

Многокритериальная модель процесса дробления горных пород

Юрий В. Бугаев	¹	y_bugaev52@mail.ru
Людмила А. Коробова	¹	lyudmila_korobova@mail.ru
Ирина С. Толстова	¹	irin2102ka@mail.ru
Юлия А. Демина	¹	yulechka.demina@list.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье говорится о модернизации и наладке процесса измельчения тонкодисперсного мела. Процесс дробления энергозатратная процедура, ежегодно тратится около 5% всей вырабатываемой на Земле энергии, в том числе энергия двигателей внутреннего сгорания. Это говорит о его большой значимости. Помимо затрат на электричество, большие расходы идут на ремонт оборудования. Наибольшие замены производятся на основные рабочие части машин. В ходе замен тратится много времени, для того, чтобы не расходовать этот довольно важный ресурс, необходимо к данной процедуре подходить с научной точки зрения. Организация и проведение исследований по замене основных рабочих частей дробилок и мельниц позволит увеличить производительность основного оборудования, улучшить качество готового продукта и уменьшить затраты на производство в плане энергосбережения. Модернизация и наладка технологического оборудования в целях совершенствования процесса производства тонкодисперсного мела значительно увеличить срок службы основного оборудования. Для этого предлагается провести активный эксперимент. Перед проведением эксперимента, необходимо, задать модель. Классический регрессионный анализ основан на предположении, что вид модели априори задан с точностью до параметров, а также, что уже реализован эксперимент, поставляющий исходные данные для построения регрессии. Отсюда проблема сводится к выбору наилучшего метода обработки данных. В данной работе нами предлагается принципиально новый подход – автоматическое оценивание вариантов модели по комплексу показателей, в результате расчёта которого строится множество парето-оптимальных вариантов модели. Предложенный метод позволил выделить из 16384 альтернативных вариантов два наилучших. Очевидно, данный подход можно легко модифицировать для любого другого набора критериев качества регрессионной модели.

Ключевые слова: дробление, энергозатраты, регрессионный анализ, модернизация, наладка

Multicriteria model of the process of crushing rock

Yurij V. Bugaev	¹	y_bugaev52@mail.ru
Lyudmila A. Korobova	¹	lyudmila_korobova@mail.ru
Irina S. Tolstova	¹	irin2102ka@mail.ru
Yuliya A. Demina	¹	yulechka.demina@list.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article deals with the modernization and adjustment of the fine chalk grinding process. The crushing process is an energy-consuming procedure, annually spent about 5% of all energy produced on Earth, including the energy of internal combustion engines. This indicates its great importance. In addition to the cost of electricity, large expenses go to repair the equipment. The greatest replacements are made on the main working parts of machines. In the course of substitutions a lot of time is spent, in order not to spend this rather important resource, it is necessary to approach this procedure from a scientific point of view. The organization and conduct of research on the replacement of the main working parts of crushers and mills will increase the productivity of the main equipment, improve the quality of the finished product and reduce production costs in terms of energy saving. Modernization and adjustment of technological equipment in order to improve the production process of fine chalk significantly increase the service life of the main equipment. For this purpose, it is proposed to conduct an active experiment. Before carrying out the experiment, it is necessary to set the model. The classical regression analysis is based on the assumption that the model type is a priori specified with accuracy to the parameters, and that an experiment has already been implemented that supplies the initial data for the regression construction. Hence, the problem is to choose the best method of data processing. In this paper, we propose a fundamentally new approach-automatic evaluation of the model options on a set of indicators, the calculation of which is based on a set of pareto-optimal variants of the model. The proposed method made it possible to identify two best alternatives out of 16384. Obviously, this approach can be easily modified for any other set of regression model quality criteria.

Keywords: crushing, energy consumption, regression analysis, modernization, adjustment.

Введение

Установлено, что на процесс дробления ежегодно тратится около 5% всей вырабатываемой на Земле энергии, в том числе энергия двигателей внутреннего сгорания. Этот большой

процент в общем энергетическом балансе показывает значимость использования процедур дробления [5]. Наибольшая сложность в процессе измельчения, например, мела –увеличенные затраты на электроэнергию.

Для цитирования

Бугаев Ю.В., Коробова Л.А., Толстова И.С., Демина Ю.А. Многокритериальная модель процесса дробления горных пород // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 111–115. doi:10.20914/2310-1202-2018-4-111-115

For citation

Bugaev Yu.V., Korobova L.A., Tolstova I.S., Demina Yu.A. Multicriteria model of the process of crushing rock. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 111–115. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-4-111-115

Помимо затрат на электричество, довольно большие расходы идут на ремонт оборудования. Дробилки и мельницы не являются быстросменяемыми машинами. Наибольшие замены приходится на основные рабочие части машин. В ходе замен тратится много времени. Для того чтобы не расходовать этот довольно важный ресурс, необходимо к данной процедуре подходить с научной точки зрения [6-11].

Организация и проведение исследований по замене основных рабочих частей дробилок и мельниц позволит увеличить производительность основного оборудования, улучшить качество готового продукта и уменьшить затраты на производство в плане энергосбережения. Модернизация и наладка технологического оборудования в целях усовершенствования процесса производства тонкодисперсного мела значительно увеличить срок службы основного оборудования. Для этого предлагается провести активный эксперимент. Перед проведением эксперимента необходимо задать модель.

Основная часть

Классический регрессионный анализ основан на предположении, что вид модели априори задан с точностью до параметров, а также что уже реализован эксперимент, поставляющий исходные данные для построения регрессии. Отсюда проблема сводится к выбору наилучшего метода обработки данных. Однако камнем преткновения, является неопределённость в выборе структуры регрессионной модели. Обычно в качестве аппроксимирующей используются функции либо легко вычисляемые, либо подходящие по физическому смыслу задачи. Например, если описывается некоторый периодический процесс (звуковые колебания или иные схожие явления), то естественно искать модель среди тригонометрических функций. Часто при аппроксимации используется многочлен. Вторая проблема состоит в репрезентативном выборе множества независимых переменных. В итоге существуют две противоположные тенденции для выбора окончательного уравнения.

1. Желание сделать уравнение максимально полезным и надёжным для прогноза принуждает нас включать в него как можно больше переменных.

2. Ограничения, связанные с затратами при получении и контроле информации, а также нежелательные эффекты, связанные с «перепараметризацией» модели, заставляют нас максимально упростить модель.

Приведённые соображения свидетельствуют о том, что окончательный выбор структуры уравнения регрессии является весьма непростой и трудоёмкой задачей. Большинство эффективных методов, подтверждённых многолетней практикой построения наилучшей модели, описано в классической монографии Н. Дрейпера и Н. Смита [1].

1. Метод К-подмножества [2]. Рассчитываются три критерия качества модели: коэффициент детерминации R^2 , остаточный средний квадрат s^2 , и C_p -статистика Маллоуза, но выбор наилучшего варианта производится на основе какого-то одного показателя.

2. Метод исключения. Исключение производится на основе минимального значения критерия Стьюдента для соответствующего члена модели.

3. Шаговый регрессионный метод. Шаги производятся в обратном направлении по отношению к методу исключения, т. е. последовательно включая члены.

4. Комбинации перечисленных методов.

5. ПРЕСС-процедура Д.М. Аллена [3], представляющая собой вариант метода всех регрессий.

В качестве оценки эффективности методов можно высказать следующее.

Метод 1 перебирает значительное число вариантов, и, видимо, является наиболее надёжным, но его недостаток в том, что выбор основан на одном показателе, который в любом случае лишь частично характеризует модель. Прочие методы используют ручной перебор, а значит – сокращённый. Поэтому нет гарантии, что был рассмотрен лучший вариант. Кроме того, высока их трудоёмкость.

Выбор наилучшей модели затруднён тем, что её эффективность можно оценивать по многим критериям, число которых может доходить до нескольких десятков. Весьма типичным является случай, когда эти показатели находятся в конфликте, иными словами, модель, лучшая по одним показателям, не является таковой по другим.

Обсуждение

В данной работе нами предлагается принципиально новый подход – автоматическое оценивание вариантов модели по комплексу показателей, в результате расчёта которого строится множество Парето-оптимальных вариантов модели.

Рассмотрим этот подход на примере построения модели, оценивающей качество работы дробилки мела, широко используемой в производстве строительных материалов.

В качестве выходного параметра используем производительность дробилки, в качестве входных факторов:

- 1) X_1 – зазор между бронью и молотком (5–15 мм);
- 2) X_2 – число оборотов двигателя (1500–2000 об/мин);
- 3) X_3 – твердость материала лопаток в зависимости от марки сплава (40–60);
- 4) X_4 – средний размер исходного сырья (40–200 мм).

Априори была выбрана квадратичная модель. Вопрос вызывает только присутствие в ней того или иного парного произведения факторов. В качестве плана эксперимента был взят модифицированный план B_4 [4], в котором добавили одну экспериментальную точку в центре плана. Это было сделано для улучшения характеристики по величине дисперсии МНК-прогноза в центральной части области планирования. В безразмерном виде матрица плана имела вид:

№	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3
1	-1	-1	-1	-1	24,6	22,4	23,1
2	1	-1	-1	-1	25,8	24,5	25
3	-1	1	-1	-1	14,2	14	14,7
4	1	1	-1	-1	22,7	22,7	22,1
5	-1	-1	1	-1	25,1	23,1	23,8
6	1	-1	1	-1	25,2	24,8	25
7	-1	1	1	-1	14,8	15,7	13,8
8	1	1	1	-1	22,7	23,6	23,2
9	-1	-1	-1	1	23	22,4	23
10	1	-1	-1	1	24,4	22,7	22,1
11	-1	1	-1	1	16,4	17	15,6
12	1	1	-1	1	24,5	22,4	23,8
13	-1	-1	1	1	23	22,5	23,3
14	1	-1	1	1	23,4	23	24,8
15	-1	1	1	1	16,4	15,9	15,9
16	1	1	1	1	23,4	24	24,2
17	-1	0	0	0	22,7	22,3	22,4
18	1	0	0	0	28,4	27,4	27,3
19	0	-1	0	0	26,6	28,1	27,2
20	0	1	0	0	23,7	22,6	22,7
21	0	0	-1	0	25,4	25	25,3
22	0	0	1	0	24,7	24,7	24,9
23	0	0	0	-1	26,3	25,4	26
24	0	0	0	1	26,1	25,7	25,3
25	0	0	0	0	25,8	26,4	26,1

В качестве исходных параметров модели задавалось m – максимальное число предикторных (независимых) переменных и n – максимальная

степень многочлена, соответствующего уравнению регрессии. При таких данных максимальное количество коэффициентов модели, включая свободный член, определяется числом n -сочетаний с повторениями из $(m + 1)$ предметов и равно $K = C_{m+n}^n$. Соответственно общее число рассматриваемых моделей при условии присутствия в каждой формуле свободного члена равно $M = 2^K - 1$. Для рассматриваемого примера $K = 15$, а $M = 16384$.

Каждый вариант модели оценивался по следующим критериям:

- дисперсия адекватности

$$s_{\text{АДЕКВ}}^2 = \frac{L}{N - k} \sum_i (\hat{y}_i - y_{ij})^2,$$

оценивающая среднее отклонение расчётных значений откликов от средних по параллельным опытам;

- расчётное значение критерия Фишера

$$F_{\text{ЭФФ}}^{\text{ВЫЧ}} = \frac{Q_{\text{РЕГР}} / (k - 1)}{Q_{\text{ОСТАТ}} / (N - k)},$$

оценивающее эффективность модели;

- величина отношения $k^{\text{ЭФФ}} = \frac{F_{\text{ЭФФ}}^{\text{ВЫЧ}}}{F_{\text{КРИТ}}}$,

показывающая превышение расчётного значения критерия Фишера над его граничным значением;

- коэффициент адекватности, равный 0, если модель статистически адекватна согласно критерию Фишера и 1 в противном случае;

- U -доля значимых по Стьюденту коэффициентов среди присутствующих в данном варианте модели.

Кроме того, для поддержки окончательного выбора наилучшего варианта рассчитывались следующие вспомогательные показатели:

- расчётные значения критерия Стьюдента для каждого коэффициента для оценки его значимости;
- расчётное значение критерия Фишера

$$F_{\text{АДЕКВ}}^{\text{ВЫЧ}} = \frac{s_{\text{АДЕКВ}}^2}{s_{\text{ВОСПР}}^2} \quad \text{для оценки статистической}$$

адекватности модели;

- расчётное значение критерия Кохрена для проверки однородности точечных дисперсий

$$s_i^2 = \frac{1}{L - 1} \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2;$$

- величина дисперсии воспроизводимости

$$s_{\text{ВОСПР}}^2 = \frac{1}{N} \sum_i s_i^2.$$

На основании анализа каждого уравнения программа оптимизации по Парето выбрала два

нехудших варианта, которые в безразмерных переменных имеют вид:

$$Y1 = 26.42486 + 2.259259X1 - 2.207407X2 - 1.395669X1^2 + 1.739583X1X2 - 0.2020833X1X4 - 1.329002X2^2 + 0.6270833X2X4 - 1.479002X3^2 - 0.6790019X4^2,$$
$$Y2 = 26.42486 + 2.259259X1 - 2.207407X2 + 0.1129629X3 - 1.395669X1^2 + 1.739583X1X2 - 0.2020833X1X4 - 1.329002X2^2 + 0.6270833X2X4 - 1.479002X3^2 - 0.6790019X4^2.$$

Заключение

Таким образом, предложенный метод позволил выделить из 16 384 альтернативных вариантов два наилучших. Очевидно, данный

подход можно легко модифицировать для любого другого набора критериев качества регрессионной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1 Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 2. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.

2 Furnival G.M., Wilson R.W. Regressijn dy leaps and bounds // *Technometrics*. 1974. № 16. P. 499–511.

3 Allen D.M. The prediction sum of squares as a criterion for selecting predictor variables // University of Kentucky, Department of Statistics, Technical Report. 1971. № 23.

4 Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. и др. Планирование экспериментов в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

5 Коробова Л.А., Толстова И.С., Лихущин А.П., Демина Ю.А. Алгоритм выбора дробильного оборудования для измельчения мела // Моделирование энергоинформационных процессов: сборник материалов IV и V Международных научно-практических интернет-конференций. 2017. С. 263–267.

6 Коробова Л.А., Толстова И.С., Демина Ю.А. Настройка технологического оборудования // *Аллея науки*. 2018. Т. 3. № 8 (24). С. 728–732.

7 Kuriakose S., Shunmugam M.S. Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by non-dominated sorting genetic algorithm // *Journal of materials processing technology*. 2005. V. 170. № 1–2. P. 133–141.

8 Queipo N.V., Haftka R.T., Shyy W., Goel T. et al. Surrogate-based analysis and optimization // *Progress in aerospace sciences*. 2005. V. 41. № 1. P. 1–28.

9 Amanifard N., Nariman-Zadeh N., Borji M., Khalkhali A. et al. Modelling and Pareto optimization of heat transfer and flow coefficients in microchannels using GMDH type neural networks and genetic algorithms // *Energy Conversion and Management*. 2008. V. 49. № 2. P. 311–325. doi: 10.1016/j.enconman.2007.06.002

10 Zhang Y.P., Zhang Y.J., Gong W.J., Gopalan A.I. et al. Rapid separation of Sudan dyes by reverse-phase high performance liquid chromatography through statistically designed experiments // *Journal of Chromatography A*. 2005. V. 1098. № 1–2. P. 183–187. doi: 10.1016/j.chroma.2005.10.024

11 Tarapata Z. Selected multicriteria shortest path problems: An analysis of complexity, models and adaptation of standard algorithms // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2007. V. 17. № 2. P. 269–287.

REFERENCES

1 Draper N., Smith G. *Prikladnoj regressiionnyj analiz. Kniga 2* [Applied Regression Analysis. Book 2]. Moscow, Finance and Statistics, 1987. 351 p. (in Russian)

2 Furnival G.M., Wilson R.W. Regressijn dy leaps and bounds. *Technometrics*. 1974. no. 16. pp. 499–511.

3 Allen D.M. The prediction sum of squares as a criterion for selecting predictor variables. University of Kentucky, Department of Statistics, Technical Report. 1971. no. 23.

4 Hartman K., Letsky E., Scheffer V. et al. *Planirovanie ehksperimentov v issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Planning of experiments in the study of technological processes]. Moscow, Mir, 1977. 552 p. (in Russian)

5 Korobova L.A., Tolstova I.S., Lihushin A.P., Demina Yu.A. *Algoritm vybora drobil'nogo oborudovaniya dlya izmel'cheniya mela* [Modeling of energy-information processes: a collection of materials of the IV and V International Scientific and Practical Internet Conferences]. 2017. pp. 263–267. (in Russian)

6 Korobova L.A., Tolstova I.S., Demina Yu.A. Adjustment of technological equipment. *Alleya nauki* [Alley of science]. 2018. vol. 3. no. 8 (24). pp. 728–732. (in Russian)

7 Kuriakose S., Shunmugam M.S. Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of materials processing technology*. 2005. vol. 170. no. 1–2. pp. 133–141.

8 Queipo N.V., Haftka R.T., Shyy W., Goel T. et al. Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in aerospace sciences*. 2005. vol. 41. no. 1. pp. 1–28.

9 Amanifard N., Nariman-Zadeh N., Borji M., Khalkhali A. et al. Modelling and Pareto optimization of heat transfer and flow coefficients in microchannels using GMDH type neural networks and genetic algorithms. *Energy Conversion and Management*. 2008. vol. 49. no. 2. pp. 311–325. doi: 10.1016/j.enconman.2007.06.002

10 Zhang Y.P., Zhang Y.J., Gong W.J., Gopalan A.I. et al. Rapid separation of Sudan dyes by reverse-phase high performance liquid chromatography through statistically designed experiments. *Journal of Chromatography A*. 2005. vol. 1098. no. 1–2. pp. 183–187. doi: 10.1016/j.chroma.2005.10.024

11 Tarapata Z. Selected multicriteria shortest path problems: An analysis of complexity, models and adaptation of standard algorithms. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2007. vol. 17. no. 2. pp. 269–287.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий В. Бугаев д.ф.-м.н., профессор, Кафедра высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, y_bugaev52@mail.ru

Людмила А. Коробова к.т.н., доцент, Кафедра высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, lyudmila_korobova@mail.ru

Ирина С. Толстова ст. преподаватель, Кафедра высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, irin2102ka@mail.ru

Юлия А. Демина студент, Кафедра высшей математики и информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yulechka.demina@list.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 22.09.2018

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 07.11.2018

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yurij V. Bugaev Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, higher mathematics and information technology department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, y_bugaev52@mail.ru

Lyudmila A. Korobova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, higher mathematics and information technology department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, lyudmila_korobova@mail.ru

Irina S. Tolstova senior lecturer, higher mathematics and information technology department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, irin2102ka@mail.ru

Yuliya A. Demina student, higher mathematics and information technology department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yulechka.demina@list.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 9.22.2018

ACCEPTED 11.7.2018