УДК 519.95+330.15+661.56

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИРОДО-ПРОМЫШЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

© А.П. Зубаков

Ключевые слова: математическое моделирование; производство азотной кислоты; природо-промышленные системы.

В работе рассматривается подход к оптимальному управлению природо-промышленными системами, базирующийся на использовании методов математического моделирования. В качестве примера рассмотрено использование данного подхода к производству азотной кислоты.

В рамках математического моделирования была сформулирована идея о необходимости управления природо-промышленными системами (ППС) [1, 2].

К данным системам могут быть отнесены все объекты химической, нефтехимической и других отраслей народного хозяйства и природная среда, находящиеся в непрерывном взаимодействии в процессе переработки материально-энергетических ресурсов и отходов.

В качестве примера управления такой ППС было выбрано производство неконцентрированной азотной кислоты – агрегат каталитической очистки нитрозных газов – воздушный бассейн.

Для оптимального управления рассматриваемой ППС, обеспечивающей минимизацию производственных затрат на очистку выбрасываемых нитрозных газов при соблюдении экологических ограничений, обусловленных необходимостью обеспечения чистоты окружающей среды, требовалось решение следующих задач:

 формализация постановки задачи оптимального управления ППС;

 построение кинетических моделей реакций очистки;

 – разработка математической модели процесса каталитической очистки нитрозных газов, пригодной для целей управления ППС;

 создание алгоритмов и методов расчета приземных уровней концентраций газовых примесей, образованных промышленными выбросами;

 обеспечение совместимости моделей промышленной и экологической подсистем с учетом вероятностных факторов и ограничений, действующих на технологические и «экологические» переменные;

 создание алгоритма и решение задачи оптимального управления процессом очистки при переменной экологической обстановке.

Технологическая часть ППС представлена на рис. 1 как схема процесса производства неконцентрированной азотной кислоты. Смесь аммиака и очищенного воздуха поступает в реактор 1, где на платиновых сетках образуется окись азота. Тепло каталитической реакции используется в котле-утилизаторе 2. Далее нитрозные газы подаются в окислитель 3, где окисляются до двуокиси азота, охлаждаются в подогревателях воздуха 4, хвостовых газов 5, холодильнике-конденсаторе 6, где происходит конденсация водяных паров, образование неконцентированной азотной кислоты. Затем нитрозные газы поступают в колонну абсорбции 7, где происходит поглощение двуокиси азота паровым конденсатом с образованием продукционной кислоты, которая направляется в продувочную колонну 8 для отдувки окислов азота воздухом. Образующиеся здесь неочищенные хвостовые газы (НХГ) поступают на абсорбцию в подогреватель 5 и далее на установку каталитической очистки, являющейся объектом, определяющим количество окислов азота и углерода, выбрасываемых в окружающую среду.

Рассмотрим более подробно процесс очистки.

На рис. 2 изображена упрощенная схема камеры сгорания и реактора каталитической очистки. Поток природного газа (ПГ), подаваемый на основную горелку камеры сжигания, сгорает в потоке воздуха (Зона П).



Рис. 1. Схема процесса производства азотной кислоты



Рис. 2. Схема установки каталитической очистки

Продукты сгорания смешиваются с выхлопными газами (Зона IV) и природным газом на восстановление. В результате смесь разогревается до температуры зажигания катализатора. На катализаторе АПК-2 происходит реакция восстановления окислов азота (Зона VI). За счет тепловыделения смесь разогревается и поступает на второй слой катализатора (Зона VШ), где происходит реакция окисления СО до СО2. Очищенные хвостовые газы направляются в газотурбинную установку (ГТУ) 11 (рис. 1), в которой используется энергия расширения и охлаждения газов для выработки воздуха высокого давления в компрессоре 12 и нагнетателе 13. Избыток энергии преобразуется в двигателе-генераторе 14 в электроэнергию и выдается в сеть. Остаток энергии ОХГ используется в котле-утилизаторе 15 для выработки пара. Затем ОХГ через выхлопную трубу выбрасываются в атмосферу.

Особенностями технологии производства кислоты являются факты изменения нагрузки на процесс очистки по неочищенным хвостовым газам (НХГ), связанные с режимом отдувки в продувочной колонне; изменение активности катализатора (АПК-2) из-за его обратимой дезактивации сернистыми соединениями, присутствующими в природном газе. Управление процессом очистки НХГ также имеет особенности. В частности, увеличение расхода природного газа (ПГ) в реактор каталитической очистки приводит к образованию восстановительной среды, полной очистке от окислов азота. Однако при этом наблюдается повышенный выброс окиси углерода, проскок не прореагировавшего ПГ, что ведет к загрязнению атмосферы, прямым потерям. Высокие температура и давление, агрессивная среда в установке очистки затрудняют наблюдаемость процесса.

В связи с рассмотренными особенностями представляется целесообразной следующая постановка задачи оптимального управления:

$$I^{*}(\overrightarrow{\mathcal{U}}, \overrightarrow{\mathcal{Q}}, \overrightarrow{\mathcal{C}}, \overrightarrow{Y}) \to \min_{\overrightarrow{\mathcal{Q}}} I(\overrightarrow{\mathcal{U}}, \overrightarrow{\mathcal{Q}}, \overrightarrow{\mathcal{C}}, \overrightarrow{Y}), \tag{1}$$

$$Q^{HX\Gamma} = Q^{HX\Gamma}_{aa\partial}, \qquad (2)$$

$$Y = \Psi(\vec{Q}, \vec{C}, \vec{T}), \tag{3}$$

$$\widehat{C}(x_{\lambda}, y_{\lambda}) = f(\widehat{Y}, \widehat{Q}, \widehat{T}, \widehat{H}, \widehat{\xi}), \tag{4}$$

$$C_{\Sigma}(x_{\lambda}, y_{\lambda}) \le C_{\Sigma}^{IIIJK}, \lambda = 1, N,$$
(6)

Здесь I – критерий оптимальности, включающий затраты на очистку НХГ и экологический ущерб, нанесенный природе выбросами данного производства, рассчитанный по методике Госстроя. Уравнение (2) является условием обеспечения очистки для заданного расхода НХГ. Выражение (3) представляет математическую модель процесса каталитической очистки. Соотношение (4) есть модель процесса распространения газовых примесей в атмосфере, позволяющая рассчитать $\overrightarrow{C}_{\Sigma}(x_{\lambda}, y_{\lambda})$ – значение приведенной концентрации примеси в узлах сетки на заданной области $\omega(x_{\lambda}, y_{\lambda}) \in \Omega$. Выражения (5) являются необходимыми ограничениями на управление технологическим объектом. Условие (6) выражает требование непревышения приведенной концентрации загрязняющих примесей значения предельно-допустимой концентрации (ПДК), \vec{T} – вектор температур, $\vec{\mu}$ – вектор цен, \vec{H} – вектор эффективных высот подъема факела выбрасываемых примесей, $\vec{\xi}$ – вектор измеряемых экологических факторов, \vec{Y} – вектор выходных переменных технологического объекта.

Таким образом, из постановки задачи оптимального управления видно, что для ее решения необходимы модели как экологической, так и технологической частей ППС: процесс каталитической очистки НХГ – воздушный бассейн.

Анализ совокупности возможных реакций очистки путем определения ранга матрицы стехиометрических коэффициентов реакций позволил описать процесс очистки минимальным количеством реакций по следующей схеме:

30Ha II

$$CH_4 + 0.5 O_2 = CO + 2H_2; CO + 0.5 O_2 = CO_2;$$

 $H_2 + 0.5 O_2 = H_2O;$

Зона IV $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$; $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$; $2NO + 2H_2 = N_2 + 2H_2O$; $2CO + 2NO = 2CO_2 + N_2$; $2CO + O_2 = 2CO_2 + 0.5N_2$;

Зона VIII 2CO + O₂ = 2CO₂; 2CO+2NO = 2CO₂ + N₂; 2CO+NO₂ = 2CO₂ + 0,5N₂;

В [3] подробно рассматривался кинетический механизм каждой брутто-реакции схемы. На основании концепций «квазистационарных» концентраций промежуточных продуктов реакций были получены уравнения для скоростей реакций. Константы рассматриваемых реакций были найдены из литературных источников, подробная библиография которых приведена в [4].

При этом значения некоторых констант уточнялись путем минимизации выражения:

$$R = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_1 (C_i - C_i^{\circ})^2 + \alpha_2 (T_i - T_i^{\circ})^2), \qquad (7)$$

где α_1, α_2 – весовые коэффициенты; $C_i^{\mathfrak{I}}, T_i^{\mathfrak{I}}$ – экспериментальные значения концентрации и температуры.

Исследование «гидродинамической» структуры технологического объекта методом трассерного эксперимента позволило осуществить выбор структуры математических моделей установки каталитической очистки. Были разработаны математические модели камеры сгорания и реактора каталитической очистки. Также разработана имитационная система прогноза распространения примесей (ИСПРП) для расчета уровней приземных концентраций загрязняющих веществ в исследуемой области.

В различных зонах действующей установки каталитической очистки (рис. 2) был произведен трассерный эксперимент (использовался инертный газ Не) с целью получения для них экспериментальных кривых распределения времени пребывания (РВП) частиц газа. Полученные кривые РВП позволили сделать вывод о том, что зоны I, II, III камеры сгорания, зоны V, VII, IX реактора могут быть описаны моделью идеального вытеснения. Слой насыпного гранулированного катализатора хорошо (рис. 3) описывается моделью диффузионного типа. Зона IV конструктивно исполнена, как зона смешения. При построении моделей пренебрегали тепловыми потерями; газы, составляющие смесь, рассматривались как идеальные.

Ниже приведена математическая модель камеры сгорания по зонам (рис. 2):

Зона I

$$C_i(z) = C_{i0} = const, i = 1,3;$$
 (8)

$$T(z) = T_0 = const, l_1 \le z \le l_1 + l_2;$$
(9)

$$V_2 \frac{dC_i}{dz} + (-r)_i = 0; l_1 + l_2 \le z \le l_1 + l_2 + l_3;$$
(10)

$$-V_2 \frac{dT_2}{dz} - \frac{\alpha \cdot 4(T_2 - T_3)}{D_2 \rho_{II} C p_{II}} - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta H_i r_i}{\mu_i \rho_{II} C p_{II}} = 0; \quad (11)$$

Зона III

$$-V_3 \frac{dT_3}{dz} + \frac{\alpha \cdot 4(T_2 - T_3)}{D_2 \rho_{III} C \rho_{III}} = 0;$$
(12)

$$l_1 + l_2 + l_3 \le z \le l_1 + l_2 + l_3 + l_4;$$

$$C_i(z) = C_{i0} = const, i = \overline{1,3};$$
(13)

здесь C_i – концентрация компонентов газовой смеси; T – температура; V – скорость потока газа: D – диаметр; ρ – плотность; Cp – теплоемкость; α – коэффициент теплопередачи; ΔH – энтальпия реакции; μ – молекулярный вес; l – длина; z – текущая длина.

Система уравнений (10) – (11) интегрировалась методом Рунге – Кутта с автоматическим выбором шага. Результаты расчетов, приведенные на рис. 4, показывают хорошее согласование с экспериментальными данными.

При разработке математической модели реактора были приняты следующие допущения:

– тепловые потери незначительны, т. к. реактор конструктивно выполнен как адиабатический;

 каталитические реакции происходят только на поверхности катализатора;

 – экспериментально наблюдаемые радиальные профили температур в реакторе выровнены, что позволяет при моделировании воспользоваться одномерной диффузионной моделью.

На основании принятых допущений была разработана математическая модель реактора каталитической очистки, учитывающая изменение концентраций и температур в газовой фазе и поверхности катализатора.

Зона V

$$\frac{dC_{if}}{dz} = 0; C_{if_0} = C_{if}(0); \tag{14}$$

$$\frac{dT_f}{dz} = 0; T_{f_0} = T_f(0); \tag{15}$$



Рис. 3. Кривая РВП трассера в слое катализатора



Рис. 4. Распределение концентраций (1 – CH₄, 2 – O₂, 3 – CO, 4 – H₂, 5 – H₂O, 6 – CO₂) и температур T_2 (Зона II), T_3 (Зона III) вдоль оси камеры сгорания

Зона VI

$$D_{z} \frac{d^{2}C_{if}}{dz^{2}} - V_{VI} \frac{dC_{if}}{dz} - \frac{F_{k}}{\varepsilon} \beta_{k} (C_{if} - C_{ik}) = 0, \qquad (16)$$

$$i = \overline{13}.$$

$$\frac{\lambda_f}{(\rho_{VI}Cp_{VI})_f} \frac{d^2T_f}{dz^2} - V_{VI}\frac{dT_f}{dz} -$$
(17)

$$-\frac{F_k \cdot \alpha_k}{\varepsilon \cdot (\rho_{VI} C p_{VI})_f} (T_k - T_f) = 0;$$

$$\beta_k \frac{F_k}{\varepsilon} (C_{if} - C_{ik}) + \varphi \cdot r(C_{ik}, T_k) = 0, i = \overline{1,5}; \qquad (18)$$

$$\frac{\kappa_f}{(\rho_{VI}Cp_{VI})_f} \frac{d^2 I_k}{dz^2} - \frac{F_k \cdot \alpha_k}{(1-\varepsilon) \cdot (\rho_{VI}Cp_{VI})_k} (T_k - T_f) - \sum_{i=1}^n (-\Delta H_{r_i}) \cdot \varphi \cdot r(C_{ik}, T_k) = 0;$$
(19)

$$\varphi = f(C_s, T); \tag{20}$$

1029

$$-D_{z}\frac{dC_{if}}{dz} = -V_{VI}(C_{i0} - C_{if}(0)) = 0;$$
(21)

$$-\lambda_f \frac{dI_f}{dz} =$$
(22)

$$= -V_{VI}(\rho_{VI}Cp_{VI})_f(T_0 - T_f(0)) = 0; |z = 0$$

dT.

$$-\lambda_k \frac{dx_k}{dz} = 0; \tag{23}$$

$$-D_z \frac{dC_{if}}{dz} = -\lambda_f \frac{dT_f}{dz} = 0; |z = l_{VI};$$
(24)

Здесь D_z – эффективный коэффициент диффузии; λ – эффективный коэффициент теплопроводности; β – коэффициент массопередачи; ε – доля свободного объема катализатора; φ – функция влияния каталитического яда; f – индекс, показывающий принадлежность к газовой фазе; k – индекс, показывающий принадлежность к фазе катализатора.

Математическое описание VII, IX зон (рис. 2), представленное моделью идеального вытеснения, подобно описанию V зоны реактора. Структура модели для зоны VIII реактора, описываемой одномерной диффузионной моделью, аналогична модели зоны VI.

Решение уравнений (16) – (17) осуществлялось численно-аналитическим методом с «замороженными» правыми частями. Система уравнений (18) решалась методом Ньютона – Рафсона. Уравнение (19) было преобразовано к задаче Коши с последующим интегрированием методом Рунге – Кутта.

На рис. 5 приведены характерные профили температур и концентраций компонентов газовой смеси вдоль оси реактора. Максимальная относительная погрешность расчетов по модели в сравнении с данными экспериментов не превышает 6,4 % для реального диапазона изменения режимных параметров процесса, что позволяет использовать ее для целей управления.



Рис. 5. Распределение концентраций C_i : $(1 - CH_40,1; 2 - O_20,2; 3 - NO'0,1; 4 - NO_20,1; 5 - CO'0,1; 6 - CO'20,25; 7 - H_20,1; 8 - N_2'10; 9 - H_20)$ и температур ($T_{f_5}T_{\kappa}$) вдоль оси реактора

Согласно постановке задачи оптимального управления ППС, необходима разработка модели процессов рассеивания примесей в атмосфере. При моделировании данных процессов наибольшее распространение получили модели «факельного» типа, однако каждая из них обладает ограниченным диапазоном применения. Поэтому был осуществлен синтез моделей, позволяющий объединить известные в отечественной и зарубежной практике модели «факельного» типа в единую имитационную систему прогноза распространения примесей в атмосфере (ИСПРП). Данная система реализует принцип маршрутизации, позволяющий формировать в зависимости от конкретных погодных условий из комбинации отдельно транслируемых программных модулей законченную программу расчета приземных уровней концентраций примесей.

В условиях неполной информации о классе стабильности атмосферы прогноз загрязнения воздуха с гарантированной точностью *v* может быть определен из решения задачи:

здесь $S\mu = [P(\mu_1), P(\mu_2),...]$ – смешанная стратегия выбора модели из имеющейся в ИСПРП совокупности; $Sp = [q(r_1), q(r_2),..., q(r_n)]$ – дискретные стратегии смены классов стабильности атмосферы;

$$K(S\mu, Sr) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} \mathbb{E}_{ij}^{*} p(\mu_{i}), q(r_{j}),$$
(26)

где $K(S\mu, Sr)$ – средняя эффективность прогноза; E_{ij} – значение оценки точности прогноза по модели μ_i – при условии ее применения в классе r_j . Оценка прогноза \hat{C} , найденная с гарантированной точностью v в условиях неопределенности смены класса стабильности атмосферы:

$$\hat{C} = \int_{0}^{\infty} Cf \, S\mu^{*}(C) dC / \int_{0}^{\infty} f \, S\mu^{*}(C) dC, \qquad (27)$$

здесь $fS\mu^*(C)$ – неоднородная плотность вероятности, полученная в результате выбора оптимальной стратегии $S\mu^*$. Данный подход особенно уместен в переходное время суток, при штилевых и аномальных условиях распространения примесей. При нормальных условиях предлагается осуществлять прогноз согласно соотношению:

$$S\mu^* = \sum_{i=1}^n p_j E_{ij} \to \max,$$
(28)

где p_j – значения дискретной вероятности установления определенного класса стабильности. Относительные частоты возникновения классов стабильности атмосферы в течение суток для различных времен года были использованы для оценки p_i .

Для выбора оптимальных управляющих параметров процесса очистки с учетом экологических ограничений был выбран критерий оптимальности, как сумма технологических затрат на очистку и ущерба, наносимого природе выбрасываемыми газами.

Согласно постановке задачи оптимального управления ППС (1) – (6) выражение для расчета критерия оптимальности I:

$$I = (\mathcal{U}^{\Pi\Gamma} \mathcal{Q}^{\Pi\Gamma} + \mathcal{Y}^{\mathfrak{H}}) \to \min_{\mathcal{Q}},$$
(29)

где $U^{\Pi\Gamma}$ – стоимость природного газа, $V^{3\kappa}$ – ущерб от выхлопных газов производства азотной кислоты. Ущерб рассчитывался по методике Госстроя СССР.

$$Y^{\mathfrak{K}} = \overline{V_{\mathfrak{I}}} \cdot B_{\mathfrak{I}} \cdot C_{\mathfrak{I}} \sum_{i=1}^{n} A_{i} \cdot M_{i} , \qquad (30)$$

здесь V_9 – укрупненная величина удельного ущерба от 1 т условно-эквивалентного загрязнителя; B_j , C_j – коэффициенты, учитывающие природно-климатические и социально-демографические условия.

$$A_i = \frac{C_i}{\Pi \not\square K_i} \cdot \frac{\Pi \not\square K_{co}}{\Pi \not\square K_i},$$
(31)

где A_i – коэффициент эквивалентности *i*-го загрязнителя.

В связи с тем, что условия рассеивания примесей имеют стохастический характер, представляется целесообразным использование вероятностных оценок ограничений на уровень приземных концентраций (см. условие (6)). В частности, необходимо потребовать непревышения приведенной концентрации $C^{\Sigma}(x_{\lambda}, y_{\lambda})$ рассматриваемых примесей значения $C^{\Sigma}_{\Pi Л K}$ с заданной вероятностью, т. е.:

$$\mathsf{P}(C^{\Sigma}(x_{\lambda}, y_{\lambda}) \le C^{\Sigma}_{\Pi \not = K}) \ge \mathsf{P}^{3a\partial}, \lambda = \overline{1, N}.$$
(32)

Из условия малого загрязнения атмосферы, согласно действующим нормам (показатель загрязнения P = = 0,1), можно оценить $P^{3a\partial}$ ($P^{3a\partial} = 0,9$).

На рис. 6 показано изменение составляющих экологического ущерба, образованного воздействием окислов азота и углерода на окружающую среду в зависимости от количества природного газа, израсходованного на каталитическую очистку.

На рис. 7 приведены оптимальные значения расходов природного газа на восстановление $Q_8^{\Pi\Gamma}$ и суммарного расхода природного газа $Q^{\Pi\Gamma}$, расхода воздуха Q^B при изменении нагрузки Q^{HXT} по НХГ, полученные в результате решения задачи оптимального управления ППС для нормальных условий рассеивания примесей в атмосфере.

В ходе выполнения рассматриваемой работы были достигнуты следующие результаты.

1. Формализована постановка задачи оптимального управления ППС: производство азотной кислоты – процесс очистки нитрозных газов – воздушный бассейн.



Рис. 6. Зависимость изменения экологического ущерба от количества израсходованного природного газа



Рис. 7. Оптимальные расходы природного газа на восстановление $Q_{\theta}^{\Pi\Gamma}$, суммарного расхода $Q^{\Pi\Gamma}$ и расхода воздуха Q_{θ} при изменении нагрузки по $Q^{HX\Gamma}$

 Разработаны кинетические модели, адекватно описывающие совокупность реакций очистки газов рассматриваемого производства.

 Изучены особенности функционирования процесса очистки; разработаны математические модели, доказана их адекватность реальным процессам каталитической очистки; реализованы эффективные алгоритмы расчета по моделям, предназначенным для цели оптимального управления статическими режимами очистки.

 Создан комплекс алгоритмов и программ для расчета приземных концентраций газовых примесей, образованных промышленными выбросами.

 Предложено применение методов теории игр к определению приземного уровня загрязнения атмосферы, обеспечивающее гарантированную оценку точности прогноза в условиях неопределенности состояния атмосферы [5].

6. Решена задача оптимального управления установкой каталитической очистки при различной нагрузке на нее, переменной экологической обстановке.

7. Разработано алгоритмическое, информационное и техническое обеспечение системы оптимального управления ППС.

 Получены авторские свидетельства [6–8] на локальные системы автоматической стабилизации найденных оптимальных режимов управления процессом очистки.

ЛИТЕРАТУРА

 Зубаков А.П., Толстых С.С., Скляревский А.М., Блох Б.М. Имитационная система прогноза распространения примеси в атмосфере // Проблемы охраны окружающей среды в районах с интенсивно развивающейся промышленностью: докл. II Республиканской конф. Кемерово, 1982. С. 17-18.

- Зубаков А.П., Попов Н.С., Громов Ю.Ю. Система имитационного моделирования и прогноза распространения примесей в атмосфере // Проблемы разработки автоматизированных систем наблюдения, контроля и оценки состояния окружающей среды: докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. Казань, 1983. С. 12-13.
- Зубаков А.П., Попов Н.С. Математическое моделирование процесса каталитической очистки нитрозных газов в задаче оптимального проектирования // Автоматизированное проектирование в химическом машиностроении: сб. науч. тр. / МИХМ. М., 1984. С. 77-81.
- Зубаков А.П. Оптимальное управление очисткой нитрозных газов производства азотной кислоты с учетом экологических ограничений: автореф. дис... канд. техн. наук. М.: Моск. ордена Трудового Красного Знамени ин-т химич. машиностроения, 1987. 16 с.
- Зубаков А.П. Моделирование процессов распространения примесей в атмосфере при информационной неопределенности природных факторов // Актуальные проблемы информатизации и информ. технол.: материалы 2 Тамб. межвуз. науч. конф. Тамбов, сент. 1998 г. Тамбов, 1998.
- А. с. № 1269429 (СССР) Способ регулирования процесса очистки нитрозных газов от окислов азота в производстве слабой азотной кислоты / Зубаков А.П., Бодров В.И., Попов Н.С., Кравченко С.П., Иванова Н.Н., Скляревский А.М. М., 1985.
- А. с. № 1234356 Способ регулирования процесса очистки хвостовых газов от окислов азота в производстве азотной кислоты / Зубаков А.П., Бодров В.И., Попов Н.С., Шарапов А.Н., Иванова Н.Н. М., 1986.
- А.с. № 1680619 Способ управления процессом каталитической очистки нитрозных газов в производстве неконцентрированной азотной кислоты / Зубаков А.П., Бодров В.И., Кравченко С.П., Скляревский А.М. М., 1991.

Поступила в редакцию 26 марта 2009 г.

Zubakov A.P. Mathematical modeling and optimum control of natural-industrial systems. In the work the approach to optimum control of the natural-industrial systems based on a use of methods of mathematical modeling is considered. As an example usage of the given approach to nitric acid manufacture is considered.

Key words: mathematical modeling; nitric acid manufacture; natural-industrial systems.