

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ АТМОСФЕРООХРАННЫХ КОМПЛЕКСОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л. А. Широков, А. Е. Рабинович, С. В. Суворов

В статье рассматривается задача разработки автоматизированной информационной системы формирования аппаратных комплексов защиты окружающей среды от промышленных загрязнений. Актуальность проблемы определяется разнообразием наборов средств и мероприятий для обеспечения необходимого уровня экологической безопасности, и, как следствие, широким диапазоном соответствующих инвестиционных расходов. Представлена задача формирования систем, обеспечивающих поддержку принятия оптимальных решений по созданию комплекса систем очистки, обеспечивающего высокую степень защиты населения от вредных воздействий и в то же время наименьшие объемы инвестиционных расходов.

Ключевые слова: воздушная среда, системы очистки, экономико-математическая модель, информационная модель, оптимизация.

Введение

В крупных промышленных городах весьма велика нагрузка от деятельности машиностроительных предприятий (МСП) на атмосферу. На государственном уровне данная ситуация регулируется установлением предельно-допустимых выбросов и нормативов платежей для каждого загрязняющего вещества (ЗВ). В связи с этим МСП реализует соответствующие природоохранные мероприятия, требующие значительных затрат. Основная проблема выбора атмосфероохранного оборудования состоит в том, что в настоящее время рынок подобной техники насыщен различного рода средствами газоочистки, которые в России и за рубежом постоянно совершенствуются и пополняются новыми моделями, что затрудняет реализацию

инвестиций в природоохранные мероприятия. Для оптимального формирования аппаратных комплексов охраны воздушной среды МСП необходима соответствующая экономико-математическая модель. Такая модель была создана и представлена в работе [1]. На основе этой экономико-математической модели возможна разработка автоматизированной информационной системы (АИС), которая обеспечит решение задачи оптимизации затрат на формирование аппаратных комплексов охраны воздушной среды (ВС). Разрабатываемая АИС должна поддерживать актуальную базу данных по различным видам очистного оборудования, фирмам-производителям, дилерам, ценам и другой информации.

Оптимизация экологических затрат машиностроительного предприятия

Для решения задачи оптимизации при формировании аппаратных комплексов по очистке выбросов машиностроительного предприятия в работе [1] были рассмотрены составляющие экологических затрат (ЭЗ) предприятия $S_{ЭЗ,l}$ ($l = 1, 9$). В данной работе было показано, что наибольшее влияние на формирование экологических затрат предприятия оказывают следующие составляющие: $S_{ЭЗ,1}$ – затраты на природоохранную технику и технологии, и $S_{ЭЗ,6}$ – платежи за выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.

Затраты на природоохранную технику и технологии $S_{ЭЗ,1}$ задаются соотношением [1]

$$S_{ЭЗ,1} = \alpha \cdot S_{Оф} \cdot (1 - K_{пр})^\beta, \quad (1)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент проницаемости, характеризующий эффективность очистки и определяемый как отношение объема ЗВ после очистки к объему V^0 до нее; $S_{Оф}$ – общая стоимость основных фондов производства; α и β – коэффициенты, зависящие от видов производств, которые задавались из эмпирических соображений [2]. Однако это эмпирическое решение приводит к тому, что, во-первых, данные коэффициенты фиксированы для целой отрасли, что не учитывает специфики отдельных производств, а во-вторых, совсем не берется во внимание динамика совершенствования и развития очистной аппаратуры, а также изменчивость рыночного ценообразования на эту аппаратуру.

В работе [1] предложена методика, на основе которой были выведены формулы для расчета значений коэффициентов α и β , посредством которых учитываются выше перечисленные факторы:

$$\begin{aligned} \alpha &= y_1 (1 - x_1)^{-\beta}; \\ \beta &= \frac{\ln(y_2) - \ln(y_1)}{\ln(1 - x_2) - \ln(1 - x_1)}; \\ x_i &= K_{пр}(t_i), \quad y_i = \frac{S_{ЭЗ,1}(t_i)}{S_{Оф}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где t_i – рассматриваемые точки графика зависимости затрат на очистное оборудование от выбросов после очистки, $i = 1, 2$.

Оптимальное решение задачи формирования аппаратных комплексов охраны воздушной среды предусматривает минимизацию затрат, включающих инвестиции в охрану воздушной среды и штрафные платежи за загрязнение воздушной среды $S_{ЭЗ,6}$, при соблюдении установленных норм выбросов:

$$S_{ЭЗ,6} = \sum_{i=1}^{N_{ЗВ}} S_i^{пл}(V_i), \quad i = \overline{1, N_{ЗВ}}, \quad (3)$$

где $S_i^{пл}$ – платежи за загрязнение воздушной среды i -м загрязнителем, определяемые в соответствии с действующим законодательством [3]; $N_{ЗВ}$ – количество ЗВ, разрешенных к выбросам на предприятии.

Сумма платежа $S_i^{пл}$ зависит от объема выброшенного i -го загрязнителя:

$$S_i^{пл}(V_i) = \begin{cases} V_i \cdot S_i^H, & 0 \leq V_i \leq V_i^{ПДВ}; \\ V_i^{ПДВ} \cdot S_i^H + 5 \cdot S_i^H \cdot (V_i - V_i^{ПДВ}); & V_i^{ПДВ} < V_i \leq V_i^{ВСВ}; \\ V_i^{ПДВ} \cdot S_i^H + 5 \cdot S_i^H \cdot (V_i^{ВСВ} - V_i^{ПДВ}) + & V_i^{ВСВ} < V_i, \\ + 25 \cdot S_i^H \cdot (V_i - V_i^{ВСВ}), & \end{cases} \quad (4)$$

где $V_i^{ПДВ}$ – значение предельно-допустимого выброса (ПДВ), установленного для предприятия по каждому i -му ЗВ; S_i^H – норматив выплаты за каждую тонну i -го ЗВ, выброшенную в пределах $V_i^{ПДВ}$; $V_i^{ВСВ}$ – установленный, временно согласованный выброс (ВСВ) для i -го ЗВ.

Таким образом, задача оптимизации сводится к нахождению минимума экологических затрат, то есть совокупности инвестиционных расходов (1) и штрафных платежей (4).

Функция суммарных экологических затрат предприятия имеет один минимум и является вогнутой [1]. Учитывая это обстоятельство, для нахождения точки минимума, то есть точки оптимума экологических затрат, достаточно рассмотреть ее первую производную. На основании этого была выведена формула для определения количества выбросов, обеспечивающего оптимум экологических затрат на очистку воздушной среды МСП, по каждому отдельному i -му ЗВ:

$$V_i^{opt} = V_i^0 \left(1 - \sqrt[\beta-1]{\frac{S_i^0 V_i^0}{\alpha \cdot \beta \cdot S_{Оф}}} \right), \quad i = \overline{1, N_{ЗВ}}. \quad (5)$$

Информационная система оптимального формирования атмосферноохранных комплексов

Система поддержки принятия решений по оптимальному формированию наборов средств и мероприятий по охране воздушной среды машиностроительного производства должна штатно работать в нескольких режимах, как показано на рис. 1.

Режим 1. Проектирование и модернизация – поиск оптимальных вариантов комплектации оборудования в случае модернизации самого

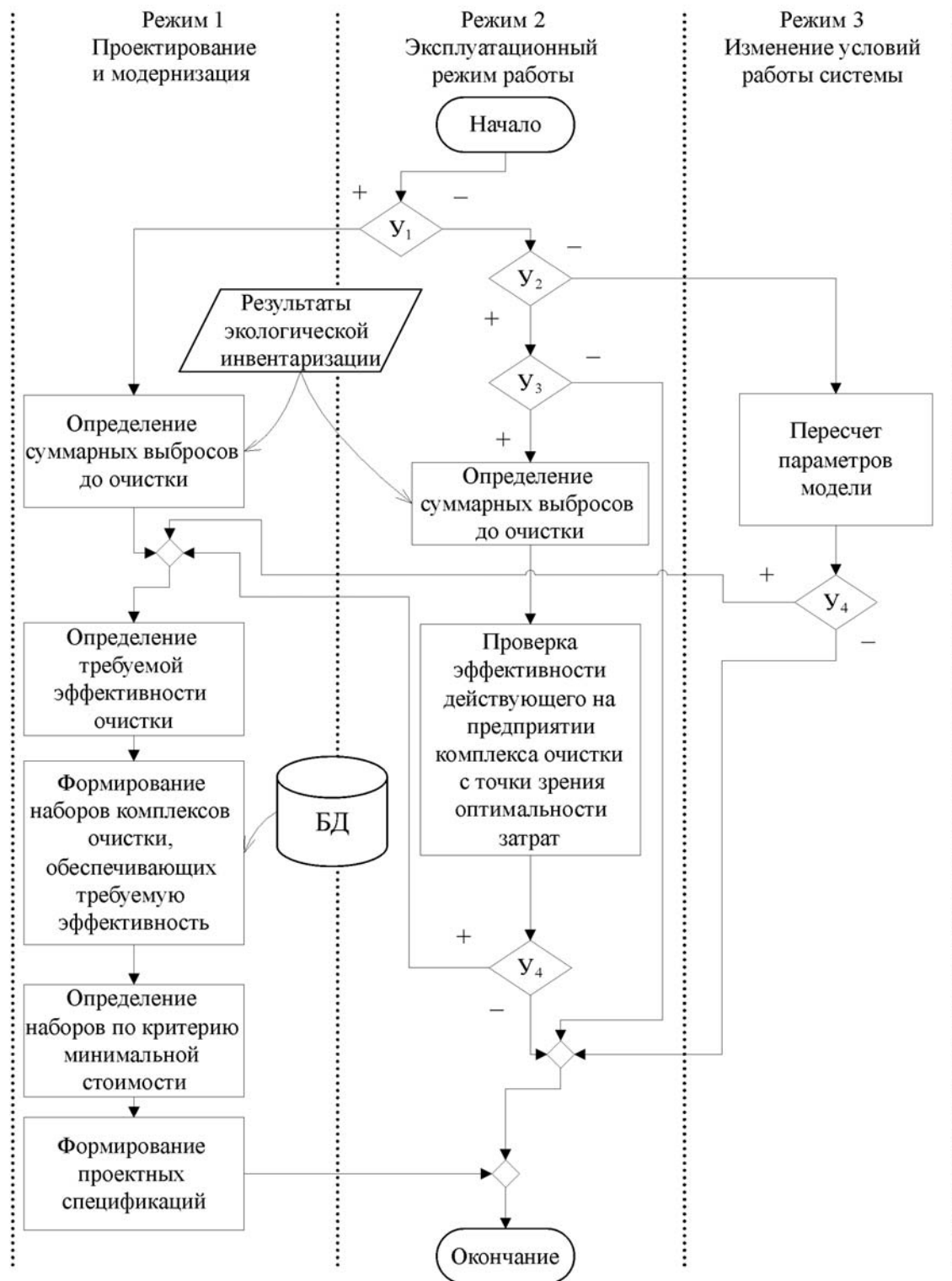


Рис. 1. Режимы работы информационной системы принятия решений по охране воздушной среды.

Y_i – условие перехода к следующей операции: Y_1 – Проектируется новый КО?

Y_2 – Произошли изменения в нормативах?

Y_3 – Необходима проверка эффективности функционирования существующего КО?

Y_4 – Необходима корректировка в комплектации КО?

оборудования или комплекса очистки (КО) в целом. Для этого используются данные по производственному и очистному оборудованию, размещенные в созданной базе данных (БД).

Режим 2. Эксплуатационный режим – проверка эффективности действующей на предприятии системы охраны ВС с точки зрения экологических затрат. Данный режим работы системы используется тогда, когда не произошло каких-либо явных изменений в условиях работы предприятия или законодательстве. В этом случае может выполняться проверка того, насколько эффективно функционирует существующая система очистки выбросов на предприятии. В случае необходимости может быть произведена соответствующая корректировка в комплектации систем очистки.

Режим 3. Изменение нормативов и платежей. В этом режиме рассматриваются другие ограничения в математической модели оптимизации, в соответствии с которыми необходима перенастройка действующей системы очистки.

Во всех режимах работа системы основана на поиске оптимального решения по формированию КО для охраны воздушной среды.

Информационно-логическое моделирование задачи охраны воздушной среды

Первостепенным вопросом реализации АИС является разработка базы данных (БД). Она позволит формировать запросы на поиск необходимых данных по заданным критериям, например с использованием структурированного языка запросов *SQL (Structured Query Language)*. Также БД обеспечит применение алгоритмов оптимального аппаратного синтеза комплексов атмосфероохранной аппаратуры.

Для задачи аппаратной комплектации систем газоочистки машиностроительного производства информацию о рассматриваемой предметной области представляет инфологическая модель (ИЛМ) (рис. 2).

Проектируемая база данных по пылегазоочистному оборудованию должна обеспечивать быстрый и удобный просмотр и анализ моделей различных узлов комплексов очистки и их характеристик с целью оптимального аппаратного синтеза систем очистки, а также комплектации атмосфероохранного парка машиностроительных предприятий.



Рис. 2. Структура инфологической модели охраны воздушной среды

Для инфологического моделирования системы необходимо:

- выделить сущности предметной области (объекты, о которых в системе будет накапливаться информация) системы автоматизации в соответствии с типами комплектующих изделий;

- сформировать структурную схему и описать атрибуты для таблиц реляционной БД выбранных сущностей;

- с позиций разработчиков отдельных узлов необходимо создать соответствующие модели локальных представлений (отражающие представление отдельной группы пользователей или отдельной функциональной задачи) со спецификацией атрибутов их сущностей для аппаратной комплектации;

- агрегировать модели локальных представлений информационной системы для синтеза концептуальной инфологической модели всей АИС рассматриваемой системы очистки.

Главная проблема при проектировании АИС очистки ВС – это хранение данных с обеспечением связей между этими данными. Для этого с помощью специальных запросов пользователей можно формировать требуемые совокупности данных. С этой целью необходимо применение технологии разработки БД предметных областей на основе *ER*-моделей, или моделей типа «сущность – связь» (*Entity-Relationship*). *ER*-моделью называется модель, представляющая сущности предметной области (*E*), их атрибуты (*A*) и связи (*R*) [3]:

$$ER = \{E, R, A\}. \quad (6)$$

Таким образом, для БД может быть сформирован набор типов сущностей E_i , ($i = 1, N_e$), где N_e – количество сущностей в базе данных.

На основе инфологического моделирования далее реализуется датологическое моделирование, предусматривающее выполнение следующих этапов:

1. Составление и анализ на основе концептуальной ИЛМ диаграмм функциональной зависимости, выделение ключевых полей и назначение первичных ключей.

2. Нормализация БД.

3. Представление структурной схемы БД с ключами *Parent Key* и *Foreign Key*, характеризующими связи основной и подчиненной и/или справочных таблиц.

4. Представление типов данных на основе нормализованных таблиц БД для выбранной системы управления базами данных.

Оптимальное формирование аппаратного комплекса очистки на основе *ER*-модели

Рассмотрим пример комплексирования системы очистки ВС на МСП (рис. 3).

В схеме, приведенной на рис. 3, показан источник выделения (ИВ) загрязняющих веществ $\mathcal{E}^{ив}$, представляющий собой одну единицу или группу единиц производственного оборудования (ПрОб), а также комплекс очистки (КО). На выходе ИВ образуется вектор выбросов $\vec{V}^0 = (V_1^0, V_2^0 \dots V_{N_{зв}}^0)^T$ по $N_{зв}$ наименованиям загрязняющих веществ до очистки. Комплекс очистки состоит из следующих элементов: $\mathcal{E}_1^{ко}$ – захватное устройство (ЗУ, местный отсос); $\mathcal{E}_2^{ко}$ – газоход для загрязненного воздуха (Газоход1); $\mathcal{E}_3^{ко}$ – очистное оборудование (ОчОб); $\mathcal{E}_4^{ко}$ – газоход для очищенного воздуха (Газоход2); $\mathcal{E}_5^{ко}$ – вентиляторная система; $\mathcal{E}_6^{ко}$ – труба для рассеивания (выпуск пылегазовоздушной смеси). На выходе КО образуется вектор $\vec{V} = (V_1, V_2 \dots V_{N_{зв}})^T$ выбросов по $N_{зв}$ наименованиям ЗВ после очистки.

ER-модель, созданная в стандарте *IDEFIX* и соответствующая структурной схеме (см. рис. 3), приведена на рис. 4.

На *ER*-диаграмме, отражающей статическую структуру системы, показаны связи типа «один-ко-многим» (закрашенный круг связи относится к дочерней сущности). Так, например,

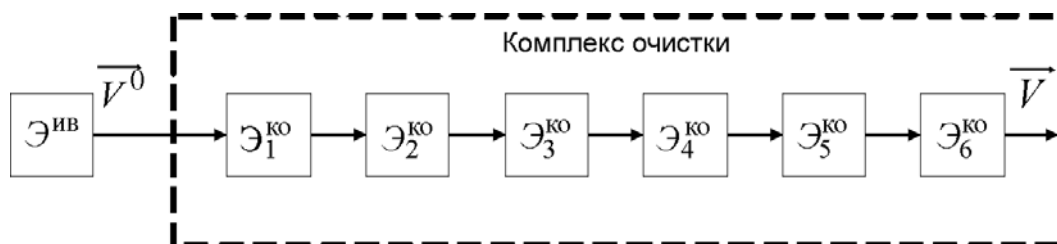


Рис. 3. Структурная схема очистки ВС в технологической линии

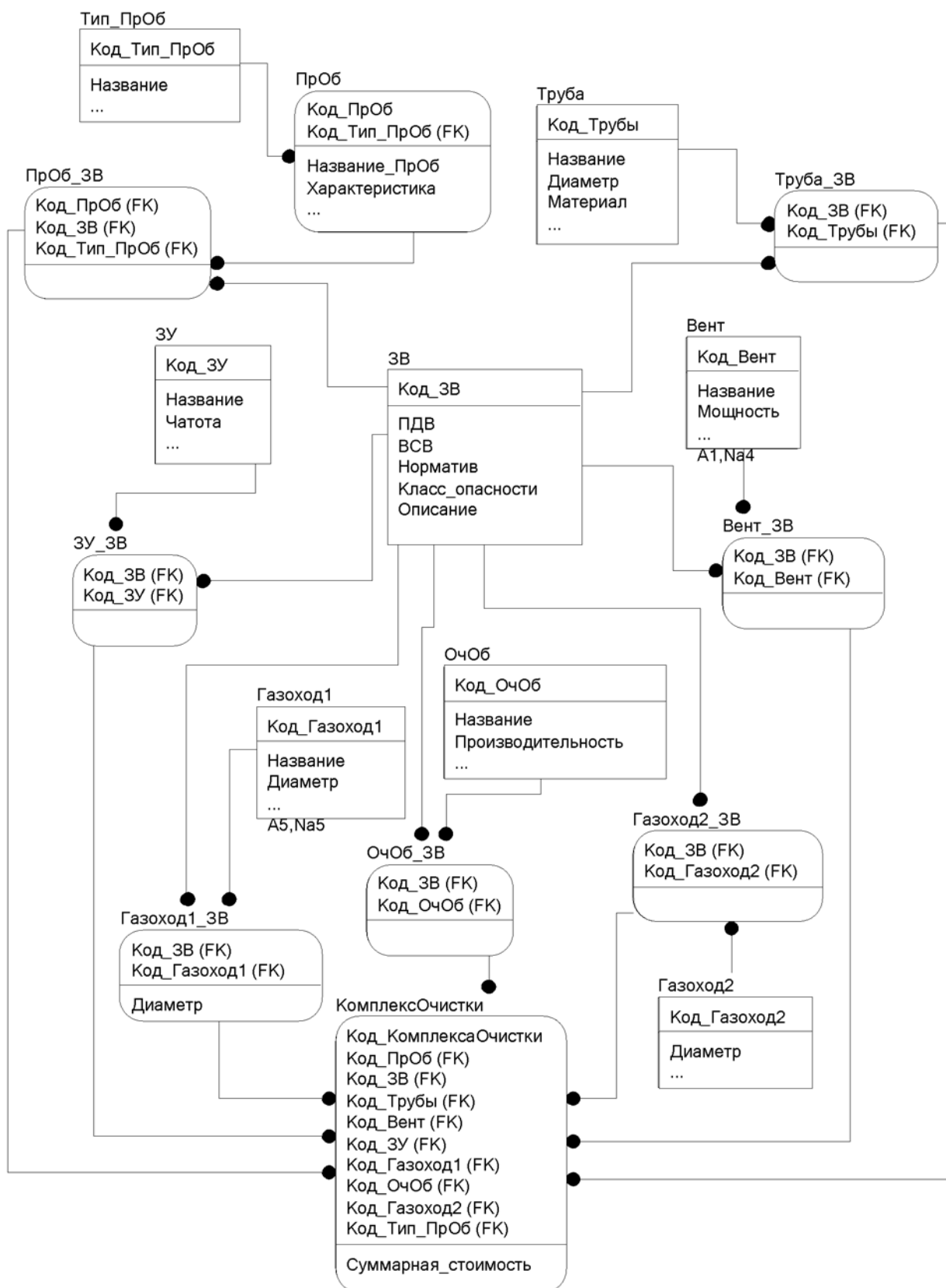


Рис. 4. ER-модель формирования аппаратных комплексов охраны воздушной среды машиностроительного предприятия

рассмотрим отношение между сущностями «Тип_ПрОб» и «ПрОб». К одному типу производственного оборудования (родительская таблица) может относиться несколько единиц ПрОб (дочерняя таблица), но одна конкретная единица ПрОб относится только к одному типу.

При информационном моделировании возникает также специфическое отношение «много-ко-многим», когда одна запись первой сущности может соответствовать нескольким записям другой сущности и наоборот. Например, одно ПрОб может выделять несколько ЗВ. В свою очередь, одно ЗВ может выделяться несколькими ПрОб. Подобная ситуация разрешается за счет введения дополнительной таблицы сопряжения. В данной таблице одна запись соответствует строго одному ПрОб и строго одному ЗВ. Аналогичные таблицы сопряжения введены для других сущностей схемы. Ключ таблицы сопряжения состоит из ключевых полей связываемых таблиц, с каждой из которых она связана отношением «один-ко-многим».

Коды представляют собой ключевые атрибуты (первичный ключ – *Primary Key*), по которым происходит идентификация записи таблицы. Ключевые атрибуты располагаются в верхней части таблицы над горизонтальной чертой. Также при установлении отношения «один-ко-многим» в дочерней таблице появляется дополнительный атрибут с пометкой *FK* (*Foreign Key* – внешний ключ), автоматически скопированный при установлении связи из ключевой области родительской таблицы.

Центральной сущностью на рис. 4 является сущность «КомплексОчистки», находящаяся в отношении «много-к-одному» со всеми таблицами сопряжения. Таким образом, каждая запись данной сущности содержит информацию об одной конкретной реализации комплекса очистки.

Для схемы очистки воздуха в рассматриваемом примере выполним комплексирование оборудования воздухоочистки в соответствии с алгоритмом оптимизации, реализованном в АИС.

В качестве критерия оптимизации примем критерий минимума стоимости S^{ko} аппаратных средств разрабатываемой системы при условии обеспечения заданных нормативных ограничений и технических характеристик системы очистки:

$$I = \min S^{ko}(\Theta^{ko}) \text{ при } TH = TH^0, \quad \Theta^{ko} \subseteq \mathcal{D}, \quad (7)$$

где $\Theta^{ko} = (\Theta_1^{ko}, \Theta_2^{ko} \dots \Theta_{N_s}^{ko})^T$ – вектор элементов комплекса очистки; $TH = (TH_1, TH_2 \dots TH_{N_{th}})^T$ – вектор требуемых технических характеристик проектируемой системы очистки; $TH^0 = (TH_1^0, TH_2^0 \dots TH_{N_{th}}^0)^T$ – вектор начальных технических характеристик проектируемой системы очистки; N – количество элементов в комплексе; N_{th} – количество технических характеристик.

Совокупная стоимость аппаратных средств комплекса очистки определяется соотношением

$$S^{ko} = \sum_{i=1}^{N_s} N_{s_i} S_i^s, \quad (8)$$

где S_i^s – стоимость i -го КИ, включенного в систему очистки; N_{s_i} – количество элементов i -го вида; ($i = 1, N_s$).

Процедура оптимизации должна выполняться итеративно. Эта задача может быть рассмотрена как задача математического программирования, где в качестве критерия оптимизации выступает минимизация экологических затрат предприятия [1]. Для решения этой задачи используется метод Фора и Мальгранжа [5]. В соответствии с ним среди отобранных информационной системой записей находится начальный план, а далее итеративно определяется наилучший вариант комплекса.

При оптимизации должна быть сформирована совокупность запросов к БД для выбора требуемых подмножеств $D\mathcal{E}_i$ ($i = 1, N_s$) различных видов КИ по требованиям, заданным в виде нормативных ограничений. На основе реляционных таблиц, представленных на рис. 4, можно сформировать подмножества записей по заданным диапазонам технических характеристик КИ системы очистки. Решение обеспечивают запросы к АИС на языке *SQL*, в которых указывается, по каким таблицам формируется запрос, какие атрибуты таблиц для этого используются, по каким условиям производится отбор данных.

На последующих шагах на базе выделенных подмножеств $D\mathcal{E}_i$ последовательно формируются совместимые по техническим характеристикам структуры КИ из комплекса очистки, и для каждой из них выполняется подсчет суммарной стоимости полной структуры комплекса очистки в соответствии с выражением (7). Далее по алгоритму (8) определяется искомая оптимальная структурная реализация системы очистки.

Реализация методики оптимального формирования атмосфероохранных комплексов машиностроительного производства

В результате анализа различных вариантов структур очистной системы получена комплектация, приведенная в таблице. В колонках 3 и 4 таблицы приведены результаты при выборе моделей устройств посредством АИС. При традиционном выборе оператором результаты представлены в колонках 5 и 6. В нижней части таблицы показаны суммарные стоимости аппаратных средств для указанных вариантов комплектации. Так, применение АИС позволяет сформировать очистную систему стоимостью около 197 673 рублей. В результате традиционного формирования системы очистки стоимость комплекса оборудования составила 298 458 рублей. Следовательно, применение АИС позволило в рассматриваемом примере сэкономить более 100 000 рублей. Учитывая, что на каждом производственном участке устанавливаются десятки аналогичных систем очистки, соответствующий экономический эффект от применения АИС многократно возрастает.

Заключение

В статье на основе ранее разработанной экономико-математической модели для формирования аппаратных комплексов охраны воздушной среды рассмотрена реализованная автоматизированная информационная система. Ее особенностью является то, что она представляет собой оболочку для любой комплектации систем очистки. При рассмотрении конкретных схем очистки база данных АИС пополняется из Internet соответствующими записями, которые могут автоматически обновляться. Приведенный пример показал, что АИС дает существенный эффект как при снижении трудоемкости формирования аппаратных комплексов очистки воздушной среды, так и по сокращению инвестиционных расходов при создании комплекса систем очистки. Снижение трудоемкости достигается за счет привлечения современных вычислительных средств и инструментария, описанного выше, взамен ручного поиска необходимой информации и расчета требуемых значений.

Таблица

Сравнительная характеристика вариантов комплектации систем очистки

Наименование элемента	Характеристика	Система очистки			
		с оптимизацией		без оптимизации	
		марка	цена, руб.	марка	цена, руб.
1	2	3	4	5	6
Захватное устройство	Частота вращения 1500 об/мин	Тягодутьевая машина ВДН-12,5	55 800	Тягодутьевая машина ВДН-8,5	118 000
Газоход для загрязненного воздуха	Диаметр 355 мм	Воздуховод круглый прямошовный	4 500	Воздуховод круглый спиралевидный	4 800
Очистное оборудование	Производительность 4500 м³/ч	Циклон ЛИОТ 3	54 756	ЦИКЛОН ЦН-11-800х1УП	89 804
Вентилятор	Мощность 5,5 кВт	ВЦЭП-3,3	32 600	ВРП100-45	17 420
Электродвигатель	Мощность 5,5 кВт	АД 200 L4	46 617	АИР 250 S6	64 634
Газоход для очищенного воздуха	Диаметр 355 мм	Воздуховод круглый прямошовный	3 400	Воздуховод круглый спиралевидный	3 800
Совокупная стоимость		197 673		298 458	

Список литературы

1. Широков Л.А., Рабинович А.Е., Суворов С.В. Экономико-математическая модель для формирования аппаратных комплексов охраны воздушной среды машиностроительного производств // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 2. С. 41–49.
2. Акимова Т.А., Хаскин В.В. Экология: Человек – Экономика – Биота – Среда. – М.: Юнити, 2001. – 566 с.
3. Постановление Правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344 «О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов производства и потребления» (с изменениями от 1 июля 2005 г., 8 января 2009 г.) // Российская газета от 21.06.2003.
4. Широков Л.А. Базы данных и знаний: учеб. пособ. Ч. 1. – М.: МГИУ, 2001. – 86 с.
5. Чепурных Н.В., Новоселов А.Л. Экономика и экология: развитие, катастрофы. – М.: Наука, 1996. – 271 с.

Материал поступил в редакцию 07.07.2010

ШИРОКОВ Лев Алексеевич

E-mail: eduarlev@gmail.com
Тел. +7 (495) 675-66-69

Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры информационных технологий и систем в экономике и управлении МГИУ. Академик Международной академии информатизации, член-корр. Российской академии естественных наук, изобретатель СССР. Сфера научных интересов: оптимальное управление, САПР, информационные технологии. Автор более 130 научных статей, включая изобретения и монографии, более 20 учебных пособий, включая два учебника.

СУВОРОВ Станислав Вадимович

E-mail: ssw11@mail.msiu.ru
Тел. +7 (495) 675-66-69

Кандидат технических наук, доцент. Заведующий кафедрой информационных технологий и систем в экономике и управлении МГИУ. Сфера научных интересов: моделирование динамических процессов, информационные технологии. Автор более 20 научных статей, монографии, трех учебников и двух учебных пособий.

РАБИНОВИЧ Александр Евгеньевич

E-mail: rae11@yandex.ru
Тел. +7 (495) 675-66-69

Старший преподаватель кафедры информационных технологий и систем в экономике и управлении МГИУ. Сфера научных интересов: информационные технологии. Автор 9 научных и 8 учебно-методических работ.