

УДК 66.021.4

## ОБОБЩЁННАЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНЖИНИРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЙ ПЕРЕРАБОТКОЙ ОТВАЛОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

**Бобков В.И., Дли М.И., Панченко С.В.**

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

Статья посвящена разработке обобщенной структурно-функциональной модели инжиниринга и управления экологически безопасной многостадийной химико-энерготехнологической системой переработки отходов апатит-нефелиновых руд горно-обогатительных комбинатов. Используется анализ сквозных взаимосвязанных тепло- и массообменных и физико-химических процессов, протекающих в различных зонах обжиговых машин конвейерного типа и руднотермических печей, для определения оптимальных с точки зрения энерго и ресурсосбережения конструктивных параметров элементов данной системы, а также алгоритмов ее функционирования. Рассматриваемая сложная схема представляется эксергетическим потоковым графом, изоморфным представленной химико-энерготехнологической системе, учитывающей практически все параметры, и определяет максимальную функциональность. Эксергетический метод позволяет учесть количественно и качественно энергетические потоки, что делает его, во взаимосвязи с энергетическим, максимально объективным. Обоснованный учёт обобщённых характеристик графа потоков эксергии позволяет уйти от множества типов моделей топологического анализа графов химико-энерготехнологических систем и применять унифицированный топоэксергетический подход к изучению химико-энерготехнологических систем. Важная особенность эксергетических методов – это их универсальность, позволяющая применять эксергию для оценки потоков и объёмов основных видов энергий, используемых при анализе балансов в любой системе через единый критерий энергетической эффективности. Применение этого метода в данной работе позволило обеспечить взаимосвязь эксергетических и технико-экономических характеристик. Увеличение размерности и сложности задач оптимизации и синтеза химико-энерготехнологической системы потребовало использования современного максимально эффективного математического аппарата для решения такого типа задач в реальном времени. Так как сложные иерархические системы включают в себя отношения подсистем, бинарные отношения объектов систем, применение теории графов оказалось наиболее эффективно.

**Ключевые слова:** руднотермическая печь, эксергия, обжиговая машина, температура, структурная модель, энергоресурсосбережение, химико-энерготехнологическая система, переработка отходов

## THE GENERALIZED STRUCTURALLY FUNCTIONAL MODEL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT OF ECOLOGICALLY SAFE PROCESSING OF DUMPS APATITE NEPHELINE ORE MINING AND PROCESSING WORKS

**Bobkov V.I., Dli M.I., Panchenko S.V.**

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

Article is devoted to development of the generalized structurally functional model of engineering and management of ecologically safe multistage chemical and power technological system of processing of a wastage apatite of nepheline ores of mining and processing works. The analysis of the through interconnected warmly and mass-exchanged and physical and chemical processes proceeding in various zones of indurating machines conveyor-based and the ore-smelting furnaces for definition optimum from the point of view of power and resource-saving of design data of elements of this system and also algorithms of its functioning is used. The considered compound circuit is represented exergy flow graph, isomorphism to the presented chemical and power technological system, considering practically all parameters and defines the maximum functionality. The Method of exergy allows to consider quantitatively and qualitatively power streams what does it in interrelation with power, the most objective. Reasonable accounting of the generalized characteristics of the count of streams of an exergy, allows to leave from a set of types of models of the topological exergy analysis of counts of chemical and power technological systems and to apply the unified topology and approach to studying of chemical and power technological systems. The important feature of the methods exergy is their universality allowing to apply an exergy to assessment of streams and volumes of main types of the energies used in the analysis of balances in any system through uniform criterion of power effectiveness. Application of this method in this work, allowed to provide interrelation the exergy, technical and economic characteristics. Increase in dimension and complexity of problems of optimization and synthesis of a chemical and power technological system demanded use of the modern most effective mathematical apparatus for the solution of this kind of tasks in real time. As the complex hierarchical systems include the relations of subsystems, binary relations of objects of systems, application of the graph theory appeared most efficiently.

**Keywords:** ore-smelting furnace, exergy, indurating machine, temperature, structural model, energy resources saving, chemical and power technological system, processing of wastage

Истощение ресурсной базы минерального сырья и экологические проблемы предприятий обуславливают необходимость создания комплексной системы их хранения техногенных отходов апатит-нефелиновых руд горнопромышленных предприятий

переработки и утилизации, включающей с точки зрения аппаратно-технической составляющей многокамерные обжиговые машины конвейерного типа и руднотермические печи [1]. Очевидно, что формирование и эффективное функционирование указанной системы должно обеспечиваться использованием методологии инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных производств переработки отходов апатит-нефелиновых руд на горно-обогатительных комбинатах, которая непосредственно связана с реализацией междисциплинарного подхода [2]. Важность создания научных основ комплексной энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки отходов апатит-нефелиновых руд на горно-обогатительных комбинатах определяется необходимостью комплексного применения фундаментальных методов анализа тепломассообменных и физико-химических процессов и сложных химико-энерготехнологических систем (ХЭТС); инжиниринга производств, включающих обжиговые конвейерные машины и руднотермические печи; оптимального управления энергоресурсоэффективностью многостадийных химических, металлургических и горных производств [3].

Цель исследования: решение актуальной фундаментальной задачи формирования научных основ инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных многостадийных систем переработки отходов апатит-нефелиновых руд на горно-обогатительных комбинатах в обжиговых машинах конвейерного типа для производства окатышей с последующим их использованием в руднотермических печах [4]. Данная задача непосредственно связана с разработкой фундаментальных методов управления энергоресурсоэффективностью многостадийных комплексных технологических процессов на основе иерархических моделей тепломассообмена при реализации отдельных подпроцессов с учетом свойств перерабатываемого сырья и необходимости рационального использования вторичных энергетических ресурсов при перераспределении и замыкании энергетических потоков [5].

Это позволило разработать методологический аппарат инжиниринга сложного технологического оборудования переработки твердых техногенных отходов горно-обогатительных комбинатов и разработать комплексный алгоритм оптимального управления взаимосвязанными процессами, реализуемыми в обжиговых машинах

и руднотермических печах, с учетом параметров партий исходного мелкодисперсного сырья и требований к продукции на выходе печи [6, 7].

### Материалы и методы исследования

Граф потоков эксергии имеет ряд свойств, которые позволяют объективно описывать ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд горно-обогатительных комбинатов, с использованием анализа сквозных взаимосвязанных тепло- и массообменных и физико-химических процессов, протекающих в различных зонах обжиговых конвейерных машин и руднотермических печей. Формировать связи между объектами и подсистемами, иметь качественную и адекватную информацию о рассматриваемой ХЭТС [8, 9].

Эксергетический потоковый граф, рассматриваемой сложной многостадийной ХЭТС, с произвольной структурой, имеет вид:  $G = \{V; H\} = \{V; E\}$ , где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$  – совокупность вершин, соответствующих отдельным элементам ХЭТС;  $E = \{e_k, e_l\}$ , – совокупность дуг перераспределения потоков эксергии в ХЭТС,  $k \neq l$ ,  $k = 1, 2, \dots, K$ ;  $l = 1, 2, \dots, K$ ;  $H$  – многозначное отображение множества  $V$  в себя. Соответствие дуг  $u_j = \{v_k, v_l\}$  упорядоченной двойке вершин  $(v_k, v_l)$  определяется направленностью эксергетического потока из вершины  $v_k$  в вершину  $v_l$ , для рассматриваемой ХЭТС из элемента  $v_k$  в элемент  $v_l$ .

Важнейшие свойства графов эксергетических потоков определяются универсальностью топоэксергетического подхода: связность потоковых эксергетических графов (ПЭГ) обеспечивается наличием связи потоков для каждого элемента ХЭТС хотя бы с одним другим элементом; ПЭГ – это ориентированный граф; ПЭГ структуры ХЭТС, является антисимметрическим; не сильно связным; потери эксергии для любой вершины ПЭГ суммой значений графовых положительно и отрицательно инцидентных дуг, при вершине [10].

Такой подход позволяет уйти от множественности типов моделей топографического анализа ХЭТС и рассмотреть общий топоэксергетический подход к исследованию ХЭТС [11, 12]. Отличительной особенностью ПЭГ от тепловых, параметрических или материальных графов состоит в том, что они в большей мере определяются схемой рассматриваемой ХЭТС, а это обеспечивает контроль всех главных функциональных параметров ХЭТС [13, 14].

### Результаты исследования и их обсуждение

В рассматриваемой ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд горно-обогажительных комбинатов узлы графа соответствуют отдельным элементам структурно-функциональной модели инжиниринга: гранулятор; горн конвейерной обжиговой машины, в который направляются топливо и воздух на окисление, а удаляются остатки горения; зоны подогрева, низкотемпературной сушки, высокотемпературного обжига, тепловой рекуперации, охлаждения окатышей; выгрузная область машины со съёмом обработанных окатышей; отделение для шихтования; шихтовая часть руднотермической печи, с диффундирующими печными газами сквозь шихту и подогревающие её, затем поступающие на фильтрацию и конденсацию; область производства готового продукта с потреблением огромного количества электрической мощности, зона шлака с отбором в гранулятор, в котором тепловая энергия отбирается водой.

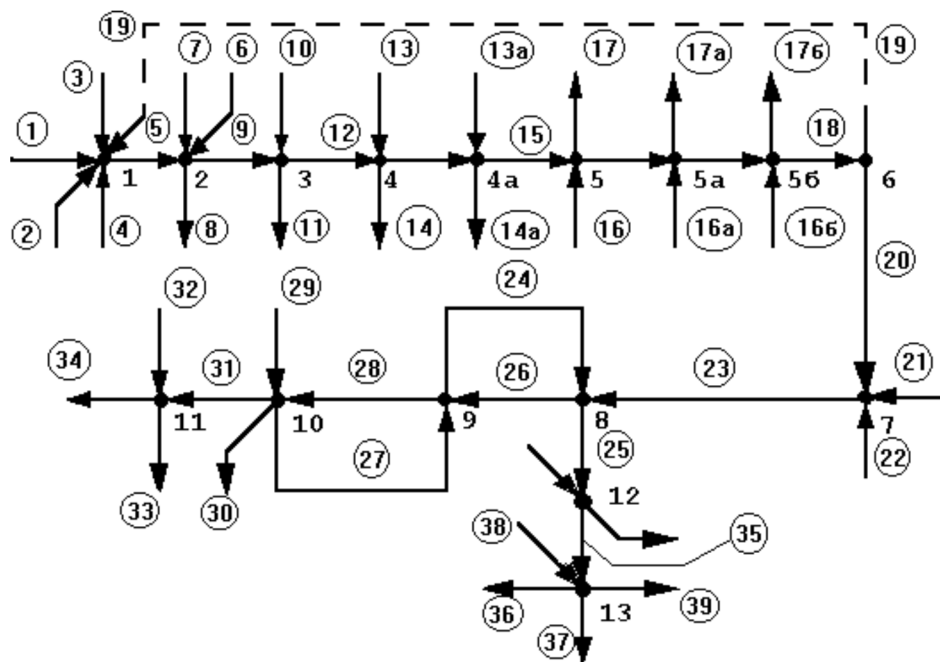
Дуги окатышей, кокса, воды на окатышивание и конденсации продукта графа соответствуют эксергетическим потокам: исходной и после горна шихты; зоны сушки и спекания; шихты в руднотермической печи и пыли на фильтрах; топлива; возду-

ха на горение, на прокалку, в зону охлаждения, горячего воздуха из зоны охлаждения; уходящих газов; обожжённых окатышей в хвостовой части конвейера обжиговой машины; охлажденных и годных окатышей; возврата; выходящих печных газов; потока газа в печи из области интенсивной реакции и плавления; электрической энергии в области реакции; шлака и газа-теплоносителя до и после гранулятора; готового продукта. Рассматриваемая ХЭТС имеет последовательную линейную взаимозависимость разветвляющихся потоков, технологических агрегатов, полупродуктов.

Укрупненная исходная исследуемой ХЭТС представлена на рисунке. Узлы графа представляют составляющие элементы, а дуги – эксергетические потоки структурно-функциональной схемы.

На этом ПЭГ представлены потоки различных по физической природе электрической и тепловой энергий.

Элементы структурно-функциональной модели ХЭТС: 1 – агрегат окомкования; 2 – горн обжиговой конвейерной машины; 3, 4 и 5 – зоны сушки, спекания и охлаждения обжиговой машины; 6 – грохот; 7 – отделение для подготовки шихты; 8 – шихтовая печная зона; 9 – зона расплавления; 10 – зона восстановления; 11 – зона шлака, 12 – фильтры; 13 – зона конденсата.



*Структурно-функциональная схема ПЭГ в экологически безопасной многостадийной ХЭТС переработки отходов апатит-нефелиновых руд на горно-обогажительных комбинатах*

ПЭГ структурно-функциональной модели ХЭТС: 1 – отходы апатит-нефелиновых руд; 2 и 21 – кокс; 3 и 22 – технологический кварцит; 38, 39 и 4 – техническая вода для конденсации и окомкователя соответственно; 5 – подаваемая шихта; 9 – нагретая в горне шихта; 12 – спекающаяся шихта; 23 – поступающая из шихтовального отделения шихта; 26 – подаваемая в зону расплава шихта; 6 – топливо; 7 – воздух на горение для горна; 10 – воздух, для спекания; 13 – воздух в зоне охлаждения обжиговой машины; 16 – горячий воздух поступающий из зоны охлаждения; 8, 11 и 14 – отходящие газы; 15, 18 и 20 – окатыши на конвейере обжиговой машины сырые, в зоне сушки и обжига и в зоне охлаждения соответственно; 19 – возврат на окомкование; 24 и 25 – выходящие печные газы; 28 – поступающий в зону реакции расплав; 29 – джоулева теплота, которая выделяется в реакционной области; 30 – феррофосфор; 31 и 34 – шлак в грануляторе и после обработки соответственно; 32 и 33 – газ или вода теплоносители; 35 – фильтрационные газы; 36 – печной газ; 37 – готовый продукт.

Границы объекта исследования определялись формальной постановкой содержательной задачи. Системный подход, подчинённый синтезу многообразных характеристик, в итоге позволил провести всесторонний анализ ХЭТС. Авторами производилась чёткая разработка отдельных подсистем иерархии ХЭТС для обеспечения и согласования надёжного функционирования их совокупности. Процедура динамической декомпозиции учитывает иерархичность ХЭТС в отдельных уровнях и отслеживает технологические качества элементов, который позволяет выявлять потенциал энергосбережения в совокупности элементов декомпозиции.

Имеются различные операции декомпозиции на первом и последующих уровнях. Во-первых, получение подсистем непосредственно получается по элементам ХЭТС, во-вторых, посредством подсистем последующих уровней.

Например:  $k$ -й подсистемой  $\alpha$ -го уровня иерархии  $A_k^\alpha$  называется собственное подмножество некоторой совокупности элементов  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ , где  $A_k^\alpha \subset E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ;  $A_k^\alpha \neq \emptyset$ ;  $A_k^\alpha \neq E$ ;  $A_1^\alpha \cup A_2^\alpha \cup \dots \cup A_\beta^\alpha = E$ ;  $\alpha = 1, 2, \dots, \gamma - 1$ ;  $A_i^\alpha \cap A_j^\alpha = \emptyset$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, \beta_\alpha$ ;  $i \neq j$ ;  $\beta_{\alpha-1} > \beta_\alpha \geq 2$ ;  $\alpha$  – иерархические уровни;  $\alpha = 0$  – уровень элементов ХЭТС;  $\alpha = \gamma$  –

уровень центрального блока ХЭТС;  $\beta_\alpha$  – количество подсистем в уровне  $\alpha$ .

Для любой подсистемы  $A_k^\alpha = 1, 2, \dots, \gamma - 1$ , при  $k = 1, 2, \dots, \beta_\alpha$ , определяются технологические операторы. Большое количество возможных вариантов декомпозиции ХЭТС на подсистемы достигается как по структуре, так и по количеству подсистем. Выявлено что при надёжной и эффективной работе одиночной подсистемы, без согласованности с прочими подсистемами в совокупности комплекс как единое целое не функционирует.

Базой для системного анализа проблем увеличения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), при графическом отражении связей среди различных видов энергетических ресурсов предприятия и продукцией, на которую затрачиваются эти энергетические ресурсы.

Основной проблемой общей задачи максимального повышения эффективности использования ТЭР на комбинатах горно-обогатительного комплекса выступает выявление и отыскание резерва для их сбережения, обнаружение основных агрегатов потребляющих энергию, химико-энерготехнологических процессов других элементов функциональной структуры ХЭТС, имеющие максимальный потенциал сбережения ТЭР.

Для этого было предложено произвести ранжирование ХЭТС, что позволило выявить с помощью совокупности показателей источники основного максимального резерва сбережения ТЭР. Определялся интегрированный ранг для каждой вершины ПЭГ, потоков с учётом рассмотрения всех видов энергетических ресурсов и значимости всех показателей.

### Заключение

Обнаружено что весовые коэффициенты показателей согласованно учитывают динамику значимости технико-экономических проблем горно-обогатительного комплекса. Следует отметить, что ранги, характеризующие частные показатели, максимально устойчивые величины, которые определяют в итоге эффективность использования энергии.

В системе оценки эффективности энергетического использования и обнаружения узлов с максимальным потенциалом сбережения научно обосновано применять такие показатели, которые определяются спецификой конкретного производства и перспективой развития.



Таким образом, разработана композиционная структурно-функциональная модель инжиниринга и управления экологически безопасной многостадийной химико-энерготехнологической системой переработки отходов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых месторождений. Проведён системный анализ сквозных взаимосвязанных тепло- и массообменных и физико-химических процессов, протекающих в различных зонах обжиговых машин конвейерного типа и руднотермических печей. Выявлены оптимальные с точки зрения энерго- и ресурсосбережения конструктивные параметры элементов данной системы и построены алгоритмы ее функционирования.

При дальнейшей работе в данном направлении следует учитывать совокупность энергетической эффективности, месторасположения, структуры главных резервов, как многовекторный характер работы горно-обогатительных предприятий, а также неравнозначности первоочередных задач. Необходимо рассмотреть возможность обнаружения первоочередных источников для экономии энергетических ресурсов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-29-24094 МК.*

#### Список литературы

1. Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М., Буткарев А.А. Инновационные разработки ОАО ВНИИМТ для энергосбережения и экологии в металлургии // *Черная металлургия*. 2014. № 7 (1375). С. 79–82.
2. Zaynullin L.A., Druzhinin G.M., Butkarev A.A. Innovative developments of VNIIMT OJSC for energy saving and ecology in metallurgy // *Chernaya metallurgiya*. 2014. № 7 (1375). P. 79–82 (in Russian).
3. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 1. С. 11–22. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22.
4. Leont'ev L.I., Grigorovich K.V., Kostina M.V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1 // *Steel in Translation*. 2016. V. 46. № 1. P. 6–15. DOI: 10.3103/S096709121601006X.
5. Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 7. С. 565–572. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-7-565-572.
6. Novichikhin A.V., Shorokhova A.V. Systematic processing of iron-ore waste in mining regions // *Steel in Translation*. 2017. V. 47. № 7. P. 456–462. DOI: 10.3103/S0967091217070105.
7. Бобков В.И. Моделирование термически активируемых процессов обжига окомкованного сырья // *Тепловые процессы в технике*. 2016. Т. 8. № 1. С. 42–47.
8. Bobkov V.I. Modeling of Thermally-Activated Process of Pellet Stuff Baking // *Teplovye processy v tekhnike*. 2016. V. 8. № 1. P. 42–47 (in Russian).
9. Бобков В.И., Мищенко М.Н. Исследование теплофизических характеристик окомкованного фосфатного материала // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 7–1. С. 26–29.
10. Bobkov V.I., Mishchenko M.N. Research of heatphysical characteristics of phosphoric pellets // *Modern high technologies*. 2016. № 7–1. P. 26–29 (in Russian).
11. Бобков В.И. Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепло-массообмена // *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 12–4. С. 585–589.
12. Bobkov V.I. Energy saving in material drying technologies in the dense layer based on heat and mass transfer intensification // *Modern high technologies*. 2015. № 12–4. P. 585–589 (in Russian).
13. Леонтьев Л.И. Физико-химические особенности комплексной переработки железосодержащих руд и техногенных отходов // *XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии Тезисы докладов в 5 т. Уральское отделение РАН. Екатеринбург*, 2016. С. 92.
14. Leontyev L.I. Physicochemical features of the integrated processing of iron-containing ores and industrial wastes // *XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry Abstracts in 5 volumes. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg*, 2016. P. 92 (in Russian).
15. 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. DOI: 10.1002/jctb.4422.
16. Боквиков 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.
17. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Shvydkii V.S. Role of the thermal-inertia zone in conveyer roasting machines // *Steel in Translation*. 2014. T. 44. № 8. P. 595–601. DOI: 10.3103/S096709121408004X.
18. Elgharbi S., Horchani-Naifer K., Férid 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. 265–271. DOI: 10.1007/s10973-014-4132-5.
19. 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.
20. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Fedina V.V. Determination of pelletizing ability in iron feed materials for predicting the pellets strength properties // *Modern high technologies*. 2015. № 8. P. 53–57 (in Russian).
21. Буткарев А.А. Особенности практического использования методологии ВНИИМТ для оптимизации теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин // *Металлург*. 2011. № 4. С. 38–43.
22. Butkarev A.A. Peculiarities of the practical use of the VNIIMT methodology for optimizing heat engineering schemes of firing conveyor machines // *Metallurg*. 2011. № 4. P. 38–43 (in Russian).
23. Бобков В.И. Оптимизация химико-технологического процесса сушки в стационарном режиме многослойной массы фосфоритовых окатышей по критерию энергоресурсоэффективности // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 5. С. 25–29.
24. Bobkov V.I. Optimization of chemical and technological process of drying in steady conditions of multilayer mass of phosphorous pellets by criterion of energy efficiency // *Modern high technologies*. 2018. № 5. P. 25–29 (in Russian).
25. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девятых Е.А., Девятых Т.О., Спиринов Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 1. С. 19–23. DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-19-23.
26. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 2 // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2017. T. 60. № 1. P. 19–23 (in Russian).