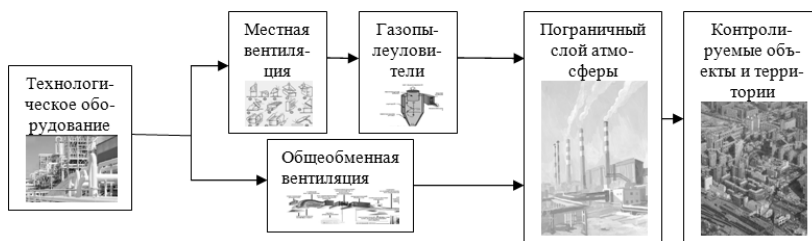


Рис. 4. Этапы удаления поллютантов системами вентиляции и их распространение в атмосфере

В качестве примера приведена модель, используемая при определении массового и суммарного выброса для первой группы оборудования. При расчете  $M_i^1$ ,  $i = 1, \dots, n$ , и  $W_i^1$ ,  $i = 1, \dots, n$ , при этом используются следующие зависимости:

$$M_i^1 = M_i^{\text{обмен},1} + M_i^{\text{мест},1}, \quad i = \overline{1, n}; \quad M_i^{0,1} = \left( \sum_{j=1}^{m^1} \eta_j^1 P a s_j^1 \right)_i, \quad i = \overline{1, n};$$

$$W_i^1 = \sum_{j=1}^l M_j^1 \Delta t_j, \quad i = \overline{1, n}; \quad M_i^{\text{обмен},1} = M_i^{0,1} (1 - k_{\text{мест}}^1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$M_i^{\text{мест},1} = (M_i^{0,1} - M_i^{\text{обмен},1})(1 - E_i^1), \quad i = \overline{1, n};$$

$$E_i^1 = (1 - c_i^1 / c_i^{0,1}), \quad i = \overline{1, n},$$

где  $M_i^{\text{мест},1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, попадающего в газопылеуловители местной вентиляционной системы от  $m^1$  работающих источников загрязнений первой группы оборудования;  $M_i^{0,1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, поступившего от работающего оборудования;  $k^1_{\text{мест}}$  – коэффициент эффективности местных вытяжных устройств;  $n$  – количество поллютантов;  $\eta_j^1$  – коэффициент производительности  $j$ -й единицы работающего оборудования первой группы;  $E_i^1$  – степень очистки воздуха газопылеуловителями;  $c_i^1$  – концентрация  $i$ -го поллютанта входе газопылеуловителей;  $c_i^{0,1}$  – концентрация  $i$ -го поллютанта на выходе газопылеуловителей;  $M_i^{\text{обмен},1}$  – массовое количество  $i$ -го поллютанта, не уловленное местными вытяжными устройствами и удаляемое общеобменной вытяжной вентиляцией;  $l$  – количество интервалов времени  $\Delta t_j$ , в течение которых работало оборудование первой группы за расчетный период;  $Pas_j^1$  – количество загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу  $j$ -й единицей оборудования первой группы; символ «1» в верхнем индексе означает принадлежность к оборудованию первой группы.

В момент решения задачи  $t = t_p$  работа  $j$ -й единицы оборудования первой группы определяется по функции распределения непрерывной случайной величины  $P_j^1(t)$ , характеризующей вероятность работы каждой единицы оборудования данной группы на временном интервале решения задачи. Эта зависимость определяется путем обработки экспериментальных данных на стадии адаптации разрабатываемой имитационной системы к конкретному производству. Суммируя каждую единицу работающего оборудования, определяется  $m^1$ . В качестве примера на рис. 5 приведены результаты вычислительного эксперимента по определению веса поллютантов, которые на различных временных интервалах поступают в атмосферу при работе оборудования первой группы.

На рис. 5 приняты следующие обозначения: ИВ<sub>1</sub>, ИВ<sub>2</sub>, ..., ИВ<sub>6</sub> – источники выбросов загрязняющих веществ, представляющие собой шесть металлообрабатывающих станков с абразивными кругами диаметром 100, 250 и 400 мм (по два каждого вида соответственно).

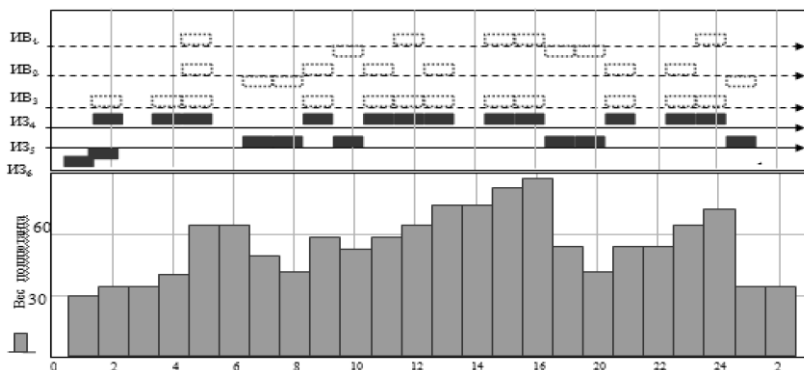


Рис. 5. Результаты моделирования процесса выделения абразивной и металлической пыли станками заточного участка при механической обработке металлов

В верхней части рисунка пунктиром показаны станки, отключаемые на данном временном интервале; закрашенные прямоугольники обозначают включаемые станки. На момент начала моделирования (1 час) работало два станка с полной нагрузкой. В качестве поллютантов рассматривались марганец и его соединения, диоксид азота, оксиды железа и др. вещества, перечень и весовой расход которых для различного оборудования первой группы определялся по справочной литературе.

### Модели подъема и переноса выбросов в приземном слое атмосферы.

Основные атмосферные процессы, влияющие на подъем и распространение атмосферных загрязнителей, изображены на рис. 6 [12].

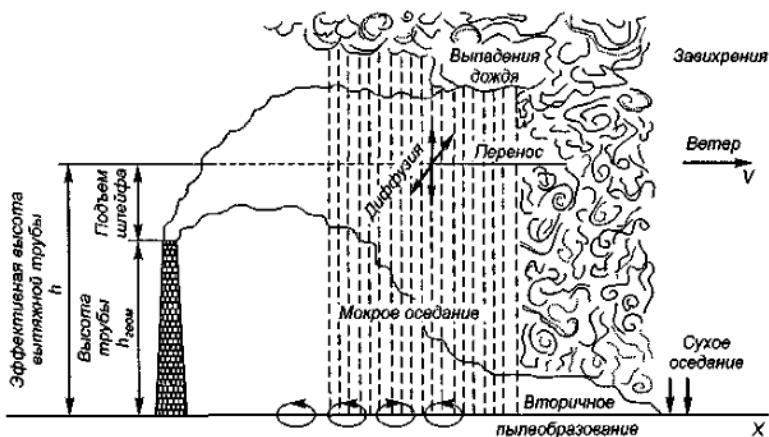


Рис. 6. Атмосферные процессы, влияющие на подъем и распространение загрязнителей

Математическая модель описания процесса подъема и распространения загрязнителей в атмосфере состоит из 17 продукций, каждая из которых характеризует тот или иной практически значимый частный случай процесса распространения загрязнителей в атмосфере. Если левая часть ни одной из продукций не выполняется, то концентрация загрязнителей определяется из решения уравнения переноса и турбулентной диффузии атмосферных загрязнителей. Модель имеет блочную структуру, допускающую увеличение количества продукций, а также их изменение на этапе адаптации к условиям функционирования конкретного промышленного предприятия.

В общем виде логико-математическая модель может быть представлена в виде совокупности продукций:

ПРОДУКЦИЯ  $j$ .

ЕСЛИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ СОВОКУПНОСТЬ УСЛОВИЙ:

$$\langle (B_1(x, y, z, \mathbf{a}) R_1 B_2(x, y, z, \mathbf{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \mathbf{a})) \rangle_j >$$

ТО ИСКАОМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМЕЕТ ВИД

$$C = f_j(x, y, z, \mathbf{a}), \quad j = \overline{1, m},$$

$$R_i \in \{AND, OR, NOT, AND-NOT, OR-NOT\}, \quad i = \overline{1, k}.$$

**ЕСЛИ НЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ НИ ОДНО ИЗ УСЛОВИЙ**

$$(B_1(x, y, z, \mathbf{a}) R_1 B_2(x, y, z, \mathbf{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \mathbf{a}))_j, \quad j = \overline{1, m},$$

**ТО**

$$C = f_j(x, y, z, \mathbf{a}), \quad j = \overline{1, m}, \text{ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ИЗ}$$

РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ.

В качестве примера приведена одна из продукций, характеризующих процесс распространения поллютантов в атмосфере при наличии ветра.

**ПРОДУКЦИЯ.**

**ЕСЛИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ СОВОКУПНОСТЬ УСЛОВИЙ:**

<ИСТОЧНИК ВЫБРОСА ТОЧЕЧНЫЙ> AND

<ВЫБРОС КРАТКОВРЕМЕННЫЙ> AND

<ВЕТЕР ДУЕТ В ОДНОМ НАПРАВЛЕНИИ> AND

<ИСТОЧНИК ВЫБРОСА ПОДНЯТ НАД ЗЕМЛЕЙ> AND

<ПРИМЕСЬ ЛЕГКАЯ> AND

<РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОЛЛЮТАНТОВ ОГРАНИЧЕНО

ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ ИЛИ ВОДЫ> AND

<ОСАДКИ ОТСУТСТВУЮТ> AND

<ВТОРИЧНОЕ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ НЕЗНАЧИТЕЛЬНО>.

**ТО ИСКОМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМЕЕТ ВИД**

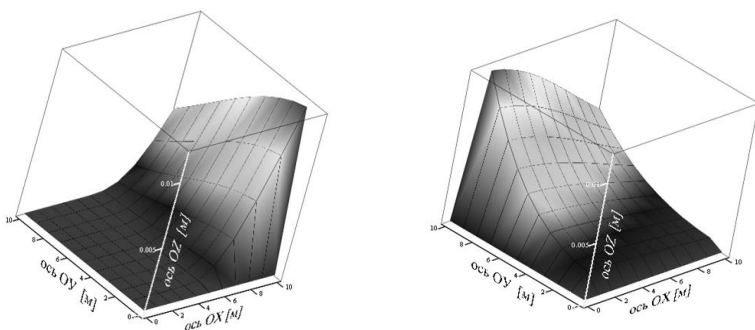
$$C(x, y, z) = \frac{M}{2\pi W \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2(x)^2}\right) \left( \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2(x)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2(x)^2}\right) \right)$$

$$M = \tau \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{n_j} M_j^i,$$

где  $x, y, z$  – координаты точки расчета, отсчитываемые от основания трубы или от центра объемного источника выбросов;  $\mathbf{a}$  – вектор состояния окружающей среды, характеризуемый давлением, температурой и относительной влажностью атмосферного воздуха, направлением ветра, интенсивностью выпадения осадков, продолжительностью работы технологического оборудования, климатическими условиями;  $W$  – скорость ветра на высоте источника выброса;  $H$  – эффективная высота источника;  $y$  – расстояние в направлении, поперечном направлению

ветра;  $z$  – высота до земли;  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  – среднеквадратические отклонения для  $y$  и  $z$ .

На рис. 7 приведены результаты численного моделирования распределения концентрации загрязнителей  $C = f(x, y, z, \mathbf{a})$ , определенного по продукции 4 при различных значениях входных параметров математической модели. При проведении вычислительного эксперимента делалось допущение, что весовой расход атмосферного поллютанта изменяется по гармоническому закону. Изменение концентрации загрязнителя имеет волнообразный характер, что является одним из подтверждений адекватности разработанной модели.



*Рис. 7. Волнообразные изменения концентрации загрязнителей при гармоническом законе изменения весового расхода поллютанта*

**Модели и алгоритмы определения скалярных составляющих векторного критерия оптимальности, характеризующих различные виды ущерба.**

При определении данных составляющих, характеризующих различные виды ущерба от воздействия атмосферных поллютантов и регулирования производительности технологического оборудования промышленного предприятия, используется формальный аппарат теории полезности, в частности, матрица решений. Поясним особенности его применения к решению

поставленной задачи на примере определения величины первой скалярной оставляющей  $Cf_1$  векторной целевой функции.

Данный вид ущерба состоит из накопленного в течение временного интервала  $\Delta t$  ущерба от воздействия атмосферных поллютантов  $Y_1$  и ущерба  $Y_2$ , вызванного неблагоприятным стечением обстоятельств, усилившим негативное воздействие атмосферных выбросов на здоровье населения –  $Cf_1 = Y_1 + Y_2$ . При определении  $Cf_1$  используется матрица решений  $\|e_{ij}\|$ , которая строится для каждой составляющей ущерба.

В частности, для определения составляющей  $Y_2$  используется матрица решений  $\|e_{ij}\|^{Y_2}$ , задаваемая таблице 1.

Таблица 1. Матрица решений  $\|e_{ij}\|^{Y_2}$  для определения составляющей ущерба  $Y_2$

$F_j$ $E_i$	$F_1$	...	$F_j$	...	$F_m$
$E_1$	$e_{11}$	...	$e_{1j}$	...	$e_{1m}$
...	...	...	...	...	...
$E_i$	$e_{i1}$	...	$e_{ij}$	...	$e_{im}$
...	...	...	...	...	...
$E_n$	$e_{n1}$	...	$e_{nj}$	...	$e_{nm}$

При составлении этой матрицы использованы следующие обозначения:  $E_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , – варианты принимаемых решений, связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия для регулирования концентрации выбросов поллютантов  $C$  в контролируемых точках;  $F_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , – различные внешние условия, существенно влияющие на величину ущерба в зоне воздействия атмосферных поллютантов промышленного предприятия (безветренная погода, смог, туман, лесные или степные пожары, аномальная жара или холод, высокая загазованность атмосферы, повышенная заболеваемость населения и др.), а также различные комбинации данных внешних условий. На стадии адаптации разработанного математического обеспечения к условиям конкретного



предприятия необходимо учесть внешние условия с возможной полнотой, что повысит качество принимаемых решений.

Основную сложность при формировании матрицы  $\|e_{ij}\|$  представляет определение ущерба  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ . В проводимом исследовании для определения ущерба предлагается использовать экспертные оценки; метрические функции пространства условий; кусочно-заданные функции;  $S$ -образные кривые; рецепиентные методики; комбинированные методы [3, 7, 8, 14].

Ниже в качестве примера рассмотрена процедура определения ущерба с помощью аппарата кусочно-заданных функций. В ее основу положена следующая гипотеза.

Допустим, что в момент времени  $t_0$  в точке с координатами  $x_0, y_0, z_0$  известны концентрация поллютантов  $C(t_0)$ , а также величина ущерба от заболеваемости населения в зоне воздействия атмосферных поллютантов промышленного предприятия  $e(x_0, y_0, z_0, C(t_0))$ .

Тогда в момент времени  $t_k$  в точках с координатами  $x_k, y_k, z_k$ , удовлетворяющих условиям

$$|x_k - x_0| \leq \varepsilon_x, |y_k - y_0| \leq \varepsilon_y, |z_k - z_0| \leq \varepsilon_z,$$

а также условию  $|C(t_k) - C(t_0)| \leq \varepsilon_c$ , выполняется

$$(1) \quad \begin{aligned} e(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t) &= \eta \rho_S; \\ \rho_S &= ((x(t_0) - x(t_k))^2 \mu_1 + (y(t_0) - y(t_k))^2 \mu_2 + (z(t_0) - z(t_k))^2 \mu_3 + \\ &+ (C(t_0) - C(t_k))^2 \mu_4)^{0.5}; \quad \sum_{i=1}^4 \mu_i = 1, \end{aligned}$$

где  $\mu_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ , – весовые коэффициенты, характеризующие степень влияния отклонения по  $i$ -й координате на величину функции расстояния  $\rho_S$ ;  $\eta$  – известный масштабирующий коэффициент, используемый для расчета ущерба в денежном выражении;  $\rho_S$  – функция расстояния, определяемого в метрическом пространстве состояний между точками  $S_0, S_k \in \{S\}$  с координатами  $(x_0, y_0, z_0, C(t_0))$  и  $(x_k, y_k, z_k, C(t_k))$ , соответственно;  $\{S\}$  – множество допустимых состояний объекта управления;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \varepsilon_c$  – окрестности точки  $S_0$ , в которых выполняется зависимость (1).

Алгоритм определения величин  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ , с использованием метрической функции пространства состояний (1) включает следующие основные этапы: выбор вариантов принимаемых решений  $E_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия; составление списка наиболее значимых внешних условий  $F_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , влияющих на величину  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ ; выбор координат базовых точек таким образом, чтобы их окрестности  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  перекрывали всю контролируемую территорию; определение ущерба от атмосферных загрязнений в этих точках, например, с помощью метода экспертных оценок или других известных методик; выбор координат точек контроля, в которых необходимо определить величину ущерба от заболеваемости населения в зоне воздействия атмосферных поллютантов промышленного предприятия; определение в точках контроля по формуле (1) ущерба  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ , и формирование матрицы решений  $\|e_{ij}\|$ .

Аналогично строятся и матрицы решений, характеризующие величину остальных скалярных критериев  $Cf_2, \dots, Cf_5$ . Основным отличием данных матриц являются различные внешние условия  $F_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , влияющие на величину ущерба  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ . Для минимизации суммарного ущерба

$$Cf_S = \sum_{i=1}^5 \mu_i Cf_i,$$

причиняемого атмосферными поллютантами, используется минимаксный критерий и критерий Сэвиджа.

Применение минимаксного критерия полностью исключает возможность возникновения ситуации, когда ущерб от воздействия атмосферных поллютантов превысит заданную величину, определяемую из выражения

$$(2) \quad Z_{MM} = \max e_{ir}, i = \overline{1, n}; e_{ir} = \min e_{ij}, j = \overline{1, m},$$

где  $Z_{MM}$  – величина наибольшего ущерба, причиняемого атмосферными загрязнителями.

Задача может иметь неединственное решение. Множество оптимальных вариантов решения (величины снижения производительности технологического оборудования) имеет вид

$$E_0 = \{E_{i_0} | E_{i_0} \in E : e_{i_0} = \max_i \min_j e_{ij}\}, e^* = e_{i_0}.$$

Рассмотренные выше алгоритмы определения величины минимального ущерба позволяют разработать алгоритм решения поставленной задачи.

## **5. Алгоритм решения задачи**

1. Начало алгоритма.
2. Определение входной информации, используемой для расчета веса загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу промышленным предприятием: списка вредных веществ, поступающих в атмосферу при работе технологического оборудования; наименований производственного оборудование, при работе которого образуются вредные вещества; смены, дни и продолжительность работы указанного оборудования и др.
3. Выбор интервала моделирования  $\Delta t$ .
4. Расчет на интервале  $\Delta t$  величины массового и суммарного выброса  $M_i$ ,  $i = 1, \dots, 10$ , и  $W_i$ ,  $i = 1, \dots, 10$ , для различных групп оборудования (с первой по десятую).
5. Определение на интервале моделирования  $\Delta t$  величин массового и суммарного выброса  $M_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , и  $W_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , по каждому вредному веществу.
6. Расчет общего массового и суммарного выброса  $M_i^*$ ,  $i = 1, \dots, k$  и  $W_i^*$ ,  $i = 1, \dots, k$  вредных веществ технологическим оборудованием предприятия.
7. Формирование входных параметров математических моделей подъема и переноса загрязняющих веществ.
8. Расчет высоты подъема поллютантов.
9. Расчет концентрации вредных веществ в точках контроля с помощью известных математических модели подъема и переноса поллютантов.
10. Определение скалярных составляющих оптимизируемого критерия.
11. Выделение области Парето.

12. Определение вариантов принимаемых решений  $E_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия.

13. Определение внешних условий  $F_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , влияющих на временном интервале  $\Delta t$  на величину ущерба в зоне воздействия атмосферных поллютантов промышленного предприятия.

14. Выбор способов расчета ущерба от воздействия поллютантов  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

15. Расчет величины ущерба от воздействия поллютантов  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

16. Построение матрицы решений  $\|e_{ij}\|$ .

17. Формирование оценочной функции, применяемой при минимизации скалярного критерия  $Cf_s = \sum_{i=1}^s \mu_i Cf_i$ .

18. Минимизация целевой функции с использованием минимаксного критерия или критерия Сэвиджа.

19. Выбор оптимального варианта решения  $E_m$  об уменьшении на интервале  $\Delta t$  производительности оборудования промышленного предприятия с целью регулирования концентрации выбросов поллютантов в контролируемых точках.

20. Выдача сообщения лицу, принимающему решения (ЛПР), об оптимальном варианте решения  $E_m$  с указанием достигаемой концентрации поллютантов в контролируемых точках, величины временного интервала  $\Delta t$  и оптимального состава и производительности оборудования промышленного предприятия.

21. Конец алгоритма

## **6. Модельный пример**

Источником атмосферного загрязнения в данном примере, иллюстрирующем процедуру решения задачи, является промышленное предприятие среднего бизнеса, занимающееся производством железобетонных изделий. Предприятие расположено в загородной зоне крупного промышленного города, при неблагоприятном направлении ветра атмосферные загрязнители могут попасть на его территорию (рис. 8) [13].

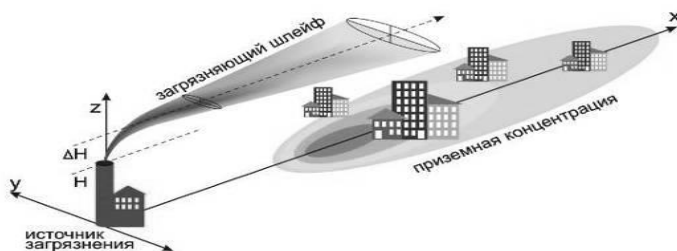


Рис. 8. Схема загрязнения городской территории постоянно действующим точечным источником атмосферных выбросов

Входные данные математической модели, используемой для расчета весового расхода атмосферных поллютантов, взяты из документа ВРД 66-125-90 [5], регламентирующего методику определения валовых выбросов загрязняющих веществ заводами по производству железобетона ОАО «Завод ЖБИ». В качестве интервала моделирования выбраны сутки с разбивкой по часам. На данном временном интервале работает оборудование, перечень которого приведен в таблице 2 [5].

Таблица 2. Источники атмосферного загрязнения предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ»

Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
1	2	3	4	5
Посты выгрузки вагонов и самосвалов грейферными механизмами в приемные ямы	Цемент	2,306	0,08	Неорганизованный выброс при скорости ветра 2,5 м/с, влажности материала 5%
	Щебень	2,69	0,11	
	Песок	0,5	0,03	
	Известняк	0,556	0,24	

Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
1	2	3	4	5
Посты выгрузки вагонов в склады хранилищ пневмотранспортом	Цемент	2,61	0,8	Средняя концентрация 8,2 г/м <sup>3</sup>
	Песок	1,306	-	
Загрузка цементовозом: самотеком пневмотранспортом	Цемент	-	0,02	Средняя концентрация, г/м <sup>3</sup> 3,5 19,5
	Цемент	-	0,2	
Загрузка сыпучих материалов в желоба, питатели и бункеры: порошковых материалов	Пыль материалов	1,97	2,3	Средний размер менее 8 мм
	кусковых материалов	0,833	1,0	
Пересыпка на транспортеры: порошковых материалов	Пыль материалов	1,19	0,539	Средний размер менее 8 мм

Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
1	2	3	4	5
кусовых материалов	Пыль материалов	1,43	0,65	Средний размер 8 мм и более
Кабинные укрытия ленточных конвейеров-порошковых материалов	Пыль материалов	0,794	0,95	
Кабинные укрытия ленточных конвейеров кусковых материалов	Пыль материалов	0,3	0,35	Средний размер 8 мм и более
Комбинированные укрытия в галереях ленточных конвейеров: порошковых материалов	Пыль материалов	0,925	1,1	Средний размер менее 8 мм
	кусовых материалов	0,411	0,5	Средний размер 8 мм и более

Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
1	2	3	4	5
Дробилки шековые: изверженные породы	Пыль материалов	14,4	3,0	Влажность материала 5%
	карбонатные породы	23,6	6,0	
Дробилки конусные: изверженные породы	Пыль материалов	20,3	2,0	Влажность материала 5%
	карбонатные породы	38,6	5,0	
Грохоты: изверженные породы	Пыль материалов	8,33	-	Влажность материала 5%
	карбонатные породы	9,72	-	
Установка сушки песка в потоке горячих газов: изверженные породы	Пыль материалов	1,89	1,8	Без учета выделений от сжигаемого топлива



Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
1	2	3	4	5
карбонатные породы	Пыль материалов	2,42	2,4	
Весовые дозаторы и бетоносмесительные установки	Пыль цемента и песка	0,972	1,33	3,2 г/м <sup>3</sup>
Пневмотранспорт цемента	Пыль цемента	2,64	0,8	8,2 г/м <sup>3</sup>
Цементные силосы	Пыль цемента	-	-	8,7-10,1 г/м <sup>3</sup>

Для данного объекта управления на временном интервале [0; 365] суток необходимо решить задачу минимизации ущерба от атмосферных выбросов ОАО «Завод ЖБИ».

Результатом решения указанной задачи является изменение производственного процесса, которое, исходя из интересов акционеров завода, трудового коллектива, из особенностей производственной программы и используемого технологического оборудования, невозможно осуществить чаще 1 раза в год.

На данном временном интервале на величину ущерба могут значительно повлиять ряд внешних воздействий, например, таких как повышенный уровень смога, высокая задымленность города из-за лесных пожаров и др.

Эти внешние воздействия носят во многом случайный характер, достоверно предсказать их возникновение на рассматриваемом временном интервале не представляется возможным. Это означает, что решение об изменении технологического

процесса ОАО «Завод ЖБИ» необходимо принимать в условиях неопределенности внешних возмущений таким образом, чтобы возможный ущерб не превысил максимально допустимой величины.

В рассматриваемом примере ущерб от воздействия атмосферных загрязнителей при самом неблагоприятном развитии событий не должен более чем в 2 раза превысить ущерба при наиболее благоприятных внешних условиях.

С учетом вышеизложенного при минимизации ущерба использован минимаксный критерий, применение которого полностью исключает возможность возникновения ситуации, когда ущерб от воздействия атмосферных загрязнителей превысит заданную величину, определяемую из выражения (2).

Процедура решения. Результаты расчета веса загрязнителей (пыль цемента, песка, материалов, а также цемент, песок, щебень, известняк), выбрасываемых в течение 1 суток с разбивкой по часам в атмосферу предприятием по производству железобетонных изделий, приведены в виде гистограммы на рис. 9.

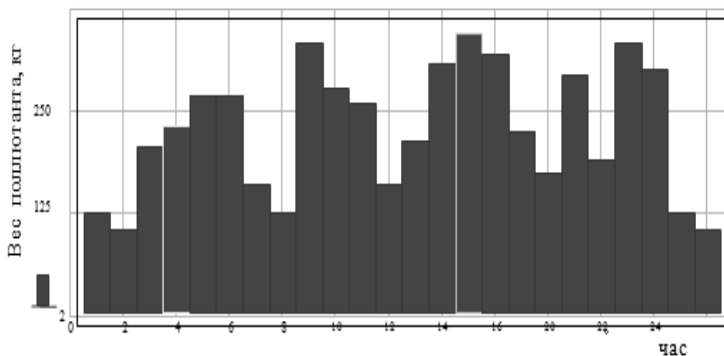


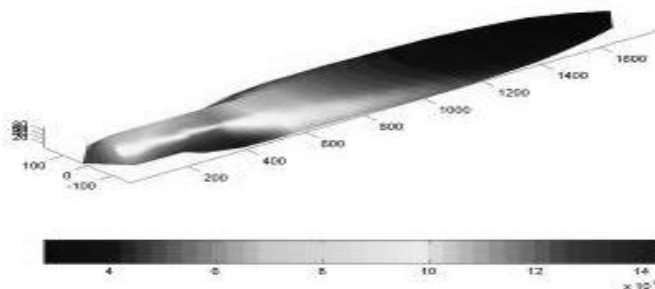
Рис. 9. Результаты расчета величины выброса атмосферных загрязнителей ОАО «Завод ЖБИ»

Для упрощения расчета принято допущение, что все оборудование, указанное в столбце «Источник выделения загрязняющих веществ» таблицы 2, имеется на предприятии только в единственном экземпляре.

При проведении моделирования для упрощения расчетов сделано допущение, что вероятность работы каждой единицы оборудования промышленного предприятия (таблица 2) в любой момент времени представляет собой случайную величину, равномерно распределенную на интервале от 0 до 1.

В дальнейшем будем считать, что приведенные на рис. 8 результаты моделирования характеризуют наиболее неблагоприятную ситуацию с точки зрения интенсивности загрязнения окружающей среды.

Расчет распределения концентрации загрязнителей по контролируемой территории осуществлен с использованием гауссовой модели факела, его результаты приведены на рис. 10.



*Рис. 10. Распределение концентрации загрязнителей по территории, прилегающей к ОАО «Завод ЖБИ»*

При проведении расчета средняя скорость ветра по направлению от источника загрязнений к городу принята равной 5 м/с.

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что в точках контроля концентрация загрязнителей предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ» при неблагоприятном направлении ветра составляет от 0,124 мг/м<sup>3</sup> до 0,135 мг/м<sup>3</sup>.

Процентное соотношение различных видов загрязнителей в точках контроля показано на диаграмме (рис. 11). Предельно допустимая концентрация ни по одному из загрязнителей оказалась не превышенной.

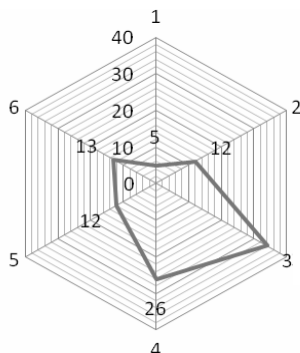


Рис. 11. Соотношение различных видов загрязнителей (табл. 2) в точках контроля (в процентах): 1 – пыль карбонатных пород; 2 – пыль порошковых материалов; 3 – пыль цемента и песка; 4 – пыль известняка; 5 – пыль известкового доломита; 6 – прочие поллютанты

Для решения задачи оптимизации суммарного ущерба от атмосферных выбросов построена матрица  $\|e_{ij}\|$ , приведенная в таблице 3. Элементами матрицы решений  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, t$ , является нормированная величина ущерба, соответствующая различным вариантам принимаемых решений и внешним условиям, влияющим на величину ущерба. Нормировка осуществлена делением значения каждого  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, t$ , на значение элемента с наименьшей величиной ущерба ( $e_{77}$ ).

Для уменьшения размерности и сохранения обзорности рассматриваемого модельного примера ущерб  $e_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, t$ , определен методом экспертных оценок.

В таблице 3 приняты следующие обозначения:  $F_1$  – повышенный уровень смога;  $F_2$  – высокая задымленность города из-за лесных пожаров;  $F_3$  – продолжительный летний антициклон;  $F_4$  – продолжительный зимний антициклон;  $F_5$  – повышенный уровень смога и задымленности города;  $F_6$  – высокая загруженность городских автомобильных магистралей;  $F_7$  – нет внешних воздействий, значительно влияющих на ущерб.

Таблица 3. Матрица решений, используемая для определения ущерба от атмосферных выбросов предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ»

Внешние воздействия Варианты решений	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$	$F_7$
	$E_1$ — сохранение текущей концентрации поллютантов	1,4	2,1	1,3	1,4	3,7	1,7
$E_2$ — уменьшение концентрации поллютантов на 10%	1,4	1,9	1,3	1,4	2,9	1,6	1,5
$E_3$ — уменьшение на 20%	1,3	1,8	1,3	1,4	2,4	1,6	1,5
$E_4$ — уменьшение на 30%	1,3	1,7	1,2	1,3	2,1	1,5	1,4
$E_5$ — уменьшение на 40%	1,3	1,6	1,2	1,3	1,7	1,5	1,3
$E_6$ — уменьшение на 50%	1,2	1,6	1,2	1,3	1,6	1,5	1,3
$E_7$ — уменьшение на 60%	1,2	1,5	1,1	1,2	1,6	1,4	1

Выбор минимальной величины ущерба осуществлен в соответствии с таблицей 3 с помощью минимаксного критерия

$$Z_{MM} = \max e_{ir}, i = \overline{1,7}; e_{ir} = \min e_{ij}, j = \overline{1,7};$$

$$Z_{MM} = e_{75} = 1,6; Z_{MM} = e_{75} = 1,6.$$

Установлено, что задача имеет два решения  $E_6$  и  $E_7$ . Вариант решения  $E_6$  для предприятия реализовать проще, чем вариант  $E_7$ . Поэтому в качестве решения задачи принято решение, связанное с 50% сокращением концентрации атмосферных поллютантов ОАО «Завод ЖБИ» в точках контроля.

Реализация варианта решения  $E_6$  означает, что концентрацию атмосферных поллютантов необходимо снизить с величин  $0,124 \text{ мг/м}^3 - 0,135 \text{ мг/м}^3$  в два раза.

Для рассматриваемого предприятия для этого необходимо в среднем уменьшить производительность: шековых дробилок на 10% и конусных дробилок на 10%.

Кроме того, следует уменьшить количество выделяемой пыли при выгрузке вагонов и самосвалов грейферными механизмами в приемные ямы на 30–40% и сократить время работы грохотов изверженной породы на 20%.

Временные интервалы решения задачи. Поставленная задача решается на временных интервалах сутки, месяц и год.

На первом из этих интервалов осуществляется определение ущерба от атмосферных выбросов предприятия, приведших к превышению предельно допустимой концентрации поллютантов в точках контроля.

На интервале 1 месяц определяется величина ущерба за месяц, производится сравнение данной величины с запланированным показателем, по результатам сравнения ЛПП выдаются рекомендации по регулированию состава и производительности работающего технологического оборудования.

На годовом интервале на основе анализа накопленной информации об управляющих воздействиях, реализованных в течение года, осуществляется экспертная оценка величины экономического эффекта от решения задачи. Формируются годовые показатели, характеризующие эффективность использования математического обеспечения, а также выполняется коррекция коэффициентов математической модели.

Адаптация разработанного математического обеспечения к работе в составе информационных систем данного предприятия выполнена в соответствии с рекомендациями [1, 6, 10, 11].

## 7. Заключение

Разработаны модели и алгоритмы для решение задачи автоматизированного управления технологическим оборудованием промышленного предприятия по векторному критерию, характеризующему различные виды ущерба от воздействия атмосферных поллютантов.

Решение этой задачи имеет существенное народно-хозяйственное значение, связанное с уменьшением ущерба от загрязнителей атмосферы, причиняемого населению, сельскому хозяйству, природной среде, а также с повышением эффективности функционирования промышленных предприятий за счет снижения экологических штрафов и предотвращения экологических преступлений и правонарушений.

В настоящее время, разработанное математическое обеспечение проходит апробацию в структурных подразделениях ОАО «СЭПО-ЗЭМ».

### Литература

1. АВЕТИСЯН Ю.А., КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф. И ДР. *Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – №11. – С. 43–47.
2. БЕРЛЯНД М.Е. *Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы*. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
3. БЫСТРОВ А.С., ВАРАНКИН В.В., ВИЛЕНСКИЙ М.А. И ДР. *Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды*. – М.: Экономика, 1986. – 123 с.
4. ИЗРАЭЛЬ Ю.А. *Экология и контроль состояния природной среды*. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 369 с.

5. КВАШНИН И.М. *Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация.* – М.: АВОК-PRESS, 2005. – 390 с.
6. КУШНИКОВ В.А., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ЦВИРКУН А.Д. *Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей* // Автоматика и телемеханика. – 1998. – №7. – С. 168–175.
7. КУШНИКОВА Е.В. *Модели и методы прогнозирования аварийных ситуаций, возникающих при выбросе поллютантов промышленных предприятий* // Материалы Всероссийской научной конференции с Международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении». – Саратов, 2013. – С. 81–85.
8. КУШНИКОВА Е.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Задача минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий* // Сборник научных статей по материалам Международной научной конференции ICIT 2014 «Информационно – коммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». – Саратов, 2014. – С. 124–127.
9. МАРЧУК Г.И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды.* – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 320 с.
10. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. И ДР. *Человек. Машина. Среда.* – Саратов: Издательский Центр «Наука», 2013. – 196 с.
11. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. И ДР. *Критические ситуации в человеко-машинных системах.* – Саратов: Издательский Центр «Наука», 2015. – 244 с.
12. САХАРОВ В.К. *Радиоэкология: Учебное пособие.* – СПб.: Изд-во «Лань», 2006. – 320 с.
13. СОЛЯНИК Н.А., КУШНИКОВ В.А. *Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных предприятий* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – №1, Т. 1. – С. 104–109.



14. ТРАХТЕНБЕРГ И.М., ТИМОФИЕВСКАЯ А.А., КВЯТКОВСКАЯ И.Я. *Методы изучения хронического действия химических и биологических загрязнителей.* – Рига: Зинатне, 1987. – 172 с.
15. GIFFORD F. *Turbulent diffusion – typing schemes: a review* // Nuclear Safety. – 1976. – Vol. 17, №1. – P. 25–43.
16. PASQUILL F. *Atmospheric diffusion.* – London: Van Nostr. Co. Ltd., 1962. – 298 p.
17. PETROSIAN L., ZACCOUR G. *Time-consistent Shapley value allocation of pollution cost reduction* // Journal of Economic Dynamics and Control. – 2003. – Vol. 27 (3). – P. 381–398.

## **MODELS AND ALGORITHMS OF DAMAGE MINIMIZATION FROM INDUSTRIAL POLLUTION**

**Elena Kushnikova**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, postgraduate (elenak3366@ya.ru).*

**Alexander Rezchikov**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, Scientific director (iptmuran@san.ru).*

**Vladimir Ivaschenko**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Dr Sc., academic secretary (iptmuran@san.ru).*

**Leonid Filimonyuk**, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, Scientist (iptmuran@san.ru).*  
*Abstract: We suggest the formal setting for the problem of damage minimization from industrial pollution. The algorithm is developed, which allows increasing enterprise efficiency due to the decrease of ecological penalties and damage from atmospheric pollution.*

**Keywords:** manufacturing enterprise, pollution, algorithm of damage minimization, info-logical diagram, optimality criterion.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Г.А. Угольницким*

*Поступила в редакцию 22.06.2015.*

*Дата опубликования 30.09.2015.*