УДК 519.856

А.Н. Новиков, Б.Я. Корниенко

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГРАНУЛИРОВАНИЯ УДОБРЕНИЙ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Приведены результаты синтеза системы оптимального управления процессом гранулирования в псевдоожиженном слое. Получен оптимальный закон управления расходом раствора и оптимальное распределение температур. Представлен расчет температуры слоя при соответствующих управляющих воздействиях.

Одной из актуальных задач рационального землепользования является разработка минеральных удобрений продленного действия. Особый практический интерес вызывает производство гранулированного сульфата аммония из отходов производства капролактама.

При оптимальном управлении процессом гранулирования в псевдоожиженном слое использовались различные подходы к решению поставленной задачи. Так, при оптимизации управления переменными режимами сушки в качестве критерия оптимизации был принят суммарный расход тепловой и электрической энергии, приходящейся на единицу испаряемой влаги [1]. Другим вариантом управления процессом гранулирования в псевдоожиженном слое является возможность использования при оптимизации аппарата нечетких множеств [2]. Система оптимального управления технологическим процессом гранулирования и сушки по ряду теплофизических характеристик готовой продукции рассмотрена в [3].

Автором рассмотрена задача синтеза системы оптимального управления для гранулятора с псевдоожиженным слоем и квадратичного критерия качества, который имеет вид:

$$I=\frac{1}{2}\int_0^{t_K}\int_0^{L}\left[q_1(T_1(z,t)-T_1^*)^2+r_1G_p^2\right]dzdt, \qquad (1)$$

где q_1, r_1 – весовые коэффициенты; $T_1(z,t)$ и T_1^* – соответственно температура пседоожиженного слоя и заданная температура; G_p – расход исходного раствора. В качестве основного управляющего воздействия выбран расход исходного раствора.

Для управления процессом используется математическая модель гранулирования в псевдоожиженном слое [4]:

$$A\frac{\partial T_1}{\partial t}+A\tau^*\frac{\partial^2 T_1}{\partial t^2}+\alpha\tau^*\frac{\partial T_1}{\partial t}+A\beta^*\tau^*\frac{\partial T_1}{\partial t}=Aa_{22}\frac{\partial^2 T_1}{\partial x_2^2}+\alpha\tau^*\frac{\partial T_2}{\partial t}+$$

$$+\alpha(T_2-T_1)-A\beta^*(T_1-T_0)-G_p(1-x_p)(r+C_п T_1)+G_p x_p q;$$

$$B\frac{\partial T_2}{\partial t}=\alpha(T_1-T_2)-B\beta^*(T_2-T_0)+G_p(1-x_p)(r+C_п T_1), \qquad (2)$$

где A, B – доли объема слоя, занятого опускающейся непрерывной фазой и шлейфами пузырей; T_0, T_1, T_2 – начальная температура слоя и температура частиц в фазах A и B; τ^* – время релаксации температурного поля; α – коэффициент теплоотдачи; β^* – интенсивность уноса тепла из слоя фильтрующим воздухом; a_{22} – коэффициент вертикальной температуропроводности; r – скрытая теплота парообразования; x_p –

температуропроводности; r – скрытая теплота парообразования; $x_р$ – концентрация раствора; $C_п$ - теплоемкость пара; q - тепло, выделяемое при кристаллизации раствора.

Для решения задачи синтеза оптимальной системы управления процессами, которые описываются моделью (2), необходимо было определить такую стратегию управления $G_р(t)$, которая бы минимизировала критерий качества (1). Для представления уравнений в более удобной форме введем новую переменную

$$T_3(z,t) = \frac{\partial T_1(z,t)}{\partial t}. \qquad (3)$$

После преобразования (3) произведем линеаризацию и перейдем к выражению в виде пространства состояния:

$$\frac{\partial \overline{X}}{\partial t} = \overline{A}_2\left(\frac{\partial^2 \overline{X}}{\partial z^2}\right) + \overline{A}_0\overline{X} + \overline{B}\,\overline{U}, \qquad (4)$$

где $\overline{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -b_2 - b_3G_p & -b_1 & 0 \\ m_3b_2 + m_3b_3G_р - m_4 - m_5G_р & m_3b_1 - m_6 & -m_1 \end{bmatrix}$;

$$\overline{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \qquad \overline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -b_3T_1 - b_5 \\ m_3b_3T_1 + m_3b_5 - m_5T_1 - m_8 \end{bmatrix}.$$

Критерий качества примет вид:

$$I = \int_0^{t_K}\int_0^L 0{,}5\left[\overline{X}^T\overline{Q}\,\overline{X} + \overline{U}^T\overline{R}\,\overline{U}\right]dzdt. \qquad (5)$$

Для решения сформулированной задачи применим вариационный метод. Для этого образуем вспомогательный критерий качества $\tilde{I}$ прибавлением к уравнению (5) системы (4) с множителем Лагранжа $\overline{\lambda}(t)$:

$$\tilde{I} = \int_0^{t_K}\int_0^L \left\{0.5\left[\overline{X}^T\overline{Q}\,\overline{X} + \overline{U}^T\overline{R}\,\overline{U}\right] + \overline{\lambda}^T\left[\overline{A}_2\frac{\partial^2\overline{X}}{\partial z^2} + \overline{A}_0\overline{X} + \overline{B}\,\overline{U} - \frac{\partial\overline{X}}{\partial t}\right]\right\}dzdt. \qquad (6)$$

Преобразовав соотношение (6), получим:

$$\frac{\partial\overline{S}}{\partial t} = -\frac{\partial^2\overline{S}}{\partial z^2}\overline{A}_2 - \overline{A}_2^T\frac{\partial^2\overline{S}}{\partial z^2} - \overline{S}\overline{A}_0 - \overline{A}_0^T\overline{S} - \overline{Q} + \overline{S}\overline{B}\overline{R}^{-1}\overline{B}^T\overline{S}. \qquad (7)$$

Соотношение (7) - матричное уравнение Риккати. Его решение осуществлялось в обратном времени. Управление приняло вид:

$$\overline{U}(t) = -\overline{R}^{-1}\int_0^L \overline{B}^T\,\overline{SX}dz.$$

При подстановке в уравнение (7) матричных коэффициентов $\overline{A}_0, \overline{A}_2, \overline{B}$ получена система уравнений вида:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial S_{11}}{\partial t} = 2m_2\frac{\partial^2 S_{13}}{\partial z^2} - 2a_{21}S_{12} - 2a_{31}S_{13} - q + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{12} + b_{31}S_{13})^2 dz;\\
&\frac{\partial S_{22}}{\partial t} = -2a_{22}S_{22} - 2a_{32}S_{32} + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{22} + b_{31}S_{32})^2 dz;\\
&\frac{\partial S_{33}}{\partial t} = -2S_{31} - 2a_{33}S_{33} + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{23} + b_{31}S_{33})^2 dz;\\
&\frac{\partial S_{21}}{\partial t} = m_2\frac{\partial^2 S_{23}}{\partial z^2} - a_{22}S_{21} - a_{32}S_{31} - a_{21}S_{22} - a_{31}S_{23} +\\
&\quad + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{21} + b_{31}S_{31})(b_{21}S_{22} + b_{31}S_{23})dz;\\
&\frac{\partial S_{31}}{\partial t} = m_2\frac{\partial^2 S_{33}}{\partial z^2} - S_{11} - a_{33}S_{31} - a_{21}S_{32} - a_{31}S_{33} +\\
&\quad + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{21} + b_{31}S_{31})(b_{21}S_{32} + b_{31}S_{33})dz;\\
&\frac{\partial S_{32}}{\partial t} = -S_{12} - a_{33}S_{32} - a_{22}S_{32} - a_{32}S_{33} + r^{-1}\int_0^L (b_{21}S_{22} + b_{31}S_{32})(b_{21}S_{32} + b_{31}S_{33})dz
\end{aligned}
\tag{8}
$$

с конечными и граничными условиями:

$$S_{11}(z,t_k)=0;\ S_{22}(z,t_k)=0;\ S_{33}(z,t_k)=0;\ S_{21}(z,t_k)=0;\ S_{31}(z,t_k)=0;\ S_{32}(z,t_k)=0;$$

$$\frac{\partial S_{13}(0,t)}{\partial z}=0;\ \frac{\partial S_{13}(L,t)}{\partial z}=0;\ \frac{\partial S_{23}(0,t)}{\partial z}=0;\ \frac{\partial S_{23}(L,t)}{\partial z}=0;\ \frac{\partial S_{33}(0,t)}{\partial z}=0;$$

$$\frac{\partial S_{33}(L,t)}{\partial z}=0.$$

Оптимальный закон управления обратной связи определяется как:

$$G_p(t) = -r_1^{-1}\int_0^L \overline{B}^T \overline{S}(z,t)\overline{T}(z,t)dz,$$

или окончательно

$$G_p(t) = -r_1^{-1}\int_0^L [T_1(b_{21}S_{21} + b_{31}S_{31}) + T_2(b_{21}S_{22} + b_{31}S_{32}) + T_3(b_{21}S_{23} + b_{31}S_{33})]dz.$$

Данные для расчетов контрольных примеров взяты для гранулятора с псевдоожиженным слоем: начальная температура слоя T_0 = 293 К, коэффициент теплоотдачи α= 4,5 1/с, интенсивность уноса тепла из слоя фильтрующим воздухом β^* = 0,032 1/с, время релаксации концентрационного поля τ^* = 8,05 с, коэффициент вертикальной температуропроводности a_{22} = 12,5 см^2/с, расход раствора G_p = 0,32 кг·К/(с·Дж), концентрация раствора x_p = 0,15. В качестве заданной температуры рассматривались $T_1^* = 375$ К и $T_1^* = 377$ К.

Система уравнений (8) решена с использованием конечно-разностного метода, а также метода Рунге–Кутта. Результаты расчета температуры слоя при соответствующих управляющих воздействиях показаны на рис.1, а изменение управляющего воздействия на рис. 2.

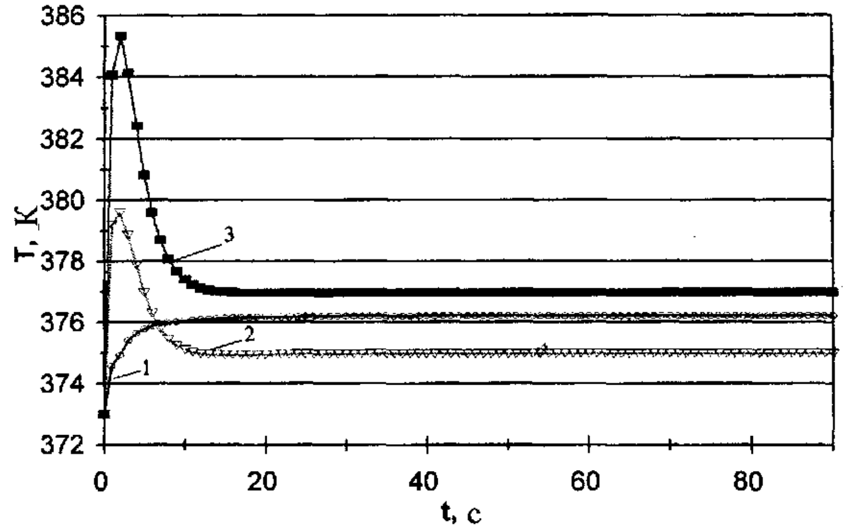

Рис. 1. Переходные характеристики температуры слоя для различных режимов:
1 – при начальном расчете модели; *2* – при настройке на температуру слоя 375К;
3 – при настройке на температуру слоя 377 К

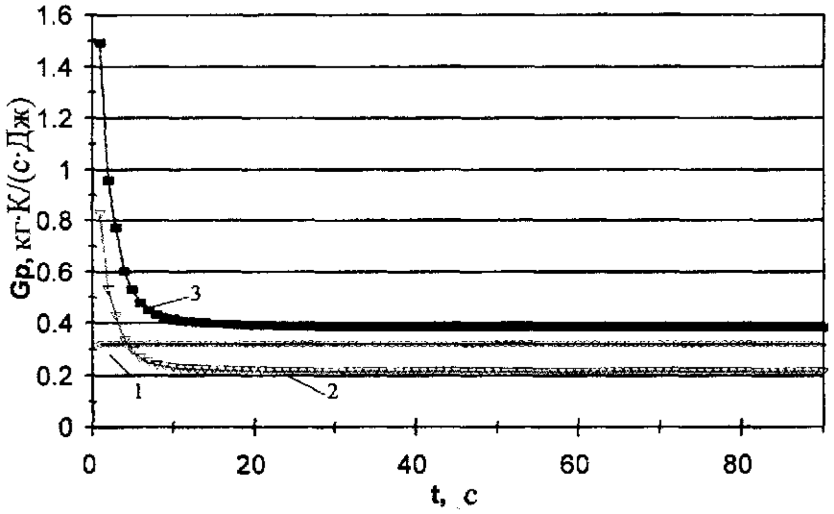

Рис. 2. Изменение расхода исходного раствора:
1 – при начальном расчете модели; *2* – при настройке на температуру слоя 375 К;
3 – при настройке на температуру слоя 377 К

В результате решения поставленной задачи разработана система оптимального управления процессом гранулирования в псевдоожиженном слое. Получены оптимальный закон управления расходом раствора и оптимальное распределение температур. Проведенные вычислительные эксперименты подтверждают работоспособность предложенной системы управления.

Список литературы

1. *Шевцов А.А., Остриков А.Н., Кравченко В.М.* Оптимизация переменных режимов сушки продуктов микробиологического синтеза/ Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. – Тамбов, 1984. – С. 2.
2. *Бодров В.И., Иньков В.И., Дзюба С.М., Андреева С.А.* Оптимизация процесса грануляции в кипящем слое при наличии нечетких целей и ограничений/ Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. –Тамбов, 1984. – С. 3.
3. *Чернышев В.Н., Чернышева В.И.* Измерительно-вычислительная система оперативного управления технологическим процессом грануляции и сушки/ Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. –Тамбов, 1984. – С. 3.
4. *Бородуля В.А., Теплицкий Ю.С., Епанов Е.Г.* Перемешивание частиц и перенос тепла в неоднородных кипящих слоях. – Минск: Наука и техника, 1981. – 41с.
5. *Тодес О.М.* Двухпараметрическая модель перемешивания твердой фазы в псевдоожиженном слое// ТОХТ, 1980. – Т. 14. – №1. – С.139–144.
6. *Буровой И.А.* Автоматическое управление процессами в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1969. – 472 с.
7. *Ажогин В.В., Згуровский М.З., Корбич Ю.С.* Методы фильтрации и управления стохастическими процессами с распределенными параметрами: Учеб. пособие. –К.: Вища шк., 1988. – 448 с.
8. *Ажогин В.В., Згуровский М.З.* Автоматизированное проектирование математического обеспечения АСУ ТП. –К.: Вища шк., 1986. –335 с.

Стаття надійшла до редакції 12 липня 1999 року.

Олексій Миколайович Новіков (1954) закінчив Київський політехнічний інститут у 1979 році, доктор технічних наук професор кафедри математичних методів системного аналізу, декан фізико-технічного факультету Національного технічного університету України "КПІ". Область інтересів: математичне моделювання некласичних просторово-розподілених процесів. Автор більше 70 наукових праць, монографії та посібника.

Olexiy M. Novikov (b. 1954) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1979). DSc (Eng), professor of Mathematical Methods of Systematic Analysis Department. Dean of Physicotechnical Faculty of National Technical University of the Ukraine "KPI". Specializes in the field of simulation of non-classic specially-distributing processes. Author of more than 70 publications, monograph and textbook.

Богдан Ярославович Корнієнко (1972) закінчив Київський політехнічний інститут у 1995 році, аспірант кафедри математичних методів системного аналізу Національного технічного університету України "КПІ". Область інтересів: математичне моделювання і оптимальне керування хіміко-технологічними процесами. Автор 10 наукових праць.

Bogdan Ya. Kornienko (b.1972) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1995), aspirant of Mathematical Methods of Systematic Analysis Department of National Technical University of the Ukraine "KPI". Specializes in the field of simulation and optimal control of chemical engineering processes. Author of 10 publications.