

УДК 66.021.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО
ПРОЦЕССА МНОГОСТАДИЙНОЙ СУШКИ ДВИЖУЩЕЙСЯ МАССЫ
ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙАкадемик РАН В. П. Мешалкин^{1,2}, В. И. Бобков^{3,*}, М. И. Дли³,
А.Ю. Белозерский¹, И.И. Меньшова¹

Поступило 15.08.2018 г.

Разработан быстродействующий вычислительно-эвристический алгоритм оптимизации энергоресурсоэффективности локального процесса многостадийной сушки движущейся массы фосфоритовых окатышей, характеризуемый применением вычислительно-эвристических процедур и эвристических правил итерационного формирования векторного критерия эффективности химико-энерготехнологического процесса, учитывающего стоимость энергозатрат и показатели качества окатышей, с использованием как специальных барьерных функций для детерминированных ограничений на управляющие технологические переменные (скорость подачи и температуру газа-теплоносителя), так и штрафных функций для переменных состояния локального процесса сушки (градиента температуры, скорости нагрева, влагосодержания, интенсивности влагопереноса в окатышах и температуры газа-теплоносителя на выходе из вертикальной многослойной укладки). С применением разработанного алгоритма и реализуемого комплекса программ определены научно обоснованные оптимальные по энергозатратам и качеству высушенных окатышей технологические режимы в локальных зонах сушки конвейерной обжиговой машины.

Ключевые слова: алгоритм, химико-энерготехнологический процесс, оптимизация, окатыши, сушка, энергоэффективность, химико-энерготехнологическая система, обжиговая машина, математическая модель.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863316-321>

Оптимальные значения управляющих переменных для обеспечения энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса (ХЭТП) многостадийной сушки фосфоритовых окатышей в движущейся плотной многослойной массе окатышей (рис. 1) на конвейере химико-энерготехнологической системы (ХЭС) определяются минимумом энергозатрат на ХЭТП сушки и качеством высушиваемых окатышей в каждой локальной вакуум-камере ХЭС обжиговой машины [1–3].

При оптимальном управлении энергоэффективностью многостадийного процесса сушки для каждого интервала времени Δt в каждой отдельной вакуум-камере на конвейере ХЭС (рис. 1) должны

быть определены векторы управляющих переменных: Tg_0^k — температура газа-теплоносителя на входе в слой и Wg^k — скорость движения газа-теплоносителя в k -й вакуум-камере (Tg_0^k ; Wg^k), где $k = 1, 2, \dots, K$, K — число вакуум-камер на конвейере ХЭС.

Качество и завершённость локального ХЭТП сушки характеризуются для каждого окатыша (рис. 2) следующими показателями: температура окатышей $Tm(x, y, \tau)$, где x — координата по радиусу окатыша, y — координата высоты в вертикальной многослойной укладке окатышей, τ — время; градиент температуры $\frac{\partial Tm}{\partial x}$; скорость нагрева $\frac{\partial Tm}{\partial \tau}$; температура газа-теплоносителя на выходе из многослойной укладки слоёв окатышей Tg_j , а также переменными состояниями окатышей: влагосодержание $U(y, \tau)$ и интенсивность влагопереноса $I(y, \tau)$ [3, 4].

Для решения задачи оптимизации локального ХЭТП сушки необходимо сформировать пространственно-временные ячейки $[\Delta \tau_i, \Delta y_j]$ для каждого рассматриваемого отдельного окатыша (рис. 2). Для каждой пространственно-временной ячейки необ-

¹Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева, Москва

²Институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова Российской Академии наук,
Москва

³Филиал Национального исследовательского университета
“МЭИ” в г. Смоленске

*E-mail: vovabobkoff@mail.ru

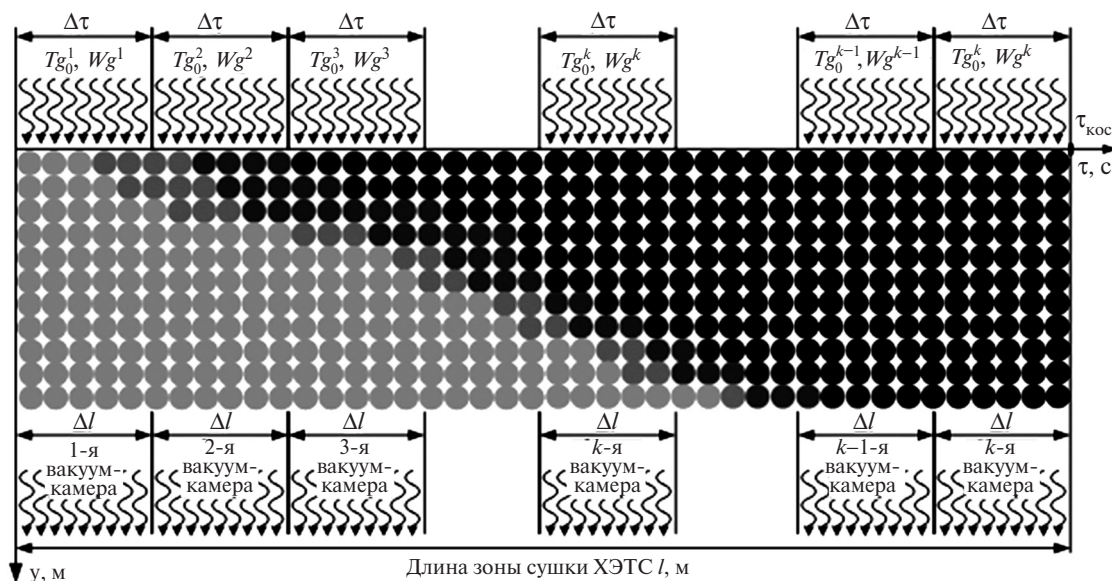


Рис. 1. Обобщённая схема химико-энерготехнологического процесса многостадийной сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей, движущейся через последовательно установленные k -тые локальные вакуум-камеры обжиговой конвейерной машины.

ходимо решить уравнение теплопроводности с использованием неявной конечно-разностной схемы при разбиении по радиусу $R - \Delta x_n, n = 1, 2, \dots, N$, и определить значения температуры материала окатышей $Tm(x, y, \tau) = Tm_{j,n}^i$, по значениям которой найти остальные управляемые переменные со-

стояния ХЭТП сушки: градиент температуры $\left(\frac{\partial Tm}{\partial x}\right)_{j,n}^i$ и скорость нагрева $\left(\frac{\partial Tm}{\partial \tau}\right)_{j,n}^i$.

Значения температуры газа-теплоносителя на выходе из вертикальной многослойной укладки окатышей Tg_j^i , влагосодержания U_j^i , интенсивности

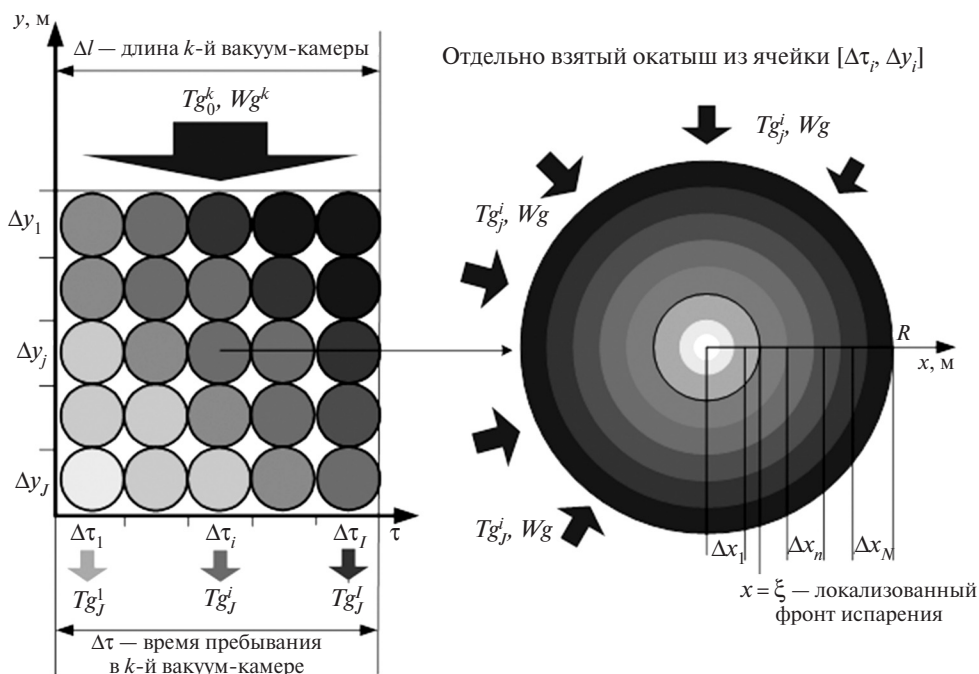


Рис. 2. Условная схема локальной вакуум-камеры, в которой для выбранной пространственно-временной ячейки $[\Delta\tau_i, \Delta y_j]$ рассматривается окатыш радиуса R , нагревающийся от поверхности к центру.

влагопереноса I_j^i , относительной степени высушивания ψ_j^i ; можно определить из решения всей системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) с использованием разработанной авторами математической и компьютерной модели ХЭТП сушки [2].

Энергозатраты ХЭТП сушки определяются расходами электрической $Q_{эл}$ и тепловой $Q_{теп}$ энергии. Для одной вакуум-камеры оптимальным будет такой технологический режим ХЭТП сушки, при котором уменьшается среднее по высоте многослойной укладки влагосодержание окатышей на выходе из вакуум-камеры ($j = J$), т.е. $\bar{U} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I U_j^i \rightarrow \min$ при минимальной стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии [4–6].

Содержательная постановка задачи оптимизации локального ХЭТП сушки в пределах одной вакуум-камеры (рис. 2) может быть сформулирована следующим образом. Необходимо найти такое значение вектора управляющих переменных (T_{g0} , W_g), чтобы значение среднего влагосодержания \bar{U} и стоимости расходов энергии $S = s_{эл} \times Q_{эл} + s_{теп} \times Q_{теп}$ достигали своего минимального значения:

$$\bar{U} \rightarrow \min, S \rightarrow \min,$$

где $s_{эл}$ и $s_{теп}$ — удельная стоимость электрической и тепловой энергии соответственно [7, 8].

Технические особенности ХЭТС обуславливают следующие ограничения на вектор управляющих переменных:

$$0 < W_g \leq W_g^{\max}, \quad (1)$$

$$T_{g0}^{\min} \leq T_{g0} \leq T_{g0}^{\max}, \quad (2)$$

а также на вектор переменных состояния (рис. 2) локализованного ХЭТП сушки в отдельно взятой ячейке $[\Delta\tau_i, \Delta u_j]$:

$$T_{g_j} \leq T_{g_j}^{\max}, \quad (3)$$

$$\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{\max}, \quad (4)$$

$$\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{\max}, \quad (5)$$

$$U \leq U^{\max}, \quad (6)$$

$$I \leq I^{\max}. \quad (7)$$

Математическая модель ХЭТП сушки движущейся многослойной массы окатышей представляет собой систему ДУЧП, для решения которой разработаны специальный вычислительно-эвристический алгоритм и компьютерная программа [9].

В вычислительно-эвристическом алгоритме используются предложенные авторами эвристические процедуры и правила для итерационного формирования векторного критерия энергоэффективности ХЭТП сушки с учётом как детерминированных ограничений (1) и (2), так и эвристически уточняемые при компьютерном моделировании специальных штрафных функций, а также логическая схема применения и интерпретации указанных специальных функций для корректного выполнения динамически изменяющихся требуемых условий ХЭТП сушки (3)–(7).

Предложенный вычислительно-эвристический алгоритм состоит из следующих этапов.

Э т а п 1. Формирование эмпирического векторного критерия энергоэффективности (КЭ) локального ХЭТП сушки, учитывающего затраты энергии и качество высушенных окатышей:

$$F^*(T_{g0}, W_g) = \min(\alpha_1 \bar{U}(T_{g0}, W_g) + \alpha_2 S(T_{g0}, W_g)), \quad (8)$$

где α_1 и α_2 — эмпирические коэффициенты — значения “весовых множителей”, учитывающих вклад в КЭ среднего по высоте многослойной укладки влагосодержания окатышей на выходе из вакуум-камеры \bar{U} и стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии S [10].

Э т а п 2. Решение задачи нелинейной условной оптимизации энергоэффективности локального ХЭТП сушки многослойной массы окатышей в одной вакуум-камере, которая состоит в поиске минимума векторного КЭ (8), при заданных ограничениях в виде неравенств (1)–(7).

Для решения этой задачи разработана оригинальная эвристическо-вычислительная процедура, использующая априорные представления о характере векторного КЭ (8) для применения модифицированного метода деформируемого многогранника и ускорения процедуры поиска экстремума F [10].

Э т а п 3. Реализация многоступенчатой вычислительно-эвристической процедуры построения барьерных функций и штрафных функций для выполнения ограничений условной оптимизации (1)–(7), которая включает следующие шаги:

3.1. Проверка выполнения ограничений (1) и (2) на управляющие переменные — скорость подачи Wg и температуру Tg_0 газа-теплоносителя на входе в локальную многослойную укладку окатышей с использованием в КЭ (8) специальной барьерной функции f_1 вида

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \text{при } (Wg; Tg_0) \in [Tg_0^{\min}; Tg_0^{\max}] \times \\ & \times (0; Wg^{\max}], \\ \infty & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

Ограничение (9) является жёстким, так как оно обеспечивает математически корректное и физически реализуемое решение системы ДУЧП [1].

3.2. Проверка выполнения остальных условий-ограничений (3)–(7), накладываемых физически реализуемыми режимами эксплуатации ХЭТС на переменные состояния локального ХЭТП сушки (рис. 1), с использованием метода “штрафных функций” типа “квадрата срезки” и вспомогательных эмпирически подобранных коэффициентов γ_i , которые обеспечивают одинаковый порядок величин, входящих в систему ограничений (3)–(7) в виде специальных штрафных функций β_i .

3.3. Проверка выполнения ограничения-неравенства (3) на значение температуры Tg_j^i газа-теплоносителя в виде специальной штрафной функции типа “квадрата срезки”:

$$\beta_1 = \begin{cases} (\gamma_1 \cdot Tg_j^i)^2, & \text{при } Tg_j^i > Tg_j^{\max} \\ 0, & \text{при } Tg_j^i \leq Tg_j^{\max}. \end{cases}$$

3.4. Проверка выполнения ограничения-неравенства (4) для значения скорости нагрева окатыша $\frac{\partial Tm}{\partial \tau}$ в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_2 = \begin{cases} \left(\gamma_2 \cdot \frac{\partial Tm}{\partial \tau} \right)^2 & \text{при } \frac{\partial Tm}{\partial \tau} > \Delta_1 Tm^{\max} \\ 0 & \text{при } \frac{\partial Tm}{\partial \tau} \leq \Delta_1 Tm^{\max}. \end{cases}$$

3.5. Проверка выполнения ограничения-неравенства (5) на значение градиента температуры в окатыше $\frac{\partial Tm}{\partial x}$ в виде специальной штрафной функции:

$$\beta_3 = \begin{cases} \left(\gamma_3 \frac{\partial Tm}{\partial x} \right)^2 & \text{при } \frac{\partial Tm}{\partial x} > \Delta_2 Tm^{\max} \\ 0 & \text{при } \frac{\partial Tm}{\partial x} \leq \Delta_2 Tm^{\max}. \end{cases}$$

3.6. Проверка выполнения неравенства (6), т.е. отсутствия переувлажнения окатыша вследствие конденсации паров влаги из газа-теплоносителя, в виде специальной штрафной функции

$$\beta_4 = \begin{cases} (\gamma_4 U)^2 & \text{при } U > U^{\max} \\ 0 & \text{при } U \leq U^{\max}. \end{cases}$$

3.7. Проверка выполнения неравенства (7), т.е. условия разрушения окатыша вследствие повышенного потока влаги (интенсивности влагопереноса I) через локализованный фронт испарения, в виде специальной штрафной функции

$$\beta_5 = \begin{cases} (\gamma_5 \cdot I)^2 & \text{при } I > I^{\max}, \\ 0 & \text{при } I \leq I^{\max}. \end{cases}$$

3.8. Проверка выполнения ограничений (3)–(7) на переменные состояния локального ХЭТП сушки на основе использования в КЭ (8) специальной барьерной функции: $f_2 = \sum_{i=1}^5 \beta_i$.

Предложенный вычислительно-эмпирический алгоритм реализован в виде комплекса программ в среде Borland C++. С использованием этого комплекса программ проведены многочисленные расчёты при следующих граничных значениях технологических параметров ХЭТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей в сложной ХЭТС обжиговой конвейерной машине: $Tg_0^{\min} = 290$ К, $Tg_0^{\max} = 1673$ К, $Wg^{\max} = 1,3$ м/с, $I^{\max} = 3$ кг/(м²·с)·10³, $U^{\max} = 11\%$, $\Delta_1 Tm^{\max} = 10$ К/с, $\Delta_2 Tm^{\max} = 5 \cdot 10^{-3}$ К/м.

На рис. 3 показаны результаты расчёта для ХЭТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей в пятой вакуум-камере ($k = 5$), представляющие собой поверхности значений КЭ. Значение минимум векторного КЭ (8) достигаются при следующих оптимальных значениях управляющих технологических переменных: скорость газа-теплоносителя $Wg^* = 1,3$ м/с, температура подачи газа-теплоносителя $Tg_0^* = 497$ К (рис. 3).

При выполнении многочисленных вычислительных экспериментов по определению оптимальных значений управляющих переменных установлено, что для повышения быстродействия разработанного

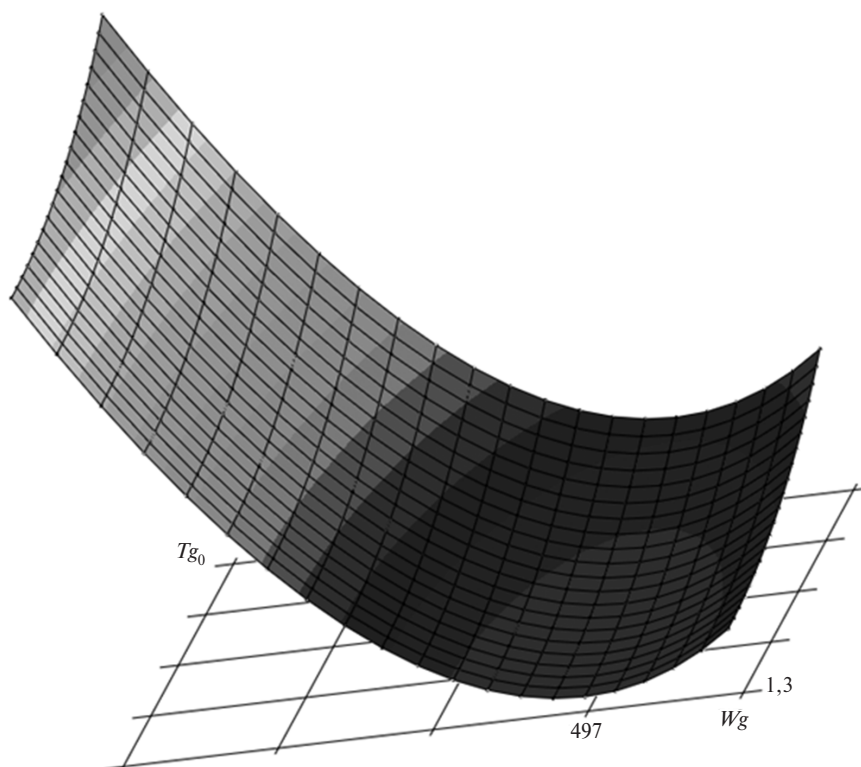


Рис. 3. Результаты эвристическо-вычислительной процедуры условной оптимизации критерия энергоэффективности для ХЭТП локальной сушки в пятой вакуум-камере ($k = 5$).

вычислительно-эвристического алгоритма в качестве начальной точки поиска минимума векторного критерия (8) для k -й вакуум-камеры конвейера $F(Tg_0^k; Wg^k)$ целесообразно рассматривать точку минимума, определенную для предыдущей ($k - 1$)-й вакуум-камеры ($Tg_0^{k-1}; Wg^{k-1}$).

Таким образом, разработанный вычислительно-эвристический алгоритм условной оптимизации энергоэффективности многостадийного ХЭТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей на каждой стадии его дискретизации по времени в каждой вакуум-камере позволяет находить научно обоснованные оптимальные по энергозатратам и качеству высушенных окатышей режимы функционирования ХЭТС в локальных зонах сушки конвейерных обжиговых машин. Получен оптимальный режим функционирования ХЭТС производства окатышей, снижающий энергозатраты на 8% по сравнению с действующим регламентным технологическим режимом.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности (проект № 13.9597.2917/БЧ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешалкин В.П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств. Основы теории и наилучшие практические результаты. М.: Генуя: Химия, 2010. 393 с.
2. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Ходченко С.М. Компьютерное моделирование химико-технологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // ДАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 410–414.
3. Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Ходченко С.М. Оптимизация энергоэффективности химико-энерготехнологического процесса сушки движущейся плотной многослойной массы фосфоритовых окатышей // ДАН. 2017. Т. 477. № 6. С. 667–671.
4. Чоджой М.Х. Энергосбережение в промышленности. М.: Металлургия. 1982. 272 с.
5. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy Analysis of Energy-intensive Production Processes: Advancing Towards a Sustainable Chemical Industry // J. Chem. Techn. and Biotechnol. 2014. Т. 89. № 9. P. 1288–1303.
6. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid M. Investigation of the Structural and Mineralogical Changes of Tunisian

- Phosphorite During Calcinations // *J. Thermal Anal. and Calorimetry*. 2015. Т. 119. № 1. P. 265–271.
7. *Боковиков Б.А., Брагин В.В., Швыдкий В.С.* О роли зоны тепловой инерции при термообработке окатышей на обжиговых конвейерных машинах // *Сталь*. 2014. № 8. С. 43–48.
8. *Rudobashta S.P.* Calculation of the Kinetics of drying Disperse Materials on the Basis of Analytical Methods // *J. Eng. Phys. and Thermophys.* 2010. Т. 83. № 4. С. 753–763.
9. *Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P.* Multicriterial Optimization of the Energy Efficiency of the Thermal Preparation of Raw Materials // *Theor. Foundations Chem. Eng.* 2015. V. 49. № 6. P. 842–846.
10. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 534 с.

OPTIMIZING THE ENERGY EFFICIENCY OF A LOCAL PROCESS OF MULTISTAGE DRYING OF A MOVING MASS OF PHOSPHORITE PELLETS

Academician of the RAS V. P. Meshalkin^{1,2}, V. I. Bobkov³, M. I. Dli³,
A. Y. Belozersky¹, I. I. Menshova¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation*

²*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Moscow, Russian Federation*

³*Smolensk Affiliated Branch of the State Research University "MEI", Smolensk, Russian Federation*

Received August 15, 2018

A rapid heuristic computational algorithm for optimizing the energy and resource efficiency of a local process of multistage drying of a moving mass of phosphorite pellets was developed. The algorithm is distinguished by the use of heuristic computational procedures and heuristic rules of the iterative construction of a vector criterion of the efficiency of the chemical and energy engineering system. The criterion takes into account the energy consumption cost and the pellet quality indicators using both special barrier functions for deterministic constraints on control process variables (feed velocity and temperature of the carrier gas), and penalty functions for state variables of a local drying process (temperature gradient, heating rate, moisture content, moisture-transfer rate in pellets, temperature of the carrier gas at the outlet of the vertical multilayer pellet packing). Using the developed algorithm and software package, the scientifically grounded, optimal in energy consumption and dried pellet quality, operating conditions in local zones of drying of a travelling grate machine were determined.

Keywords: algorithm, chemical and power process, optimization, pellets, drying, energy efficiency, chemical and power technological system, indurating machine, mathematical model.