

УДК 66.021.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ МНОГОСЛОЙНОЙ МАССЫ ФОСФОРИТОВЫХ ОКАТЫШЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ

Бобков В.И.

*Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Смоленск,
e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

В химической и металлургической промышленности широко используется обжиг окомкованного сырья в движущемся плотном слое, с перекрёстной подачей газа-теплоносителя. Одной из важнейших стадий термической обработки является процесс сушки. В работе исследуются оптимальные технологические параметры стационарного режима в отдельно взятой вакуум-камере обжиговой конвейерной машины, химико-технологического процесса сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей, с использованием разработанной процедуры условной оптимизации по критерию энергоэффективности. Технологический стационарный режим химико-технологического процесса сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей определяется: температурой газа-теплоносителя и скоростью его перекрёстной подачи. Качество и завершённость процесса сушки характеризуются: тепловыми параметрами – температура окатышей, зависящая от координаты по радиусу окатыша и координаты высоты в вертикальной многослойной укладке окатышей, градиент температуры в окатыше, скорость нагрева, температура газа-теплоносителя на выходе из многослойной укладки окатышей и параметрами состояния – влагосодержание, интенсивность влагопереноса, относительная степень высушивания. Разработанная процедура отличается ускоренным поиском условного экстремума критерия энергоэффективности модифицированным методом деформируемого многогранника. Такой подход к определению экстремума критерия энергоэффективности многостадийного химико-технологического процесса сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей на каждой стадии дискретизации по времени, отдельно взятой вакуум-камерой обжиговой конвейерной машины позволяет оптимизировать динамический процесс сушки движущейся плотной многослойной массы окатышей в сложной многостадийной химико-технологической системе обжиговой конвейерной машины.

Ключевые слова: химико-технологический процесс, химико-технологическая система, сушка, обжиговая машина, окатыши, фосфорит, оптимизация, энергоэффективность

OPTIMIZATION OF CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESS OF DRYING IN STEADY CONDITIONS OF MULTILAYER MASS OF PHOSPHOROUS PELLETS BY CRITERION OF ENERGY EFFICIENCY

Bobkov V.I.

*Smolensk Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute, Smolensk,
e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

In chemical and metallurgical industry roasting of pellets raw materials in a moving dense bed, with cross supply of gas heat carrier is widely used. One of the most important stages of a heat treatment is drying process. In work optimum technological parameters, steady conditions in separately the taken vacuum camera of the indurating conveyor machine, chemical and technological process of drying of multilayer weight the of phosphorous pellets, with use of the developed procedure of the conditional optimization for criterion of energy efficiency are investigated. The technological steady conditions of chemical and technological process of drying of multilayer weight of the phosphorous pellets are defined: temperature of gas heat carrier and speed of its cross giving. The quality and completeness of process of drying are characterized: heat parameters – temperature of pellets depending on coordinate on the radius of a pellet and coordinate of height in vertical multilayer laying of pellets, temperature gradient in a pellet, heat rate, gas heat carrier temperature on escaping of multilayer laying of pellets and state variables – moisture content, intensity of moisture transfer, the relative dryness. The developed procedure differs in the modified method of a deformable polyhedron accelerated by searching of the conditional of criterion energy efficiency extremum. Such approach to definition of criterion energy efficiency extremum of multistage chemical and technological process of drying of multilayer weight the phosphorous of pellets at each stage of the sampling separately taken by the vacuum camera of the indurating conveyor machine allows to optimize dynamic process of drying of moving dense multilayer mass of pellets in the composite multistage chemical and technological system to the indurating conveyor machine.

Keywords: chemical and technological process, chemical and technological system, drying, indurating machine, pellets, phosphorite, optimization, energy efficiency

Ранее автором в [1] был рассмотрен химико-технологический процесс (ХТП) сушки движущейся на конвейере сложной многостадийной химико-технологической системы (ХТС) обжиговой машины многослойной массы окатышей, широко приме-

няемый в химической и металлургической промышленности при термической обработке окомкованного минерального сырья [2]. Анализ полученных в результате оптимизации энергоэффективности динамического многостадийного ХТП суш-

ки фосфоритовых окатышей в движущейся плотной многослойной массе показал, что существенную роль оказывает стационарная, в рамках отдельно взятой вакуум-камеры обжиговой машины ХТС, условная оптимизация энергоресурсоэффективности ХТП статической сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей [3].

Технологический режим стационарного ХТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей определяется: температурой газа-теплоносителя T_{g0} и скоростью его подачи W_g . Качество и завершённость ХТП сушки характеризуются: тепловыми параметрами – температура окатышей $T_m(x, y)$, зависящая от координаты x по радиусу окатыша и координаты y высоты в вертикальной многослойной укладке окатышей, градиент температуры $\partial T_m / \partial x$, скорость нагрева $\partial T_m / \partial \tau$, температура газа на выходе из многослойной укладки окатышей T_{gh} и параметрами состояния – влагосодержание $u(y)$, интенсивность влагопереноса $I(x, y)$, относительная степень высушивания $\psi(y)$ [4].

В результате дискретизации по времени стадий прохождения отдельных вакуум-камер на конвейерах обжиговых машин в ХТС, для которых формируются различные векторы управляющих параметров $(T_{g0}^k; W_g^k)$.

В результате такой декомпозиции для каждой вакуум-камеры можно выделить следующие наборы управляющих параметров:

$$\forall k = 1, \dots, K \quad (T_{g0}^k, T_{gj}^k, W_g^k),$$

где K – число вакуум-камер конвейера обжиговой машины, соответствующих стадиям процесса сушки окатышей; T_{g0}^k – температура газа-теплоносителя на входе в слой; T_{gj}^k – температура газа-теплоносителя после прохождения j элементарных слоёв высотой Δu , в k -й вакуум-камере; W_g^k – скорость движения газа теплоносителя в k -й вакуум-камере [5].

Себестоимость готовых окатышей формируется в основном за счет удельного расхода электрической $Q_{эл}$ и тепловой $Q_{теп}$ энергии. Оптимальным считается технологический режим, при котором необходимое качество готового продукта, определяемое завершённостью процесса сушки, достигается при минимуме стоимости израсходованной тепловой и электрической энергии, причем учитывается, что стоимость электрической энергии $P_{эл}$ дороже тепловой $P_{теп}$. Содержательная постановка задачи построения процедуры условной оптимизации формулируется так: найти такое значение вектора управляющих параметров $(T_{g0}^k,$

$W_g^k)$, чтобы значения U и $P = P_{эл} Q_{эл} + P_{теп} Q_{теп}$ достигали своего наименьшего значения. В силу технических особенностей обжиговой машины на вектор управляющих параметров накладываются ограничения: скорость $0 < W_g \leq W_g^{\max}$ и температуру $T_{g0}^{\min} \leq T_{g0} \leq T_{g0}^{\max}$ газа-теплоносителя на входе в слой, а также на вектор параметров состояния локализованного ХЭТП сушки $(T_m, \partial T_m / \partial x, \partial T_m / \partial \tau, T_{gh}, U, I, \psi)$ – температуру газа-теплоносителя на выходе $T_{gh} \leq T_{gh}^{\max}$, скорость нагрева $\partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{\max}$ и градиент $\partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{\max}$ температуры в окатыше, влагосодержание $U \leq U^{\max}$ и интенсивность влагопереноса $I \leq I^{\max}$.

В качестве критерия энергоресурсоэффективности локального ХТП сушки многослойной укладки авторами рассматривалось выражение

$$F(T_{g0}, W_g) = \alpha_1 U(T_{g0}, W_g) + \alpha_2 P(T_{g0}, W_g), \quad (1)$$

где коэффициенты α_1 и α_2 обеспечивают ранжированность критериев в двухкритериальной задаче оптимизации [6, 7].

Математическое описание ХТП сушки движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей, представляется в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП), решение которой возможно лишь численными методами по разработанной автором компьютерной программе [1].

Содержательная постановка задачи условной оптимизации энергоресурсоэффективности локализованного ХТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей заключается в поиске экстремума критерия F (целевой функции), определяемом формулой (1), при заданных ограничениях в виде неравенств, т.е. в решении задачи математического нелинейного программирования [8, 9].

Для решения поставленной задачи условной оптимизации потребовалось применение, поисковых методов, в которых направление минимизации определяется на основании последовательных вычислений критерия F , и они не требуют регулярности и дифференцируемости целевой функции F . На практике поисковые алгоритмы оказываются достаточно эффективными и удобными, особенно при реализации решения на ЭВМ.

Исключительно эффективным при решении поисковых задач безусловной оптимизации является предложенный Нелдером и Мидом [8] метод деформируемого многогранника. В нем целевая функция от двумерного вектора $F(T_{g0}, W_g)$ минимизируется с помощью деформации специально подобранного симплекса. Вершина симплекса, в которой значение F максимально, про-

ещируется через центр тяжести оставшихся вершин. Улучшение значений F производится с помощью последовательной замены точки с максимальным значением F на лучшие с помощью поиска вдоль проецирующей линии, в соответствии с разработанной авторами процедурой. Деформируемый от итерации к итерации многогранник (симплекс) в процессе поиска адаптируется к поведению целевой функции F , вытягиваясь вдоль длинных склонов, изменяя направление в изогнутых впадинах и сжимаясь в окрестности минимума $F^*(T_{g0}^*; W_g^*)$. Процедура безусловной оптимизации, используя априорные знания о характере критерия энергоресурсоэффективности F , позволяет модифицировать метод деформируемого многогранника и ускорить нахождение экстремума.

Выполнение ограничений на управляющие параметры – скорость подачи $0 < W_g \leq W_g^{\max}$ и температуру $T_{g0}^{\min} \leq T_{g0} \leq T_{g0}^{\max}$ газа-теплоносителя на входе в локализованную многослойную укладку окатышей достигается введением в критерий F барьерных функций вида

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \text{при } (W_g; T_{g0}) \in [T_{g0}^{\min}; T_{g0}^{\max}] \times (0; W_g^{\max}] \\ \infty, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Это ограничение является наиболее жестким, ибо оно обеспечивает матема-

тически-корректное и физически-осуществимое решение системы ДУЧП представленной в [1].

Выполнение остальных условий осуществляется методом штрафных функций типа «квадрата срезки» с введением вспомогательного аргумента γ_i , обеспечивающего одинаковый порядок величин входящих в систему ограничений:

$$f_2 = \sum_{i=1}^5 \beta_i,$$

где

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

$$\beta_2 = \begin{cases} (\gamma_2 \cdot \partial T_m / \partial \tau)^2, & \text{при } \partial T_m / \partial \tau > \Delta_1 T_m^{\max} \\ 0, & \text{при } \partial T_m / \partial \tau \leq \Delta_1 T_m^{\max} \end{cases},$$

$$\beta_3 = \begin{cases} (\gamma_3 \cdot \partial T_m / \partial x)^2, & \text{при } \partial T_m / \partial x > \Delta_2 T_m^{\max} \\ 0, & \text{при } \partial T_m / \partial x \leq \Delta_2 T_m^{\max} \end{cases},$$

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

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

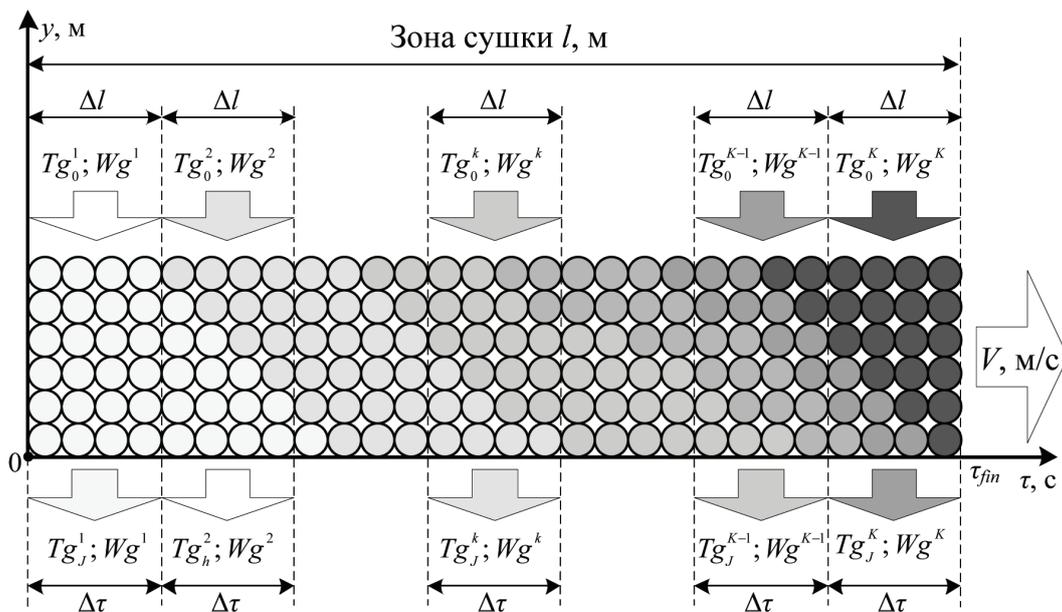


Рис. 1. Проиллюстрирована декомпозиция ХЭТП сушки движущейся многослойной массы фосфоритовых окатышей при дискретизации по времени

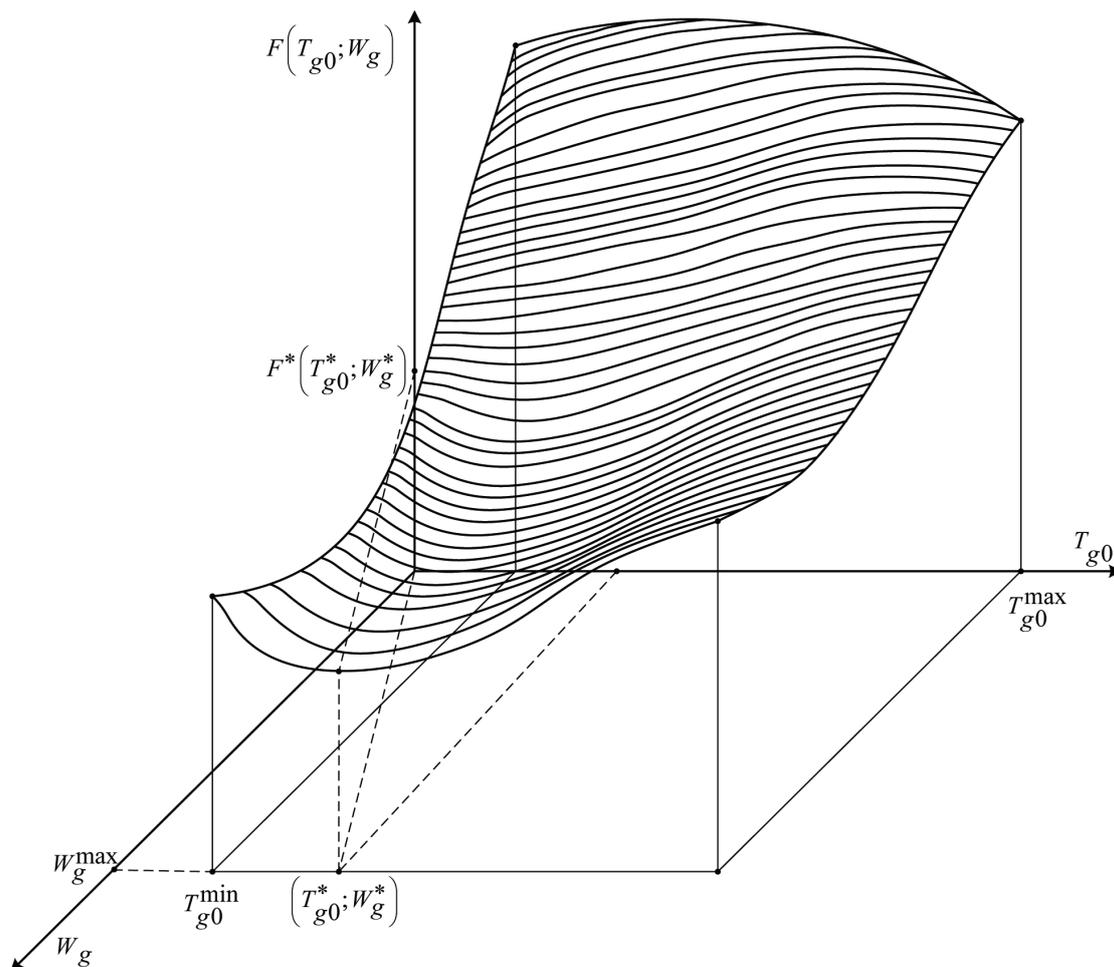


Рис. 2. Результат реализации процедуры условной оптимизации критерия энергоресурсоэффективности для локальной стадии ХЭТП сушки, четвертой вакуум-камеры $k = 4$. Здесь $T_{g0}^* = 478$ К, $W_g^* = 1,3$ м/с

Для увеличения скорости нахождения минимума на каждой стадии дискретизации по времени прохождения отдельных вакуум-камер на конвейерах обжиговых машин, для которых формируются различные векторы управляющих параметров, на каждой последующей стадии $(T_{g0}^k; W_g^k)$, в качестве начальной точки поиска экстремума критерия $F(T_{g0}; W_g)$ берётся найденная точка минимума $(T_{g0}^*; W_g^*)$ на предыдущей стадии дискретизации по времени $(T_{g0}^{k-1}; W_g^{k-1})$.

Разработанная авторами процедура условной оптимизации критерия энергоресурсоэффективности методами нелинейного программирования и оптимизации реализована в комплексах программ, написанных на языке Borland C++. Проводились многочисленные компьютерные вычислительные эксперименты по оптимизации энергоре-

сурсоэффективности для локальных стадий ХТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей в обжиговой конвейерной машине ОК-520Ф, в которой предусмотрено 11 вакуум-камер $k = 11$ [10].

На рис. 2 представлен результат вычислительного эксперимента реализации процедуры условной оптимизации критерия энергоресурсоэффективности для локальной стадии ХТП сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей, четвертой вакуум-камеры $k = 4$.

В полученном оптимальном режиме сушки скорость газа-теплоносителя максимально возможная $W_g^* = 1,3$ м/с. Температура подачи газа-теплоносителя составляет $T_{g0}^* = 478$ К. Расчёты проводились при следующих граничных значениях параметров ХТП многослойной сушки фосфоритовых окатышей в сложной ХТС обжи-

говой конвейерной машине: $T_{g0}^{\min} = 290 \text{ K}$, $T_{g0}^{\max} = 1673 \text{ K}$, $W_g^{\max} = 1,3 \text{ м/с}$, $I_m^{\max} = 3 \text{ кг/}$
 $(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \cdot 10^3$, $U_g^{\max} = 11 \%$, $\Delta_1 T_m^{\max} = 10 \text{ K/с}$,
 $\Delta_2 T_m^{\max} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K/м}$.

Такой подход к определению экстремума критерия энергоресурсоэффективности многостадийного химико-энерготехнологического процесса сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей на каждой стадии дискретизации по времени, локализованной отдельно взятой вакуум-камерой обжиговой конвейерной машины, с использованием разработанной процедуры условной оптимизации, отличающейся ускоренным поиском условного экстремума критерия энергоресурсоэффективности, позволяет быстро находить научно обоснованные оптимальные по энергоресурсоэффективности режимы функционирования ХТС в зоне сушки конвейерных обжиговых машин [11].

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности, проект № 13.9597.2017/БЧ.

Список литературы

1. Бобков В.И. Моделирование термически активируемых процессов обжига окомкованного сырья // Тепловые процессы в технике. – 2016. – № 1. – С. 42–47.
2. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Исследование теплотехнических характеристик окомкованного фосфатного материала // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 7–1. – С. 26–29.
3. Бобков В.И. Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепломассообмена // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12–4. – С. 585–589.
4. Леонтьев Л.И. Физико-химические особенности комплексной переработки железосодержащих руд и техногенных отходов // В книге: XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Тезисы докладов в 5 томах. Уральское отделение Российской академии наук. – Екатеринбург, 2016. – С. 92.
5. Luis P., Van der Bruggen B. Exergy analysis of energy-intensive production processes: advancing towards a sustainable chemical industry // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – 2014. – Vol. 89. No. 9. – P. 1288–1291.
6. 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.
7. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Ferid M. Investigation of the structural and mineralogical changes of Tunisian phosphorite during calcinations // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2015. – Vol. 119. No. 1. – P. 265–269.
8. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: МИР, 1975. – 534 с.
9. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 432 с.
10. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 8. – С. 53–57.
11. Буткарев А.А. Особенности практического использования методологии ВНИИМТ для оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин // Металлург. – 2011. – № 4. – С. 38–43.