

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 681.5.015

DOI: 10.14529/ctcr190315

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ДРОБИЛЬНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

*Д.А. Шнайдер, Е.А. Калинина*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

В связи с высоким спросом на железорудные окатыши на российском внутреннем и мировом рынках высокую актуальность имеет задача повышения объемов производства железорудного концентрата при обеспечении требуемого качества. В работе предложена общая технико-экономическая постановка задачи оптимизации дробильно-обогадательной фабрики (ДОФ) по критерию максимума маржинальной прибыли предприятия. Решение задачи выполняется при соблюдении технологических ограничений по режиму работы технологической секции, типу производимого концентрата, обеспечению требуемого качества концентрата на выходе, составу работающего оборудования и другим параметрам. Подробно рассмотрена частная задача повышения производительности технологической секции ДОФ за счет оптимизации режимов работы оборудования. Традиционным подходом к решению данной задачи является применение физико-химических моделей в сочетании с экспериментальным изучением технологического процесса. В работе предложен подход на основе применения оптимизационной математической модели, разработанной с использованием интеллектуального анализа статистических данных Data Mining. В качестве метода построения модели принят метод деревьев принятия решений. Поиск наилучшего решения в смысле выбранного критерия выполняется методом перебора. Результатом моделирования является оценка производительности секции в зависимости от влияния входных управляющих факторов, параметров исходной руды, а также технологических ограничений. В работе приведен методический пример применения модели управления технологическим процессом производства железорудного концентрата технологической секции ДОФ с повышением производительности до 7%. Практическое применение предложенного подхода позволит в рамках существующей автоматизированной системы управления в режиме реального времени предоставлять оператору рекомендации о корректировке параметров управления режимами работы технологического оборудования секции ДОФ с учетом текущих условий технологического процесса.

*Ключевые слова:* дробильно-обогадательная фабрика, Data Mining, деревья принятия решений.

### Введение

Дробильно-обогадательные фабрики (ДОФ) являются основным звеном в технологическом процессе переработки твёрдых полезных ископаемых с целью получения высококачественного железорудного концентрата. Железорудный концентрат является сырьем для производства железорудных окатышей, используемых в черной металлургии.

В связи с высоким спросом на железорудные окатыши на рынке России и в мире высокую актуальность имеет задача повышения объемов производства при обеспечении требуемого качества железорудного концентрата путем оптимизации работы оборудования технологических секций ДОФ.

На сегодняшний день значительное количество работ посвящено решению задач повышения эффективности ДОФ. Традиционным подходом здесь является применение физико-химических моделей в сочетании с экспериментальным изучением технологического процесса. Так, в работах [1–4] авторами рассмотрен технологический процесс обогащения руды, приведено наиболее рас-

пространственное оборудование для его осуществления, показаны методы оптимизации и интенсификации технологических процессов обогащения. Методы оптимального управления технологическими процессами обогащительных фабрик описаны в работах [5–9].

Применение на промышленных предприятиях современных приборов для измерения параметров технологических процессов в комплексе с развитием информационных технологий стало предпосылкой к развитию технологий интеллектуального анализа больших объемов данных Data Mining [10–12], где на основании статистических данных разрабатываются математические модели, которые далее используются при разработке автоматизированных систем управления и оптимизации технологических процессов [13–22].

Несмотря на большой объем имеющейся литературы, на сегодняшний день задача оптимизации управления технологической секции ДОФ на основе применения математических моделей, работающих в режиме советчика, не решена в полной мере, что определяет актуальность работы.

### 1. Подход к решению оптимизационной задачи

Целью работы является максимизация маржинальной прибыли (МП) ДОФ, которая может быть определена по формуле

$$МП = П \cdot (C_k - Z_{уд}(П)) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $П$  – производительность по руде;  $C_k$  – стоимость 1 тонны конечного продукта;  $Z_{уд}$  – переменные удельные затраты на производство продукта.

Производительность по руде ( $П$ ), подаваемой на вход технологических секций, определяется функцией

$$П = f(u_1, u_2, \dots, u_N, z_1, z_2, \dots, z_K, y_1, y_2, \dots, y_M), \quad (2)$$

где  $N, K, M$  – количество используемых в модели управляемых показателей технологического процесса, качественных показателей исходной руды и железорудного концентрата соответственно.

Переменные удельные затраты на производство продукта ( $Z_{уд}$ ) в рамках данной задачи определяются по формуле

$$Z_{уд} = Э/П + С/П + Ш/П + X_v/П, \quad (3)$$

где  $Э$  – электроэнергия;  $С$  – помольные стержни для стержневых мельниц;  $Ш$  – помольные шары для шаровых мельниц;  $X_v$  – потери железа в хвостах.

На рис. 1 представлен общий вид графиков зависимости переменных удельных затрат на производство железорудного концентрата и маржинальной прибыли от производительности.

Из рис. 1 видно, что в точке с производительностью  $П_1$  достигается минимум удельных переменных затрат, при этом, однако, максимум маржинальной прибыли в общем случае достигается в точке с производительностью  $П_2$ .

Таким образом, необходимо определить оптимальные значения управляемых факторов  $u_i$  при заданных значениях качественных показателей исходной руды  $z_j$ , железорудного концентрата  $y_l$  и цене продукта  $C_k$ , обеспечивающих максимум маржинальной прибыли (3), определяемой с учетом технологических ограничений:

$$u_{i \min} < u_i < u_{i \max}, \quad (4)$$

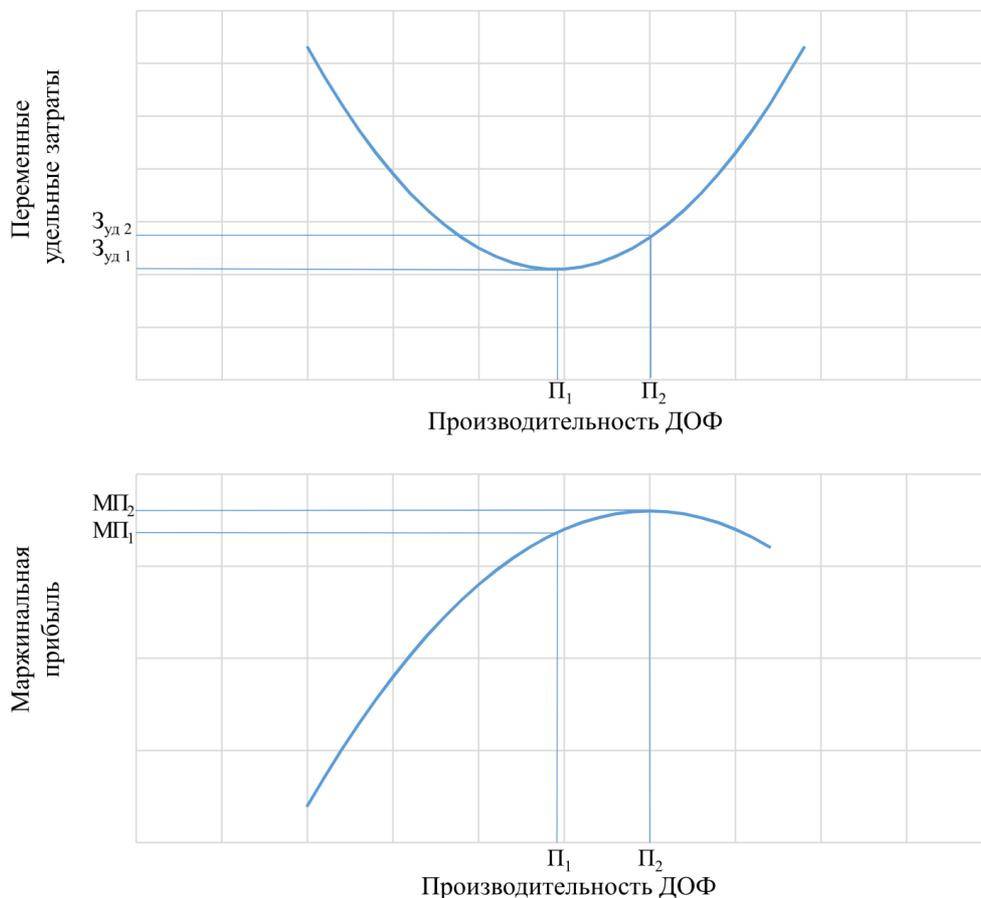
$$y_{j \min} < y_j < y_{j \max}, \quad (5)$$

где  $i = 1 \dots N, j = 1 \dots K$ .

Решение задачи (1)–(5) выполняется при соблюдении следующих технологических ограничений:

- режим работы технологической секции по типу производимого концентрата;
- обеспечение требуемого качества концентрата на выходе;
- состав работающего оборудования;
- потери железа в хвостах;
- расход мелющих тел (шаров, стержней);
- потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

Выполнение вышеуказанных технологических ограничений должно осуществляться с учетом погрешности используемых средств измерений.



**Рис. 1. Зависимости переменных удельных затрат и маржинальной прибыли от производительности**

Приведенный выше подход описывает наиболее общую технико-экономическую постановку задачи оптимизации ДОФ. На практике могут применяться иные упрощенные критерии оптимизации, обусловленные сложившейся рыночной конъюнктурой, технологическими особенностями производства и другими факторами. Одним из таких часто применяемых критериев, который рассмотрен далее, является производительность технологической секции по руде.

## 2. Разработка модели секции ДОФ на основе метода деревьев решений

Для решения поставленной задачи в качестве метода построения модели для управления технологическим процессом производством концентрата на секции ДОФ принят метод деревьев решений.

Для построения и обучения модели управления использованы статистические данные эксплуатации оборудования за два месяца работы технологической секции. Данные эксплуатации разделены на два кластера в зависимости от типа производимого концентрата: «Кластер 1» и «Кластер 2». Для каждого режима работы строится модель управления технологическим процессом. Данные эксплуатации проходят обработку, которая заключается в проверке корректности «сырых» данных.

С целью учета состава работающего оборудования в модель введены комбинированные переменные. В каждый момент времени происходит оценка, результатом которой является вывод о том, какое оборудование находится в работе. В комбинированную переменную производится запись значения параметра оборудования, находящегося в работе.

Модель построена на основе одного из современных алгоритмов Classification and Regression Tree (CART) в среде разработки программного обеспечения для языка программирования R.

На рис. 2 представлен фрагмент модели управления технологическим процессом одной технологической секции по производству железорудного концентрата в первом режиме работы. Во фрагменте модели представлены нормированные значения параметров.

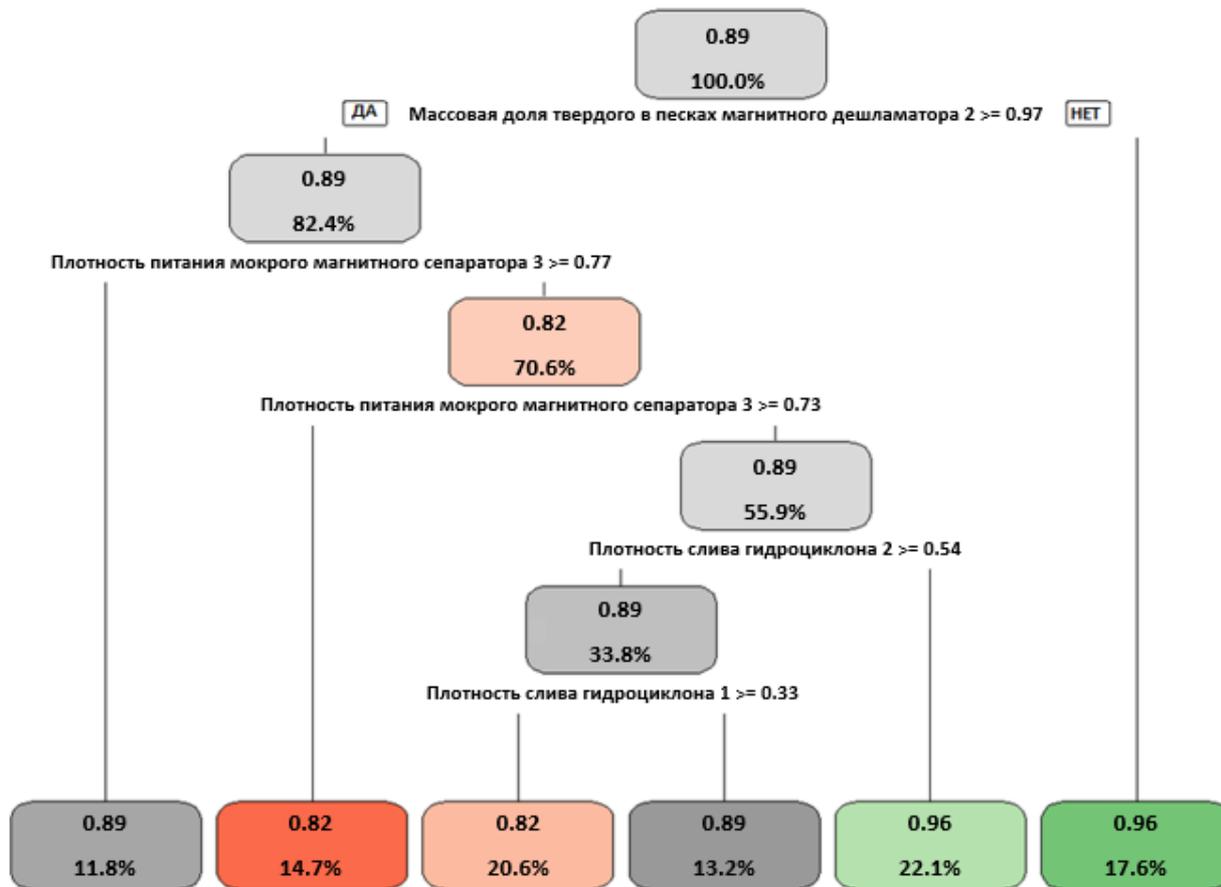


Рис. 2. Фрагмент дерева модели в кластере 1

На рис. 3 проиллюстрирована ошибка предсказанных значений в точках применимости модели на исходных статистических данных за два месяца работы технологической секции. Линиями отмечены границы допустимых отклонений в рамках подкласса.

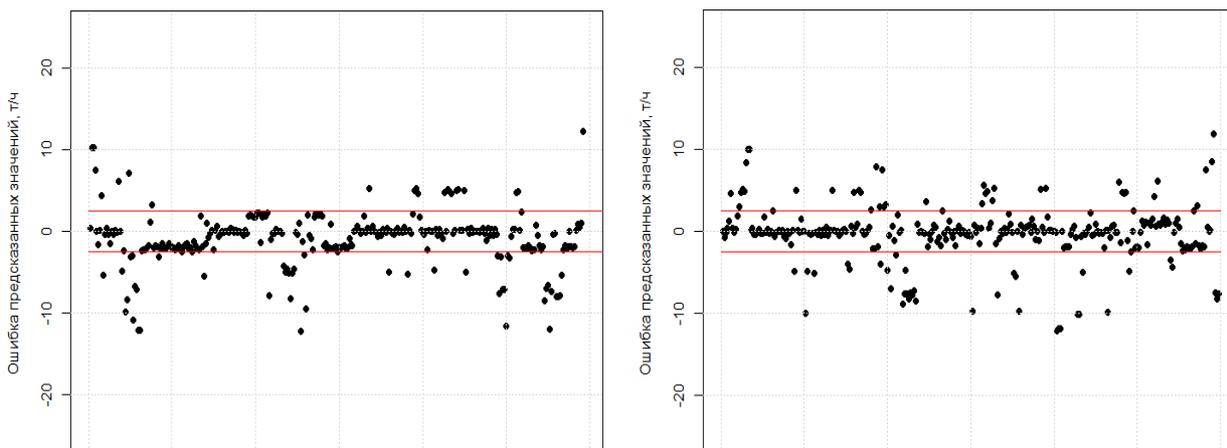


Рис. 3. Ошибка предсказанных значений в первом и во втором кластерах

Надежность модели существенно зависит от количества исходных статистических данных в соответствующем диапазоне изменения производительности и при достаточном наборе представительных данных достигает не менее 70–80 %. По мере накопления статистики надежность модели будет повышаться в более широком диапазоне производительности.

### 3. Методический пример оптимизации секции ДОФ по критерию максимума производительности

Методом оптимизации выбран один из прямых методов оптимизации – метод перебора (метод общего поиска). Главными преимуществами этого метода применимо к данной задаче является независимость поиска решения от вида и характера целевой функции и простота алгоритма поиска глобального максимума функции.

Рассмотрим пример использования модели управления технологическим процессом одной секции ДОФ по производству железорудного первого типа концентрата.

Входными данными для модели являются исходные статистические данные на некоторый момент времени  $t$ , прошедшие проверку на корректность.

На рис. 2 представлен фрагмент модели, необходимый для формирования совета по входным данным для момента времени  $t$ . Каждый лист дерева решений соответствует совету модели. В каждом листе указаны дискретные значения целевой переменной. Исходя из правил в узлах дерева, для каждого совета формируется диапазон допустимых значений управляемых параметров.

Далее производится ряд проверок для выбора «подходящих» советов:

– проверка принадлежности значений неуправляемых параметров диапазону допустимых значений;

– значение параметра «Содержание железа в концентрате» в совете должно быть не меньше фактического значения;

– значение параметра «Производительность» в совете должно быть больше фактического значения.

Аналогичным образом учитываются другие параметры технологического процесса, в том числе потери железа в хвостах, расход мелющих тел и потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

Пример совета модели приведен в таблице. В ней представлены фактические (текущие) значения параметров на момент времени  $t$  и диапазон допустимых значений совета модели. Значения параметров представлены в относительных единицах.

Совет модели

№ п/п	Название параметра	Фактическое значение	Совет модели
1	Производительность	0,82	0,89
2	Содержание железа в концентрате	0,79	0,79
3	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 1	0,98	0,96–1
4	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 2	0,99	$\geq 0,98$
5	Массовая доля твердого в песках магнитного дешламатора 3	0,97	0,97–1
6	Плотность питания мокрого магнитного сепаратора 3	0,75	$< 0,73$
7	Давление пульпы на входе гидроциклона 1	0,87	0,84–0,89
8	Давление пульпы на входе гидроциклона 2	0,90	0,81–0,92
9	Плотность слива гидроциклона 1	0,64	0,54–0,68
10	Плотность слива гидроциклона 2	0,61	$< 0,54$
11	Доля легкообогатимой руды	1,00	1,00
12	Обогатимость руды	0,65	0,45–1,00
13	Содержание железа в дробленой руде	0,72	0,48–0,82
14	Гранулометрический состав руды	0,57	0,42–0,99
15	Содержание железа в руде	0,66	0,39–,89
16	Содержание серы в руде	0,34	0,01–0,70
17	Содержание серы в концентрате	0,24	0,01–0,71

Для достижения максимального расчетного значения производительности технологической секции при данных начальных условиях (текущих значениях параметров) необходимо фактические значения всех управляемых параметров привести к диапазону допустимых значений совета модели.

Согласно приведенному в таблице совету модели для повышения производительности на 7 % необходимо:

- понизить значение параметра «Плотность питания мокрого магнитного сепаратора 3» до значений, входящих в диапазон  $< 0,73$ ;
- понизить значение параметра «Плотность слива гидроциклона 2» до значений, принадлежащих диапазону  $< 0,54$ .

Дообучение модели на новых данных эксплуатации технологического оборудования в процессе работы системы обеспечивает ее адаптивность к изменению параметров технологического процесса с течением времени.

### Выводы

1. В работе предложена в общем виде постановка задачи повышения маржинальной прибыли ДОФ на основе применения оптимизационной модели управления технологическим процессом производством концентрата.

2. Рассмотрено построение математической модели секции ДОФ на основе метода деревьев решений. Результатом моделирования является оценка производительности секции в зависимости от влияния входных управляющих факторов, параметров исходной руды и технологических ограничений, включающих:

- режим работы технологической секции по типу производимого концентрата;
- обеспечение требуемого качества концентрата на выходе;
- состав работающего оборудования;
- потери железа в хвостах;
- расход мелющих тел (шаров, стержней);
- потребление электроэнергии технологическим оборудованием.

3. В работе приведен методический пример применения модели управления технологическим процессом производства железорудного концентрата технологической секции ДОФ с повышением производительности на 7 %.

4. В рамках развития работ планируется на базе предложенного подхода к оптимизации ДОФ выполнить разработку алгоритмического и программного обеспечения системы-советчика, которая позволит в режиме реального времени на основе текущих (фактических) значений параметров секции предоставлять персоналу оперативную информацию о корректировке параметров управления режимами работы технологического оборудования секции ДОФ в зависимости от выбираемого пользователем технического или технико-экономического критерия оптимизации.

### Литература

1. Абрамов, А.А. *Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых* / А.А. Абрамов. – М.: Горная книга, 2012. – 656 с.
2. Серго, Е.Е. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых* / Е.Е. Серго. – М.: Недра, 1985. – 282 с.
3. Андреев, С.Е. *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых* / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
4. Авдохин, В.М. *Основы обогащения полезных ископаемых* / В.М. Авдохин. – М.: Горная книга, 2010. – 417 с.
5. Моркун, В.С. *Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами горно-обогажительными комбинатами* / В.С. Моркун, И.А. Луцевич. – М.: Минерал, 2009. – 261 с.
6. Тихонов, О.Н. *Автоматизация производственных процессов на обогажительных фабриках* / О.Н. Тихонов. – М.: Недра, 1985. – 207 с.
7. Козин, В.З. *Автоматизация производственных процессов на обогажительных фабриках: учеб. для вузов* / В.З. Козин, А.Е. Троп, А.Я. Комаров. – М.: Недра, 1980. – 336 с.

8. Процупто, В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных комбинатов / В.С. Процупто. – М.: Недра, 1987. – 252 с.
9. Принципы построения математических моделей в АСУТП производства железорудных окатышей / А.П. Буткарев, Е.В. Некрасова, Н.Г. Машир, Ю.В. Северин // Сталь. – 1990. – № 3. – С. 15–21.
10. Дюк, В.А. *Data Mining*: учеб. курс / В.А. Дюк, А.П. Самойленко. – СПб.: Питер, 2001. – 368 с.
11. Williams, G. *Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery* / Graham Williams. – USA, Springer, 2011. – 396 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-9890-3\_17
12. Программная реализация метода деревьев решений для реализации задач классификации и прогнозирования / Т.В. Зайцева, Н.В. Васина, О.П. Пусная и др.; НИУ БелГУ // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2013. – № 8 (151), вып. 26/1. – С. 121–127.
13. Бахвалов, Л.А. Построение и оптимизация математических моделей по экспериментальным данным / Л.А. Бахвалов, М.А. Комаров. – М.: Изд-во МГТУ, 1997. – 320 с.
14. Ашихмин, А.А. Разработка и принятие управленческих решений: формальные модели и методы выбора / А.А. Ашихмин. – М.: Изд-во МГТУ, 1995. – 80 с.
15. Краснощёков, П.С. Принципы построения моделей / П.С. Краснощёков, А.А. Петров. – М.: Фазис, 2000. – 400 с.
16. Kazarinov, L.S. *Oblong ellipsoid method in process efficiency control* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2016. – Paper number 7414875. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875
17. Kazarinov, L.S. *Elliptic component analysis* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – Paper number 7910936. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910936
18. Kazarinov, L.S. *Identification method of blast-furnace process parameters* / L.S. Kazarinov, T.A. Barbasova // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
19. Kolesnikova, O.V. *Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics* / O.V. Kolesnikova, L.S. Kazarinov, A.D. Nelubina // Energy Procedia. – 2017. – P. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602
20. Ризаев, И.С. Интеллектуальный анализ данных для поддержки принятия решений / И.С. Ризаев, Я. Рахал. – Казань: Изд-во МОУН РТ, 2011. – 172 с.
21. Соколов, Б.В. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2004. – № 6. – С. 6–16.
22. Ларичев, О.И. Теория и методы принятия решений / О.И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. – 295 с.

**Шнайдер Дмитрий Александрович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shnaiderda@susu.ru.

**Калинина Екатерина Александровна**, аспирант, кафедра автоматизации и управления, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; kalininaea@susu.ru.

*Поступила в редакцию 5 марта 2019 г.*

## PRODUCTIVITY INCREASING OF THE CRUSHING AND BENEFICIATION PLANT BASED ON THE OPTIMIZATION MODEL

D.A. Shnayder, shnaiderda@susu.ru,

E.A. Kalinina, kalininaea@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Due to the fact that the demand for iron-ore pellets in the Russian and international markets is high, the task of increasing the volume of iron-ore concentrate production while providing required quality is urgent. The paper sets a general engineering-and-economical target to improve crushing and ore beneficiation plant (CBP) operation by the criterion of maximum marginal profit of the enterprise. The task is solved by observing technological constraints according to the regime of the technological unit operation, type of the produced concentrate, the provision of the required quality of the concentrate at the end of the process, the equipment configuration and other parameters. The specific task of increasing efficiency of the technological unit of the CBP by means of optimization of the equipment operation has been thoroughly considered. Traditionally such tasks are solved by applying a physical and chemical model coupled with experimental research of the technological process. The paper presents the approach based on the application of the optimization mathematical model, developed using intellectual analysis of statistical data – Data Mining. To develop the model, the method of decision tree was used. The search method is used to find the best decision in terms of the chosen criterion. Modelling results in evaluation of the unit efficiency depending on the influence of an input controlling factor, parameters of the base ore, as well as technological constraints. A methodological example of applying the model of control over the technological process of iron-ore concentrate production at the technological unit of the grinding and pellet plant with the increased efficiency of up to 7% was provided. Practical implementation of the proposed approach will allow the operator to obtain recommendations about correcting the control parameters of the technological equipment operation using the existing automated control system in a real time mode at the unit of the DOF, taking into account current conditions of the technological process.

*Keywords: crushing and beneficiation plant, Data Mining, decision trees.*

### References

1. Abramov A.A. *Pererabotka, obogashcheniye i kompleksnoye ispol'zovaniye tverdykh poleznykh iskopayemykh* [Processing, Enrichment and Comprehensive Utilization of Solid Minerals]. Moscow, Gornaya kniga, 2012. 656 p.
2. Sergo E.E. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, Grinding and Screening of Minerals]. Moscow, Nedra, 1985. 282 p.
3. Andreyev S.E., Zverevich V.V., Perov V.A. *Drobleniye, izmel'cheniye i grokhocheniye poleznykh iskopayemykh* [Crushing, Grinding and Screening of Minerals]. Moscow, Nedra, 1980. 415 p.
4. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Fundamentals of Mineral Processing]. Moscow, Gornaya kniga, 2010. 417 p.
5. Morkun V.S., Lutsevich I.A. *Adaptivnyye sistemy optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami gorno-obogatitel'nyimi kombinatami* [Adaptive Systems of Optimal Control of Technological Processes at Mining and Processing Plants]. Moscow, Mineral, 2009. 261 p.
6. Tikhonov O.N. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na obogatitel'nykh fabrikakh* [Automation of Production Processes at the Processing Plants]. Moscow, Nedra, 1985. 207 p.
7. Kozin V.Z., Trope A.E., Komarov Y.A. *Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na obogatitel'nykh fabrikakh: ucheb. dlya vuzov* [Automation of Production Processes at the Processing Plants. Textbook for Universities]. Moscow, Nedra, 1980. 336 p.
8. Protsuto V.S. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh kombinatov* [Automated Control Systems of Technological Processes in Concentrating Plants]. Moscow, Nedra, 1987. 252 p.

9. Bochkarev A.P., Nekrasov E.V., Mashir N.G., Siverin Yu.V. [Principles of Construction of Mathematical Models in Process Control Production of Iron ore Pellets]. *Steel*, 1990, no. 3, pp. 15–21. (in Russ.)
10. Duke V., Samoilenko A.P. *Data Mining: a Training Course*. St. Petersburg, Piter, 2001. 368 p.
11. Williams, Graham. *Data Mining with Rattle and R: The Art of Excavating Data for Knowledge Discovery*. USA, Springer, 2011. 396 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-9890-3\_17
12. Zaytseva T.V., Vasina N.V., Pusnaya O.P. et al. [Software Implementation of the Method of Decision Trees for Implementation of Tasks of Classification and Prediction]. *Scientific Statement BSU. Ser. History. Political Science. Economics. Informatics*, 2013, no. 8 (151), iss. 26/1, pp. 121–127. (in Russ.)
13. Bakhvalov L.A., Komarov M.A. *Postroyeniye i optimizatsiya matematicheskikh modeley po eksperimental'nykh dannym* [Development and Optimization of Mathematical Models from Experimental Data]. Moscow, Publishing house of Moscow State Mining University, 1997. 320 p.
14. Ashihmin A.A. *Razrabotka i prinyatiye upravlencheskikh resheniy: formal'nyye modeli i metody vybora* [Elaboration and Making of Managerial Decisions: Formal Models and Selection Methods]. Moscow, MGU State Publishing House, 1995. 80 p.
15. Krasnoshchekov P.S., Petrov A.A. *Printsipy postroyeniya modeley* [Principles of Creation of Models]. J. Moscow, Fazis, 2000. 400 p.
16. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Oblong Ellipsoid Method in Process Efficiency Control. *2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2016, paper number 7414875. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414875
17. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic Component Analysis. *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, paper number 7910936. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910936
18. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Identification Method of Blast-Furnace Process Parameters. *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 685, pp. 137–141. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.137
19. Kolesnikova O.V., Kazarinov L.S., Nelubina A.D. Identification of the Efficient Manufacturing Characteristics. *Energy Procedia*, 2017, vol. 134, pp. 79–88. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.602
20. Rizaev I.S., Rakhhal Ya. *Intellectual'nyy analiz dannykh dlya podderzhki prinyatiya resheniy* [Intellectual Data Analysis for the Support of Decision Making]. Kazan, Publishing House of the Ministry of Education of the Republic of Tatarstan, 2011. 172 p.
21. Sokolov B.V., Yusupov R.M. [The Conceptual Bases for Assessment and Analysis of Quality Models and Polymodel Complexes]. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*, 2004, no. 6, pp. 6–16. (in Russ.)
22. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy* [Theory and Methods of Decision-Making]. Moscow, Logos, 2000. 295 p.

**Received 5 March 2019**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шнайдер, Д.А. Повышение производительности дробильно-обогащительной фабрики на основе оптимизационной модели / Д.А. Шнайдер, Е.А. Калинина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 156–164. DOI: 10.14529/ctcr190315

### FOR CITATION

Shnayder D.A., Kalinina E.A. Productivity Increasing of the Crushing and Beneficiation Plant Based on the Optimization Model. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 156–164. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr190315