

УДК 636.085.002.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.20914/2310-1202-2016-1-16-20>

Профессор Л.И. Лыткина, профессор А.А. Шевцов,
магистрант М.К. Курманахынова

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, тел. (473)255-38-51

E-mail: larissaig2410@rambler.ru

Докторант Е.З. Матеев

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра машин и аппаратов пищевых производств, тел. (473) 255-38-96

Professor L.I. Lytkina, Professor A.A. Shevtsov,

Master's degree student M.K. Kurmanahynova

(Voronezh. State. Univ. Ing. Tehnol.) Department of Technology of bakery, confectionery, pasta and grain processing industries, tel. (473) 255-38-51

E-mail: larissaig2410@rambler.ru

Doctor's degree student E.Z. Mateev

(Voronezh. State. Univ. Ing. Tehnol.) Department of food machines and equipment
Tel. (473) 255-38-96

Снижение теплоэнергетических затрат энергоёмких процессов в технологии комбикормов

Reducing of thermal power energy-intensive pro-cesses costs in the mixed fodders technology

Реферат. Сформирован методологический подход к созданию энергосберегающих процессов с непосредственным вовлечением в процесс производства теплонасосных технологий для подготовки энергоносителей при получении комбикормов заданного гранулометрического состава. Выполненные экспериментальные и аналитические исследования подготовили условия для разработки энергоэффективных технологий комбикормов с подключением парокомпрессионного (ПКТН) и парозжекторного (ПЭТН) тепловых насосов по замкнутым термодинамическим схемам. Показано, что стратегия оперативного управления технологическими параметрами в области допустимых технологических свойств получаемой комбикормовой продукции не позволяет найти компромисс между конфликтующими технико-экономическими показателями и разрешить основное техническое противоречие между производительностью и энергозатратами. Задача управления существенно усложняется при отсутствии практической возможности подробного описания тепловых процессов, протекающих в замкнутых термодинамических рециклах на основе законов феноменологической термодинамики с учетом сбалансированности материальных и энергетических потоков в технологической системе. Возникает необходимость в адаптивных системах управления на основе экстремальных характеристик управляемого объекта. Эффект адаптации достигается за счет получения информации о протекающих процессах в условиях эксплуатации технологической линии производства комбикормов выровненного гранулометрического состава, которая позволяет сформировать сигнал управления по экстремальному значению функции цели. Предложена схема автоматической оптимизации, обеспечивающая непрерывное наблюдение за минимальным значением удельных теплоэнергетических затрат, устанавливающая оптимальный расход исходного рассыпного комбикорма и рациональную нагрузку на оборудование линии.

Summary: Methodological approach to the creation of energy-efficient processes with direct involvement in the production process of heat pump technology for the preparation of energy resources in obtaining of mixed fodders of the given particle size distribution was formed. Completed experimental and analytical studies paved the way for the development of energy efficient technologies of mixed fodders with a vapor compression connection (VCHP) and steam ejector (SEHP) heat pumps on the closed thermodynamic schemes. It was shown that the strategy of the operational management of process parameters in the allowable technological properties of the resulting mixed fodder production does not allow a compromise between the conflicting technical and economic parameters and let the main technical contradiction between productivity and power consumption. The control problem becomes much more complicated when there is no practical possibility of a detailed description of thermal processes occurring in the closed thermodynamic recycles based on the phenomenological laws of thermodynamics considering a balance of material and energy flows in the technological system. There is a need for adaptive control systems based on the extreme characteristics of the controlled object. The adaptation effect is achieved by obtaining information about the processes occurring in the conditions of technological line of mixed fodders production equalized particle size distribution, which allows to generate a control signal for the extreme value of the objective function. The scheme of automatic optimization ensuring continuous monitoring of the minimum value of the specific heat energy costs is proposed. It provides optimal consumption of the starting loose mixed fodder and rational strain on the line equipment.

Ключевые слова: оптимизация, теплоэнергетические затраты, стоимость, экстремум, тепловой насос, управление.

Keywords: optimization, heat and energy costs, cost, extremum, heat pump, control.

© Лыткина Л.И., Шевцов А.А.,
Курманахынова М.К., Матеев Е.З., 2016

Для цитирования

Лыткина Л.И., Шевцов А.А., Курманахынова М.К., Матеев Е.З. Снижение теплоэнергетических затрат энергоёмких процессов в технологии комбикормов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. №1. С. 16–20. doi:10.20914/2310-1202-2016-1-16-20.

For cite

Lytkina L.I., Shevtsov A.A., Kurmanakhynova M.K., Mateev E.Z. Reducing of thermal power energy-intensive processes costs in the mixed fodders technology *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies]. 2016, no. 1, pp. 16–20. (In Russ.). doi: 10.20914/ 2310-1202-2016-1-16-20.

В работах [1, 2] сформирован методологический подход к созданию энергосберегающих процессов с непосредственным вовлечением в процесс производства теплонасосных технологий для подготовки энергоносителей при получении комбикормов заданного гранулометрического состава.

Выполненные экспериментальные и аналитические исследования подготовили условия для разработки энергоэффективных технологий комбикормов с подключением парокомпрессионного (ПКТН) и парожеторного (ПЭТН) тепловых насосов по замкнутым термодинамическим схемам (рисунки 1, 2).

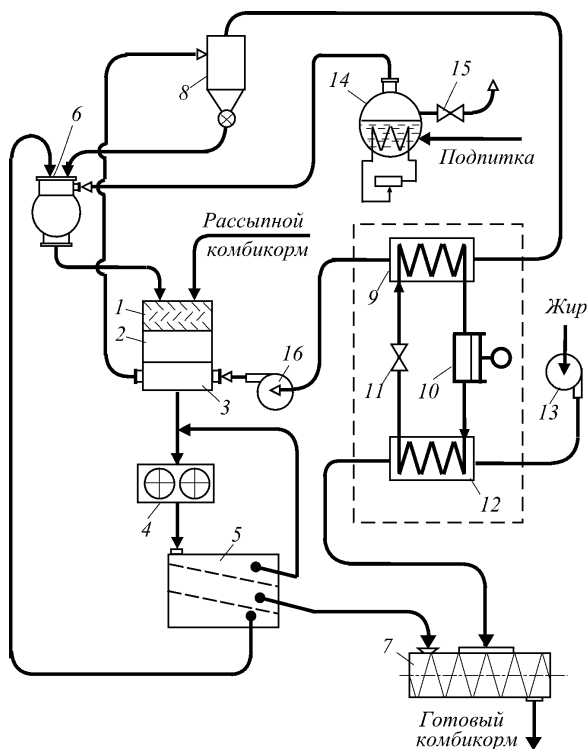


Рисунок 1. Функциональная схема производства комбикормов с использованием парокомпрессионного теплового насоса

Однако стратегия оперативного управления технологическими параметрами в области допустимых технологических свойств получаемой комбикормовой продукции не позволяет найти компромисс между конфликтующими технико-экономическими показателями и разрешить основное техническое противоречие между производительностью и энергозатратами.

Задача управления существенно усложняется при отсутствии практической возможности подробного описания тепловых процессов, протекающих в замкнутых термо-

динамических рециклах на основе законов феноменологической термодинамики с учетом сбалансированности материальных и энергетических потоков в технологической системе. Возникает необходимость в адаптивных системах управления на основе экстремальных характеристик управляемого объекта [3].

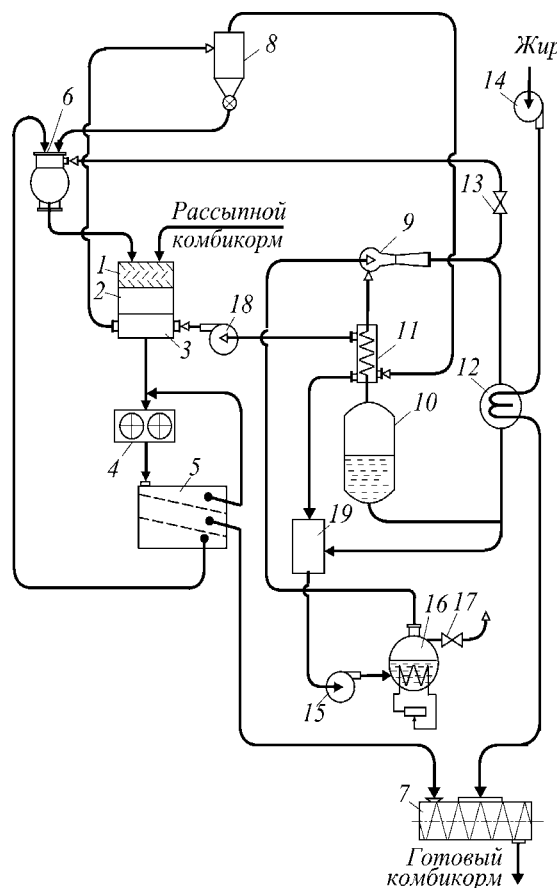


Рисунок 2. Функциональная схема производства комбикормов с использованием парожеторного теплового насоса

Эффект адаптации достигается за счет того, что получение информации о протекающих процессах выполняется в условиях эксплуатации технологической линии производства комбикормов заданной крупности (выровненного гранулометрического состава), а использование информации о протекающих процессах позволяет сформировать сигнал управления по экстремальному значению функции цели [4, 5]. Не исключено, что экстремальные точки объекта управления технологией комбикормов являются «плавающими».

Цель работы - построение оптимизационной модели, обеспечивающей поиск оптимального значения расхода рассыпного комбикорма по минимальному значению удельных энергозатрат, на основе критерия оптимизации в виде

функции $R = f(G)$, график зависимости которого имеет ярко выраженный экстремум:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^7 Z_i}{G_{\text{кк}}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где – затраты электроэнергии (р/ч) на приводы: Z_1 – вентилятора для охлаждения смеси исходного рассыпного комбикорма и горячих гранул; Z_2 – валков измельчителя; Z_3 – просеивателя; Z_4 – затраты тепловой энергии на процесс гранулирования мелкой фракции; Z_5 – пресса-гранулятора; Z_6 – транспортного оборудования для перемещения продукта; Z_7 – компрессора теплового насоса при использовании парокомпрессионного теплового насоса или тепловой энергии в парогенераторе при использовании парожеткорного теплового насоса; $G_{\text{кк}}$ – расход комбикорма выровненного гранулометрического состава (средняя фракция)

Первое слагаемое в числителе критерия (1):

$$Z_1 = C_3 N_1 = k_3 C_3 \Delta P F v, \quad (2)$$

где C_3 – стоимость электроэнергии, р/кВт·ч; N_1 – мощность вентилятора, кВт; k_3 – коэффициент перевода механической энергии потока охлаждающего воздуха в электрическую энергию электропривода вентилятора; F – площадь сечения охлаждающей камеры, м²; v – скорость охлаждающего воздуха, м/с.

Перепад давления воздуха в слое смеси рассыпного комбикорма и горячих гранул:

$$\Delta P = k_1 v^2, \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент, определяемый экспериментально.

Подставим (3) в (2) и обозначим через A затраты электроэнергии в единицу времени на привод вентилятора при охлаждении смеси исходного рассыпного комбикорма и горячих гранул в камере охлаждения:

$$A = C_3 N_1 = k_3 k_1 C_3 F v^3 \quad (4)$$

Слагаемое Z_2 в числителе критерия (1) выразим через пропускную способность валкового измельчителя, установленного после пресса-гранулятора:

$$Z_2 = C_3 N_2 = C_3 (k_2 G_{\text{см2}}^2 + c), \quad (5)$$

где

$$G_{\text{см2}} = G_{\text{см1}} + G_{\text{кф}}, \quad (6)$$

$$G_{\text{см1}} = G + G_{\text{гг}}, \quad (7)$$

где N_2 – мощность валкового измельчителя, кВт; G – расход рассыпного комбикорма, поступающего на линию гранулирования, кг/ч; $G_{\text{гг}}$ – расход горячих гранул из мелкой фракции рассыпного комбикорма, кг/ч; $G_{\text{см1}}$ – расход смеси исходного комбикорма и горячих гранул из мелкой фракции рассыпного комбикорма, кг/ч; $G_{\text{кф}}$ – расход крупной фракции комбикорма, кг/ч; $G_{\text{см2}}$ – расход смеси комбикорма на выходе из смесителя и крупной фракции с просеивающей машины, поступающей на валковый измельчитель, кг/ч; k_2, c – эмпирические коэффициенты. С использованием кратности рециркуляции имеем:

$$G_{\text{см1}} = G (1 + \sigma), \quad (8)$$

$$G_{\text{кф}} = G \gamma (1 + \sigma), \quad (9)$$

где $\sigma = G_{\text{гг}}/G$ – кратность рециркуляции мелкой фракции комбикорма из горячих гранул, поступающей в смеситель; $\gamma = G_{\text{кф}}/[G(1 + \sigma)]$ – кратность рециркуляции крупной фракции, направляемой на измельчение в валковый измельчитель.

Учитывая (7)-(9), уравнение (6) принимает вид:

$$G_{\text{см2}} = G(1 + \sigma)(1 + \gamma). \quad (10)$$

Значение $G_{\text{см2}}$ можно определить через размеры [4]:

$$G_{\text{см2}} = \rho L v b k_3, \quad (11)$$

где ρ – плотность измельчаемой смеси, кг/м³; L – длина вальца, м; b – зазор между вальцами измельчителя, м; $v_{\text{см}}$ – скорость смеси при измельчении, м/с; k_3 – коэффициент объемного использования зоны измельчения ($k_3 < 1$).

Получим:

$$G_{\text{см2}} = B \cdot G, \quad (12)$$

где

$$B = \rho L v_{\text{см}} b k_2 k_3. \quad (13)$$

При этом формула (5) с учетом формулы (12) записывается в виде:

$$Z_2 = C_3 [k_2 B^2 G^2 + c]. \quad (14)$$

Следующее слагаемое Z_3 числителя критерия оптимизации (1) определили по формуле [9]:

$$Z_3 = C_3 N_3 = C_3 \pi \omega^3 A_c^2 Q_{\text{np}} / 13800 \eta, \quad (15)$$

где N_3 – мощность привода просеивающей машины, кВт; $Q_{\text{np}} = h z \rho v_{\text{м}}$ – производительность

просеивающей машины, кг/ч; h – высота слоя просеиваемого продукта, м; z – ширина просеивающей поверхности, м; v_m – скорость продукта, м/с; ρ – плотность продукта, кг/м³; $A_c = e k_4$ – амплитуда колебаний сит просеивающей машины, м; e – эксцентриситет эксцентрика сита просеивающей машины; k_4 – коэффициент, учитывающий колебания рамы просеивающей машины; $\omega = \frac{\pi n}{30}$ – частота вращения кривошипа, с⁻¹;

η – коэффициент полезного действия передаточного механизма.

Выразим:

$$\pi \omega^4 A^2 / 1380 \omega \eta = D, \quad (16)$$

при этом формула (15) будет иметь вид:

$$Z_3 = C_3 D G. \quad (17)$$

Составляющую Z_4 критерия (1) рассчитывали по формуле:

$$Z_4 = C_n Q_n c_n T, \quad (18)$$

где Q_n – расход пара, кг/ч; c_n – теплоемкость пара, кДж/кг·К; T – температура пара, К; C_n – стоимость тепловой энергии, р/кДж.

Слагаемое Z_5 критерия оптимизации (1) определяли по уравнению:

$$Z_5 = C_5 N_5 = C_5 (\xi G_{\Sigma} + \varepsilon) = C_5 (\xi \sigma G + \varepsilon), \quad (19)$$

где N_5 – мощность привода пресса-гранулятора выражается уравнениями с экспериментальными коэффициентами ξ и ε .

Затраты Z_6 критерия (1) представим в виде:

$$Z_6 = C_6 N_{mp}, \quad (20)$$

где N_{mp} – номинальная мощность приводов транспортирующего оборудования.

Затраты энергии на привод компрессора теплового насоса при использовании ПКТН:

$$Z_{7\text{компр}} = C_7 N_{\text{компр}}, \quad (21)$$

где $N_{\text{компр}}$ – мощность компрессора, кВт.

Затраты тепловой энергии в парогенераторе при использовании парожеткортного теплового насоса ($Z_{7\text{эжсект}}$):

$$Z_{7\text{эжсект}} = G_n C_{\text{пара}}. \quad (22)$$

Знаменатель критерия (1) выразим через коэффициент извлечения, показывающего, какую часть средней фракции – комбикорма выровненного гранулометрического состава, высеяли из исходной смеси рассыпного комбикорма и измельченных гранул при просеивании:

$$\eta = G_{\text{кк}} / (G_{\text{см2}} - G_{\text{кф}}), \quad (23)$$

где $(G_{\text{см2}} - G_{\text{кф}})$ – расход проходовой фракции комбикорма, кг/ч.

Формула (23), учитывая (7) и (8):

$$\eta = G_{\text{кк}} / [G(I + \sigma)(I + \gamma) - G\gamma(I + \sigma)] = G_{\text{кк}} / G(I + \sigma), \quad (24)$$

тогда:

$$G_{\text{кк}} = \eta G(I + \sigma). \quad (25)$$

Подставив (4), (14), (17), (18), (19), (20), (21) и (25) в критерий (1) при использовании ПКТН получим:

$$R = \frac{A + C_3 k_2 B \sigma G^2 + C_3 c + C_3 D G + C_n Q_n c_n T + C_5 \xi \sigma G + C_5 \varepsilon + C_6 N_{mp}}{\eta G(I + \sigma)} \rightarrow; \quad (26)$$

и при использовании ПЭТН получим:

$$R = \frac{A + C_3 k_2 B \sigma G^2 + C_3 c + C_3 D G + C_n Q_n c_n T + C_5 \xi \sigma G + C_5 \varepsilon + C_n G_n}{\eta G(I + \sigma)} \rightarrow \quad (27)$$

Упростим (26):

$$R = (\alpha G^2 + \beta G + \delta) / G, \quad (28)$$

где

$$\alpha = C_3 \cdot k_2 \cdot B^2 / [\eta \cdot (I + \sigma)], \quad (29)$$

$$\beta = (C_3 D + C_3 \cdot \xi \sigma) / [\eta \cdot (I + \sigma)], \quad (30)$$

$$\delta = \frac{(A + C_3 C + C_n Q_n c_n T + C_5 \varepsilon + C_6 N_{mp})}{[\eta(I + \sigma)]}. \quad (31)$$

Определяется экстремальное значение G^* :

$$dR/dG = (\alpha G^2 - \delta) / G^2 \Rightarrow G^* = \sqrt{\delta/\alpha}. \quad (32)$$

Таким образом, в условиях реальных возмущений экстремум критерия оптимизации (1) обеспечивает минимальное значение критерия (1).

Для технологической линии производства комбикормов выровненного гранулометрического состава с применением ПКТН производительностью 12,9...16,1 т/ч критерий (1) принимает вид:

$$R = (0,02G^2 + 116G + 5511200)/G. \quad (33)$$

Анализируя (31), делаем вывод, что оптимальное значение расхода исходного рассыпного комбикорма при прочих равных условиях составляет 780 руб/т.

Полученный критерий (33) использован для управления расходом рассыпного комбикорма по минимальной величине теплоэнергетических затрат при двухсторонних ограничениях на режимные параметры основного оборудования, обусловленные получением продукта высокого качества.

По информации датчиков о расходах материальных и тепловых потоков микропроцессор непрерывно вычисляет текущие значения критерия оптимизации R_1 , и по уравнению (33) вычисляет оптимальное значение G^* , соответствующее минимальным теплоэнергетическим затратам на

единицу массы получаемого комбикорма. С микропроцессора сигнал подается в экстремальный регулятор, который вырабатывает сигнал отклонения текущего значения G от оптимального G^* и устанавливает расход исходного рассыпного комбикорма с заданной погрешностью $G - G^* \leq \varepsilon$.

Таким образом, предлагаемая схема автоматической оптимизации обеспечивает непрерывное наблюдение за минимальным значением удельных теплоэнергетических затрат. При этом устанавливается оптимальный расход исходного рассыпного комбикорма и обеспечивается рациональная нагрузка на оборудование линии в пределах заданной производительности при получении комбикорма выровненного гранулометрического состава в соответствии с требованиями стандарта.

ЛИТЕРАТУРА

1 Лыткина Л.И., Шевцов А.А., Дранников А.В., Клейменов А.И. Техника и технология тепловых и механических процессов в задачах энергосбережения на комбикормовых заводах : монография. Воронеж : ВГТА, 2011. 304 с.

2 Шевцов А.А., Лыткина Л.И. Оптимизация технологии комбикормов с применением парокомпрессионного теплового насоса // Экономика. Инновации. Управление качеством. 2015. № 1 (10). С. 62 – 63.

3 Белоглазов И.И., Фитерман М.Я., Мартынов С.А., Мартынова Е.С. Оперативная оптимизация технологии в области экстремального управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 3. С. 9-13.

4 Благовещенская М.М. Идентификационный аспект в методологии создания систем управления технологическими объектами с нестационарными параметрами // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2014. № 1. С. 85 – 90.

5 Луценко И.А., Николаенко Н.И., Гнатюк Ю.И. Технология прямой оценки эффективности процессов управления // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2009. № 3/8(39). С. 8-14.

REFERENCES

1 Lytkina L.I., Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Kleimenov A.I. Tekhnika i tekhnologiya teplovykh i mekhanicheskikh protsessov v zadachakh energosberezheniya na kombikormovykh zavodakh [Technique and technology of thermal and mechanical processes in problems of energy-savings in feed mills]. Voronezh, VGTA, 2011. 304 p. (In Russ.).

2 Shevtsov A.A., Lytkina L.I. Optimization of animal feed technology using vapor compression heat pump. *Ekonomika. Innovatsii. Upravlenie kachestvom*. [Economy. Innovation. Quality management], 2015, no. 1 (10), pp. 62 – 63. (In Russ.).

3 Beloglazov I.I., Fiterman M.Ya., Martynov S.A., Martynova E.S. Operational optimization in the field of extreme control technology. *Promyshlennyye ASU i kontrolyer*. [Industrial ACS and controllers], 2015, no. 3, pp. 9-13. (In Russ.).

4 Blagoveshchenskaya M.M. Identification of the aspect of methodology to creating the technological object control systems with time-varying parameters. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. [Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies], 2014, no. 1, pp 85 - 90. (In Russ.).

5 Lutsenko I.A., Nikolaenko N.I., Gnatyuk Yu.I. Direct assessment of the effectiveness of management processes, technology. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologiy*. [Eastern European Journal of advanced technologies], 2009, no. 3/8 (39), pp. 8-14. (In Russ.).