

УДК 528.94 (004.6)

ББК 78.34

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ МИНИМИЗАЦИИ УЩЕРБА ОТ АТМОСФЕРНЫХ ВЫБРОСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

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

*(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 над горо-

¹ Елена Вадимовна Кушникова, аспирантка (elenak3366@ya.ru).

² Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН (iptmuran@sau.ru).

³ Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ученый секретарь (iptmuran@sau.ru).

⁴ Леонид Юрьевич Филимонюк, научный сотрудник, кандидат технических наук (iptmuran@sau.ru).

дами, 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 было осуществлено в работах таких отечественных и зарубежных ученых как Г.И. Марчук, Ю.А. Израэль, М.Е. Берлянд, Г. Бригс, Ф. Гиффорд, Ф. Паскуилл и др. [2, 4, 9, 13, 15, 16]. 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, алгоритмов для минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленного предприятия.

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

Анализ существующих систем мониторинга процессов формирования и распространения атмосферных выбросов вредных веществ, образующихся в результате функционирования промышленных предприятий, позволяет определить входные и выходные координаты данного объекта управления.

К управляющим воздействиям, используемым при управлении атмосферными выбросами промышленных предприятий по критерию минимума ущерба, 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 промышленного предприятия; температура газов, выбрасываемых в атмосферу; диаметр и высота дымовой трубы предприятия.

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].

На машиностроительных предприятиях в число данных мероприятий входит сокращение или прекращение работы ванн травления, гальванических участков, запрещение залповых выбросов поллютантов в атмосферу, временная приостановка работы литейных цехов и др. [2, 4].

На предприятиях нефтяной и химической промышленности: прекращение работ, связанных с регенерацией катализаторов и осушителей, запрещение пуска и остановки систем хлорирования, запрещение вскрытия и продувки технологических агрегатов и др. [2, 4].

В отношении набора управляющих координат делаются следующие допущения: набор управляющих координат полон; управляющие координаты набора не являются взаимоисключающими; отдельные координаты набора не взаимосвязаны.

К управляемым координатам 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.

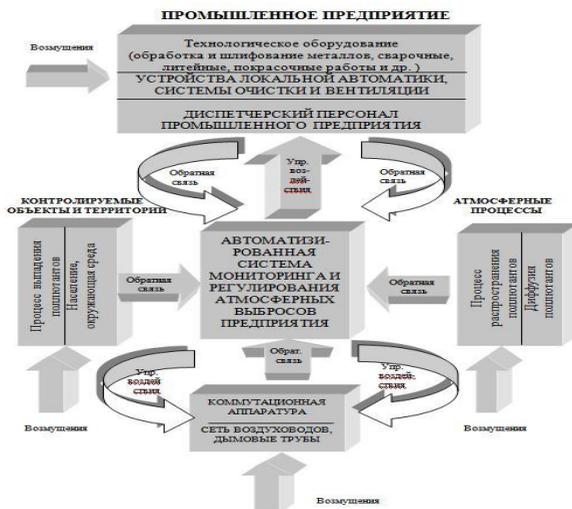


Рис. 1. Процесс формирования и распространения атмосферных выбросов промышленного предприятия как объект мониторинга и управления

Возмущениями являются: 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 другие.

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.

3. Постановка задачи

Требуется разработать алгоритм синтеза вектора управляющих воздействий $u^*(t) \in \{\vec{U}(t)\}$, минимизирующих на интервале времени длиной $\Delta T = t_1 - t_2$ при любых допустимых состояниях окружающей среды $x(t) \in \{\vec{X}(t)\}$ векторный критерий оптимальности $Cf = (Cf_1, Cf_2, Cf_3, Cf_4, Cf_5)$, характеризующий ущерб, причиняемый атмосферными выбросами промышленного предприятия, а также ущерб предприятию, возникающий при регулировании величины этих выбросов и оплате штрафов за превышение предельно допустимых концентраций загрязнителей:

$$Cf_1 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_1(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) dt,$$

$$Cf_2 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_2(x(t), u(t), x'(t), u'(t)) dt,$$

$$Cf_3 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_3(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt,$$

$$Cf_4 = \int_{t_2}^{t_1} Cf_4(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt$$

$$Cf_5 = \int_{t_2}^{t_1} L(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) + S(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) dt$$

при известных ограничениях и граничных условиях:

$$R_i(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) \geq 0, \quad i = \overline{1, k_1},$$

$$R_i(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) \leq 0, \quad i = \overline{n_1 + 1, k_2},$$

$$F_i^{(t_1)}(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_2 + 1, k_3},$$

$$F_i^{(t_2)}(\vec{x}(t), \vec{u}(t), \vec{x}'(t), \vec{u}'(t)) = 0, \quad i = \overline{n_3 + 1, k_4},$$

где Cf_1 - ущерб, связанный с ростом заболеваемости населения из-за воздействия атмосферных поллютантов; Cf_2 - потери сельского хозяйства в результате воздействия атмосферных выбросов; Cf_3 - потери, связанные с изменением окружающей 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 выплат штрафов за нарушение предельно допустимых концентраций вредных веществ; S - штрафные санкции, накладываемые на предприятие за нарушение санитарно-гигиенических нормативов; L - потери промышленного предприятия, возникающие из-за отключения технологического оборудования и уменьшения его производительности; $\{\vec{X}(t)\}, \{\vec{U}(t)\}$ - множества допустимых значений

→ → → →
векторов $x(t)$ и $u(t)$, соответственно; $x'(t), u'(t)$ - первые производные векторов состояния среды и управляющих воздействий, соответственно; t - время; $k_i, i = \overline{1,4}$ - известные константы.

Методика решения задачи. Поставленная задача принадлежит к классу задач векторной оптимизации. Ее решению должно предшествовать установление отношений порядка между отдельными составляющими векторного критерия. 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 \overrightarrow{Cf} на пять выбранных направлений, совпадающих с вектором весовых коэффициентов $\vec{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5)$. С учетом вышеизложенного целевая функция решаемой задачи примет следующий вид:
$$Cf_s = \sum_{i=1}^5 \mu_i Cf_i, \quad \mu_i \geq 0, i = \overline{1,5}, \quad \sum_{i=1}^5 \mu_i = 1,$$
 где Cf_s - целевая функция скалярной задачи, сформированной после свертки критериев. Реализация указанного способа решения поставленной задачи требует предварительной разработки комплекса математических моделей 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 $\overrightarrow{Cf} = (Cf_1, Cf_2, Cf_3, Cf_4, Cf_5)$, характеризующего различные виды ущерба, связанного с выбросом атмосферных поллютантов.

4. Метод решения задачи

Структурная схема комплекс математических моделей, используемых для решения поставленной задачи, изображена на рис.2.

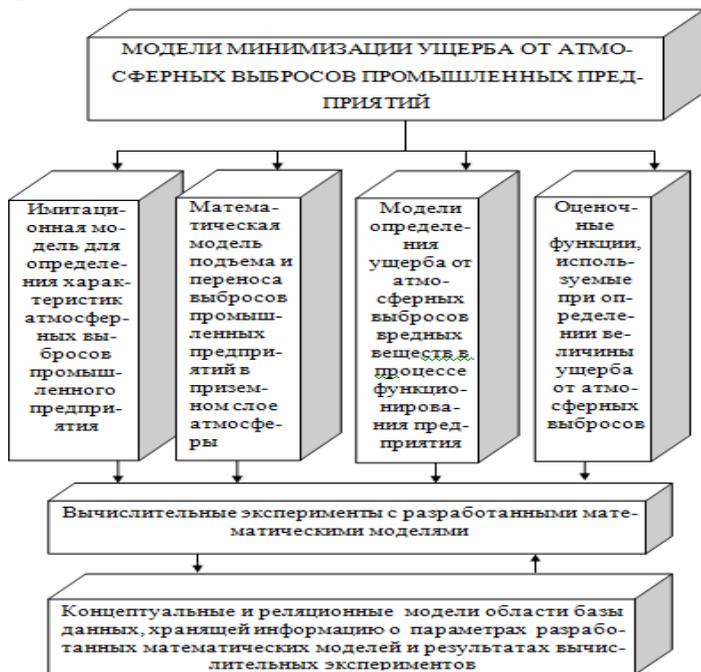


Рис. 2. Математические модели задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий

Имитационная модель для определения массового и суммарного выброса загрязнителей. При построении имитационной модели все производственное оборудование, в процессе функционирования которого образуются атмосферные поллютанты, подразделяется на 10 групп.

При расчете массового $M_i, i = \overline{1, n}$ и суммарного $W_i, i = \overline{1, n}$ выброса загрязнителей и 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 системой местной и общеобменной вентиляции, положенная в основу разрабатываемой имитационной модели, приведена на рис.3.

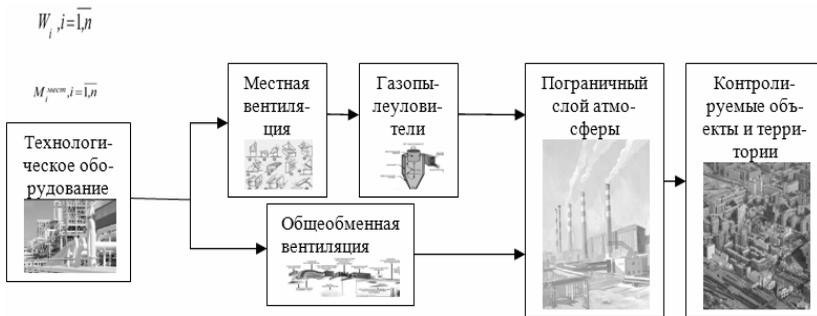


Рис. 3. Основные этапы удаления поллютантов системой местной и общеобменной вентиляции и их распространение в атмосфере

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

$$M_i^1 = M_i^{обмен,1} + M_i^{мест,1}, i = \overline{1, n};$$

$$M_i^{0,1} = \left(\sum_{j=1}^m \eta_j^1 Pas_j^1 \right)_i, i = \overline{1, n};$$

$$W_i^1 = \sum_{j=1}^l M_i^1 \Delta t_j, i = \overline{1, n};$$

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

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

где $M_i^{мест,1}$ - 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; $k_{мест}^1$ - коэффициент эффективности местных вытяжных устройств; n - количество поллютантов; η_j^1 - коэффициент производительности j -ой 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; $M_i^{обмен,1}$ - массовое количество i -го поллютанта, не уловленное местными вытяжными устройствами и удаляемое общеобменной вытяжной вентиляцией; l - количество интервалов времени Δt_j , в течение которых работало оборудование первой группы за расчетный период; Pas_j^1 - количество загрязнителей, выбрасываемых в атмосферу j -ой единицей оборудования первой группы; символ «1» в верхнем индексе означает принадлежность к оборудованию первой группы.

В момент решения задачи $t=t_p$ работа j -ой единицы оборудования первой группы определяется по функции распределения непрерывной случайной величины $P_j^1 = P_j^1(t)$, 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. 4 приведены результаты вычислительного эксперимента по определению веса поллютантов, которые на различных временных интервалах поступают в атмосферу при работе оборудования первой группы.

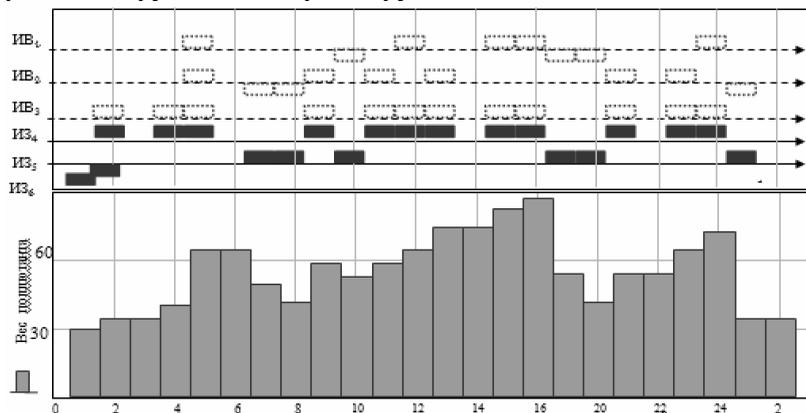


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования процесса выделения абразивной и металлической пыли обрабатываемыми станками заточного участка при механической обработке металлов

На рис.4 приняты следующие обозначения: ИВ₁, ИВ₂, ..., ИВ₆ – источники выбросов загрязняющих веществ, представляющие собой шесть металлообрабатывающих станков с абразивными кругами диаметром 100, 250 и 400 мм (по два каждого вида, соответственно). 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 раз-

личного 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.5.

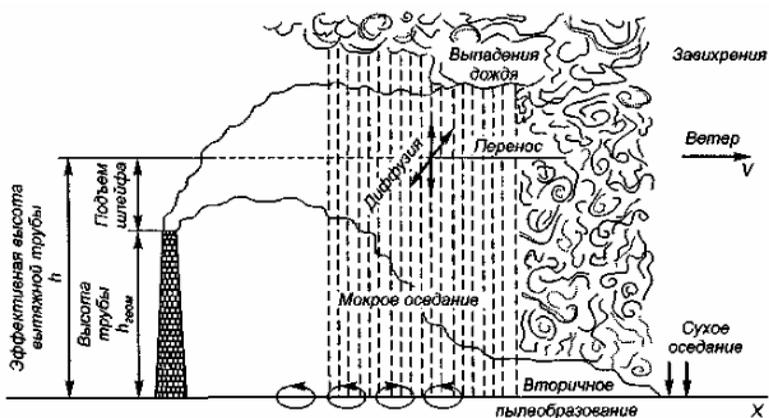


Рис. 5. Атмосферные процессы, влияющие на подъем и распространение загрязнителей [12]

Математическая модель для 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 разработанная логико-математическая модель может быть представлена в виде совокупности следующих продукций:

ПРОДУКЦИЯ j . ЕСЛИ ВЫПОЛНЯЕТСЯ СОВОКУПНОСТЬ УСЛОВИЙ:

$\langle (B_1(x, y, z, \vec{a}) R_1 B_2(x, y, z, \vec{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \vec{a}))_j \rangle$, ТО ИСКАМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМЕЕТ ВИД:

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

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

ЕСЛИ НЕ ВЫПОЛНЯЕТСЯ НИ ОДНО ИЗ УСЛОВИЙ $(B_1(x, y, z, \vec{a}) R_1 B_2(x, y, z, \vec{a}) R_2 \dots R_{k-1} B_k(x, y, z, \vec{a}))_j$, $j = \overline{1, m}$, ТО $c = f(x, y, z, \vec{a})$ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ИЗ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА И ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ.

Ниже 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 ИСКАМАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМЕЕТ ВИД:

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

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

где W - скорость ветра на высоте источника выброса; H - эффективная высота источника; y - расстояние в направлении, поперечном направлению ветра; σ_y , σ_z - дисперсионные параметры; z - высота до земли.

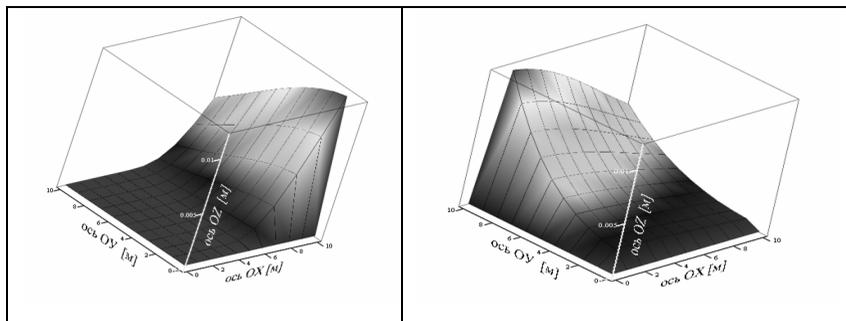


Рис. 6. Волнообразные изменения концентрации загрязнителей при гармоническом законе изменения весового расхода поллютанта

На рис.6 приведены результаты численного моделирования распределения концентрации загрязнителей $c = f(x, y, z, \vec{a})$, 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 (рис. 6) имеет волнообразный характер, что является одним из подтверждений адекватности разработанной модели.

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 составляющей Cf_1 векторной целевой функции.

Данный вид ущерба состоит из накопленного в течение временного интервала Δt ущерба от воздействия атмосферных загрязнителей 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 $\|e_{ij}\|$, при решении поставленной задачи данная матрица строится для каждой составляющей ущерба.

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

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

	F_1	F_2	F_3	...	F_n
E_1	e_{11}	e_{12}	e_{13}	...	e_{1n}
E_2	e_{21}	e_{22}	e_{23}	...	e_{2n}
...
E_m	e_{m1}	e_{m2}	e_{m3}	...	e_{mn}

При составлении этой матрицы были использованы следующие обозначения. $E_i, i = \overline{1, m}$ - варианты принимаемых решений, связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия для регулирования концентрации выбросов загрязнителей C в контролируемых точках. $F_i, i = \overline{1, n}$ - различные внешние условия, существенно влияющие на величину ущерба в зоне воздействия атмосферных загрязнителей промышленного предприятия, например, 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 наибольшей возможной полнотой, что повысит качество принимаемых решений. Пусть $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ - величина ущерба Y_1 , соответствующая различным вариантам принимаемых решений, а также перечисленным выше внешним условиям, усиливающих негативное воздействие атмосферных выбросов на здоровье населения.

Основную сложность при формировании матрицы $\|e_{ij}\|$ представляет определение ущерба $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$. В проводимом исследовании для определения ущерба предлагается использовать экспертные оценки; метрические функции пространства условий; кусочно-заданные функции; S – образные кривые; реципиентные 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:

$$e(x(t_k), y(t_k), z(t_k), t) = \eta \rho_S;$$

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

где $\mu_i, i = \overline{1, 4}$ - весовые коэффициенты, характеризующие степень влияния отклонения по i -ой координате на величину функции расстояния ρ_S ; η - известный масштабирующий коэф-

фициент, используемый для расчета ущерба в денежном выражении; ρ_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 $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ с использованием метрической функции пространства состояний (1) включает следующие основные этапы: выбор вариантов принимаемых решений $E_i, i = \overline{1, m}$, связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия; составление списка наиболее значимых внешних условий $F_i, i = \overline{1, n}$, влияющих на величину $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$; 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 $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ и формирование матрицы решений $\|e_{ij}\|$.

Аналогично строятся и матрицы решений, характеризующие величину остальных скалярных критериев Cf_2, Cf_3, Cf_4, Cf_5 . Основным отличием данных матриц являются различные внешние условия $F_i, i = \overline{1, n}$, влияющие на величину ущерба $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$. 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:

$$E_0 = \{E_{i0} | E_{i0} \in E : e_{i0} = \max_i \min_j e_{ij}\}, \quad e^* = e_{i0}$$

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

5. Алгоритм решения задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленных предприятий

1. Начало алгоритма.
2. Определение входной информации имитационной модели, 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 Δt .
4. Расчет на интервале Δt величины массового и суммарного выброса $M_i, i = \overline{1, 10}$ и $W_i, i = \overline{1, 10}$ для различных групп оборудования (с первой по десятую).

5. Определение на интервале моделирования Δt величин массового и суммарного выброса $M_{i,i=\overline{1,m}}$ и $W_{i,i=\overline{1,m}}$ по каждому вредному веществу.

6. Расчет общего массового и суммарного выброса $M_{i,i=\overline{1,k}}^*$ и $W_{i,i=\overline{1,k}}^*$ 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. Определение вариантов принимаемых решений $E_{i,i=\overline{1,m}}$, связанных с уменьшением производительности оборудования промышленного предприятия.

12. Определение внешних условий $F_{i,i=\overline{1,n}}$, влияющих на временном интервале Δt на величину ущерба в зоне воздействия атмосферных поллютантов промышленного предприятия.

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

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

15. Формирование матрицы решений $\|e_{ij}\|$.

16. Формирование оценочной функции, применяемой при минимизации скалярного критерия $Cf_S = \sum_{i=1}^5 \mu_i Cf_i$.

17. Минимизация целевой функции в условиях неопределенности возмущений окружающей среды с использованием минимаксного критерия или критерия Сэвиджа.

18. Выбор оптимального варианта решения E_m об уменьшении на интервале Δt производительности оборудования про-

мышленного предприятия с целью регулирования концентрации выбросов загрязнителей C в контролируемых точках.

19. Выдача сообщения ЛПР об оптимальном варианте решения E_m с указанием достигаемой концентрации загрязнителей в контролируемых точках, величины временного интервала Δt и оптимального состава и производительности оборудования промышленного предприятия.

20. 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.7).

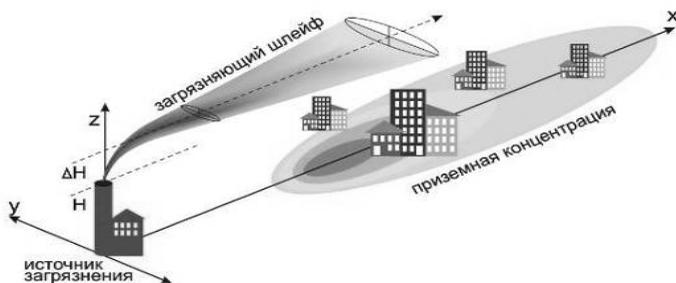


Рис. 7. Схема загрязнения городской территории постоянно действующим точечным источником атмосферных выбросов [13]

Входные данные имитационной модели, используемой для расчета весового расхода атмосферных загрязнителей, 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 одни сутки с разбивкой по часам. На данном временном интервале на предприятии работает следующее оборудование (Табл. 2).

Источники атмосферного загрязнения предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ» [5].

Таблица 2. Источники атмосферного загрязнения предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ» [5]

Источник выделения загрязняющих веществ	Выделяющееся загрязняющее вещество	Массовые выбросы г/с	Удельные выбросы г/кг(кг/т)	Примечание
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	
Посты выгрузки вагонов в склады хранилищ пневмотранспортом	Цемент	2,61	0,8	Средняя концентрация 8,2 г/м ³
	Песок	1,306	-	

Загрузка цементовозом: самотеком пневмотранспортом	Цемент	-	0,02	Средняя концентрация, г/м ³ 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, мм Менее 8
	Пыль материалов	0,833	1,0	8 и более
Пересыпка на транспортеры: порошковых материалов кусковых материалов	Пыль материалов	1,19	0,539	Средний размер, мм Менее 8
	Пыль материалов	1,43	0,65	8 и более

Кабинные укрытия ленточных конвейеров: порошковых материалов	Пыль мате- риалов	0,794	0,95	Средний раз- мер, мм Менее 8
	кусковых материалов	Пыль мате- риалов	0,3	0,35
Комбиниро- ванные укры- тия в галереях ленточных конвейеров: порошковых материалов	Пыль мате- риалов	0,925	1,1	Средний раз- мер, мм Менее 8
	кусковых материалов	Пыль мате- риалов	0,411	0,5
Дробилки шековые: изверженные	Пыль мате- риалов	14,4	3,0	Влажность материала 5%

Рубрика Сборника (окончательно выбирается редактором)

породы карбонатные породы				
	Пыль материалов	23,6	6,0	
Дробилки конусные: изверженные породы карбонатные породы	Пыль материалов	20,3	2,0	Влажность материала 5%
	Пыль материалов	38,6	5,0	
Грохоты: изверженные породы карбонатные породы	Пыль материалов	8,33	-	Влажность материала 5%
	Пыль материалов	9,72	-	
Установка сушки песка в потоке горячих газов:	Пыль материалов	1,89	1,8	Без учета выделений от сжигаемого топлива

изверженные породы 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 ³
Пневмотранспорт цемента	Пыль цемента	2,64	0,8	8,2 г/м ³
Цементные силосы	Пыль цемента	-	-	8,7-10,1 г/м ³

Для данного объекта управления на временном интервале [0; 365] суток необходимо решить задачу минимизации ущерба от атмосферных выбросов промышленного предприятия 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 поллютантов 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 был использован минимаксный критерий, применение которого полностью исключает возможность возникновения ситуации, когда ущерб от воздействия атмосферных поллютантов превысит заданную величину, определяемую из выражения (2).

Процедура решения. Результаты расчета веса поллютантов (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. 8.

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

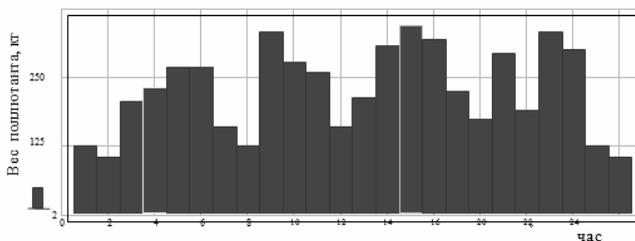


Рис. 8. Результаты расчета величины выброса атмосферных поллютантов предприятием по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ»

При проведении имитационного моделирования для упрощения расчетов было сделано допущение, что вероятность работы каждой единицы оборудования промышленного предприятия (табл.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 имитационного моделирования характеризуют наиболее неблагоприятную ситуацию с точки зрения интенсивности загрязнения окружающей среды.

Расчет распределения концентрации загрязнителей по контролируемой территории был осуществлен с использованием гауссовой модели факела, его результаты приведены на рис.9. При проведении расчета средняя скорость ветра по направлению от источника загрязнений к городу принята равной 5 м/с.

В результате проведенного вычислительного эксперимента было установлено, что в точках контроля концентрация поллютантов предприятия по производству железобетонных изделий ОАО «Завод ЖБИ» при неблагоприятном направлении ветра составляет от $0,124 \text{ мг/м}^3$ до $0,135 \text{ мг/м}^3$.

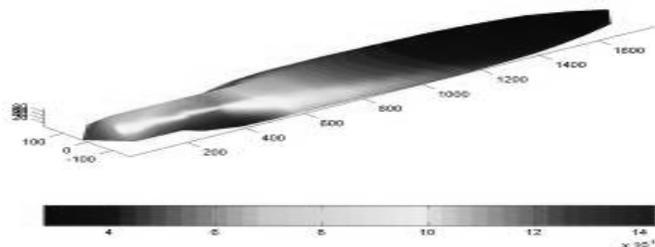


Рис. 9. Распределение концентрации поллютантов по территории, прилегающей к предприятию ОАО «Завод ЖБИ»

Процентное соотношение различных видов загрязнителей в точках контроля показано на диаграмме (рис. 10). Предельно допустимая концентрация ни по одному из загрязнителей оказалась не превышенной.

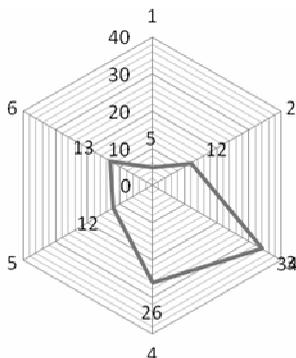


Рис. 10. Процентное соотношение различных видов загрязнителей (табл.2) в точках контроля: 1 - пыль карбонатных пород; 2 - пыль порошковых материалов; 3 - пыль цемента и песка; 4 – пыль известняка; 5 – пыль известкового доломита; 6 – прочие загрязнители

Для решения задачи оптимизации суммарного ущерба от атмосферных выбросов была построена матрица $\|e_{ij}\|$, приведенная в табл.3. Элементами матрицы решений $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ является нормированная величина ущерба, соответствующая различным вариантам принимаемых решений и внешним условиям, влияющим на величину ущерба.

Нормировка осуществляется делением каждого $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ на элемент с наименьшей в таблице величиной ущерба (e_{77}).

Для уменьшения размерности и сохранения обзримости рассматриваемого модельного примера ущерб $e_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ был определен методом экспертных оценок.

В табл. 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 загрязнителей	1,4	2,1	1,3	1,4	3,7	1,7	1,6
E_2 - уменьшение концентрации загрязнителей 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 был осуществлен по табл. 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 оптимального решения задачи было принято решение, связанное с 50% сокращением концентрации атмосферных поллютантов предприятия 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%.

В заключении необходимо отметить, что решение задачи осуществляется 1 раз в год, по его результатам планируется изменение состава и производительности работающего технологического оборудования.

7. Информационно – логическая схема решения задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ»

Процедура решения задачи для данного предприятия на временных интервалах [сутки; месяц; год] представлена на рис. 11 в виде информационно-логической схемы со следующими обозначениями: 1, 2, ..., 10 – технологическое оборудование первой, второй, ..., десятой группы; 11 – сбор информации о производственном процессе, поступающей от датчиков и устройств локальной автоматики; 12 – запись информации в базу данных и базу знаний; 13 – сбор информации о концентрации

вредных веществ в точках контроля службой экологического мониторинга; 14 – произошло превышение ПДК атмосферных загрязнителей в точках контроля?; 15 – определение величины ущерба; 16 – минимизация величины ущерба; 17 – занесение информации в журнал сменного диспетчера на электронном носителе; 18 – сообщение о рекомендуемых мерах по изменению состава и производительности работающего технологического оборудования; 19 – занесение информации в базу данных; 20 – поиск информации в базе данных по суточным значениям ущерба, причиняемого атмосферными выбросами предприятия; 21 – определение величины ущерба за месяц; 22 – сравнение со средней величиной ущерба за месяц; 23 – ущерб за текущий месяц превысил установленную величину?; 24 – анализ причин происшедшего; 25 – поиск в базе данных информации по реализованным управляющим воздействиям, направленным на снижение ущерба; 26 – экспертная оценка эффективности выполненных мероприятий по снижению ущерба; 27 – информирование руководства предприятия; 28 – занесение информации в базу данных; 29 – поиск в базе данных величины значений ущерба по месяцам; 30 – определение величины ущерба за год; 31 – ущерб за текущий год превысил плановую величину?; 32 – анализ причин невыполнения плана; 32 – поиск в базе данных информации по реализованным управляющим воздействиям, направленным на снижение ущерба; 33 – экспертная оценка эффективности мероприятий по снижению ущерба; 34 – информирование руководства предприятия; 35 – занесение информации в базу данных; 37 – вызов параметров математической модели; 38 – есть ли необходимость в коррекции параметров математической модели?; 39 – занесение в базу данных сообщения об отказе в коррекции математической модели; 40 – коррекция имитационной модели процесса формирования атмосферных загрязнителей; 41 – изменение параметров модели подъема загрязнителей; 42 – коррекция математической модели переноса атмосферных загрязнителей; 43 – коррекция модели определения ущерба от повышения заболеваемости населения по критерию; 44 – коррекция модели определения

потерь сельского хозяйства по критерию; 45 – коррекция модели определения ущерба от изменения окружающей природной среды по критерию; 46 – коррекция модели определения ущерба из-за ухудшения качества жизни по критерию; 47 – коррекция модели определения ущерба предприятия по критерию; 48 – изменение коэффициентов свертки векторной целевой функции решаемой задачи; 49 – изменение процедуры формирования скалярной целевой функции, после свертки скалярных критериев; 50 – модель адекватна?; 51 – формирования сообщения о проведенной коррекции математической модели; 52 – занесение информации в базу данных предприятия.

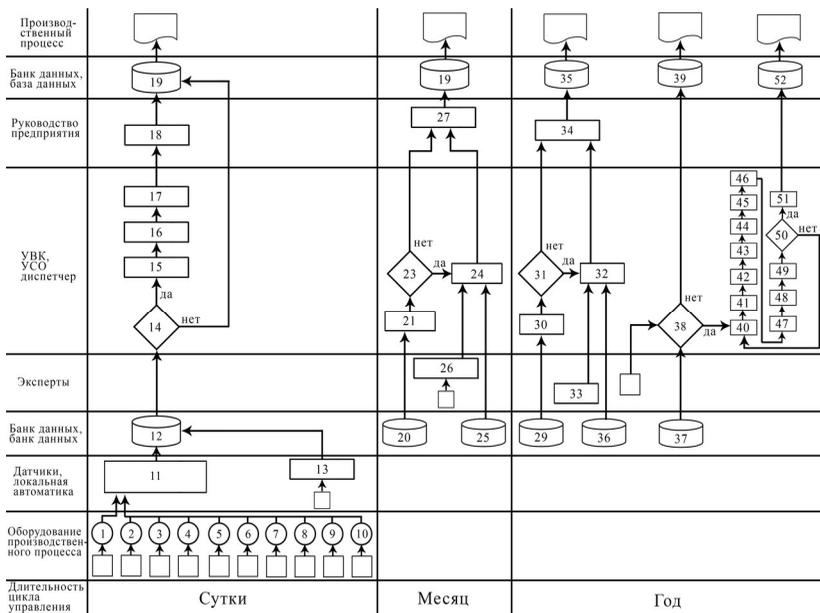


Рис. 11. Информационно – логическая схема решения задачи минимизации ущерба от атмосферных выбросов на предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ»

Из рис.11 следует, что поставленная задача на промышленном предприятии ООО «СЭПО-ЗЭМ», производственный про-

цесс которого не предусматривает получение, хранение и переработку ядовитых и потенциально опасных веществ, решается на временных интервалах 1 сутки, 1 месяц и 1 год.

На первом из этих интервалов осуществляется определение ущерба от атмосферных выбросов предприятия, приведших к превышению предельно допустимой концентрации поллютантов в точках контроля (блоки 1 - 19).

На интервале 1 месяц определяется величина ущерба за 1 месяц, производится сравнение данной величины с запланированным показателем, по результатам сравнения ЛПП выдаются рекомендации по регулированию состава и производительности работающего технологического оборудования (блоки 20 - 28).

На временном интервале не реже одного раза в 1 год 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 разработанного математического обеспечения (блоки 29 - 35), а также выполняется коррекция коэффициентов математической модели (блоки 37 - 52).

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

8. Заключение

Разработаны модели и алгоритмы для решения 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 повыше-

нием 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., РОДИЧЕВ В.А. *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.

MODELS AND ALGORITHMS OF MINIMIZATION OF HARM FROM THE ENTERPRISES' ATMOSPHERIC POLLUTION

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

Alexander Rezhikov, *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: The problem statement of minimization of harm from the enterprises' atmospheric pollution is offered. The algorithm of solution of the problem is developed. It lets increase efficiency of an enterprises' functioning due to decrease of ecological fines and harm from atmospheric pollutions.

Keywords: enterprise, pollution, algorithm of harm's minimization, information-logical schema, criterion of optimality.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...*

*Поступила в редакцию ...
Дата опубликования ...*