

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 662.74.012:658.562

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>СОПОСТАВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА КОКСА M_{25} И M_{10}

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И.

Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация

Постановка задачи (актуальность работы): в статье рассмотрены современные математические модели структурного типа [1] для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , которые используются для теоретических исследований и в практической деятельности коксохимических предприятий России. Для рассматриваемых моделей приведены к единому виду их точности прогнозирования и произведено сопоставление с требованием ГОСТ 5953-93 «Кокс с размером кусков 20 мм и более. Определение механической прочности» (ИСО 556-80). **Цель работы:** сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , исходя из точности их прогнозирования. **Используемые методы:** проведена статистическая оценка доверительных интервалов попадания ошибки прогнозирования математических моделей для показателей качества кокса M_{25} и M_{10} . На основе длины доверительного интервала при различных доверительных вероятностях делались выводы относительно точности прогнозирования. **Новизна:** возможность верификации математических моделей при прогнозировании показателей качества кокса M_{25} и M_{10} , основываясь на том, что точность прогнозирования по модели не должна превосходить допустимое расхождение между двумя параллелями при определении показателей качества кокса по ГОСТ 5953. **Результат:** в статье приведено сравнение точностей прогнозирования различных математических моделей структурного типа, которое позволило проанализировать адекватность математических моделей. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для теоретических исследований и в практической деятельности коксохимических предприятий России.

Ключевые слова: кокс, показатели качества кокса, математическая модель, классификация по внутренней структуре и алгоритму построения, структурная модель.

Введение

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных моделированию и прогнозированию показателей качества кокса для различных коксохимических предприятий России [1]. Тем не менее достаточно сложно выбрать ту или иную модель для моделирования и исследования, поскольку даже по такому параметру, как их точность прогнозирования отсутствуют единый критерий оценки. Это объясняется тем, что на практике авторы большинства работ мало уделяют внимания проверке математических моделей с точки зрения их точности прогнозирования. В данной статье проанализированы самые распространённые структурные математические модели [2–13] и выполнена оценка точности их прогноза. Точности прогнозирования рассмотренных моделей приведены к единому виду и сопоставлены с требованием ГОСТ 5953-93 «Кокс с раз-

мером кусков 20 мм и более. Определение механической прочности» (ИСО 556-80).

Методы исследования точности прогнозирования математических моделей

В качестве оценки точности прогноза модели мы использовали доверительный интервал ε_{α}^1 единичного результата нахождения ошибки прогнозирования Δ , который вычисляется как разность между фактическим значением показателя качества кокса и его прогнозом по уравнению модели. Методика расчёта доверительных интервалов приводится, например, в [14].

Определимся со значением доверительной вероятности α . Из-за возможных сбоев в работе КХП поддерживается не 100% равномерность, это идеальный случай, а, например, 95%. С 95% доверительной вероятностью оценивается точность прогнозирования в моделях [6–9]. С другой стороны, если при статистической оценке речь идёт о жизни

© Смирнов А.Н., Алексеев Д.И., 2017

¹ α – это доверительная вероятность P .

и здоровье человека или больших материальных ценностях, то корректно задаваться не 95% доверительной вероятностью, а исходить из 99% доверительной вероятности. Само по себе производство кокса в сравнении с другим сырьём, используемым в доменной плавке, является дорогостоящим, и это без учёта масштабов использования кокса в доменном процессе, поэтому при оценке точности математической модели, логично исходить из 99% доверительной вероятности. В данной работе, с учётом вышесказанного, расчёт интервалов попадания ошибки прогнозирования Δ выполнен с доверительными вероятностями P , равными 95 и 99%.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе [15] приводятся данные о точности прогнозирования моделей, рассмотренных в ранних работах [2, 4], которые показали низкую прогнозирующую способность этих моделей. В одной из последних моделей [6], являющейся правопреемницей [2–5], была достигнута высокая точность прогнозирования. В статье [6] приводится по два уравнения для расчёта показателей M_{40} и M_{10} , исходя из учёта технологии подготовки шихт пневмомеханической сепарацией или без неё. После проверочного расчёта для 110 шихт, коксовавшихся на 2-м блоке ОАО НТМК в 2000–2004 гг., было определено, что среднеквадратичное отклонение для ошибки прогноза показателей M_{40} и M_{10} составило для одной из пар уравнений 1,01 и 0,35%, а для второй пары уравнений 0,89 и 0,34% соответственно. Большая точность прогнозирования была достигнута для второй пары уравнений, которая при доверительной вероятности 95% «...соответствует точности прогноза показателя прочности по M_{40} на уровне 1,78 и по M_{10} 0,68%» [6].

Величину возможного отклонения $\varepsilon_{0,95}$ и $\varepsilon_{0,99}$ при доверительных вероятностях 95 и 99% для лучшей пары уравнений² [15] рассчитали, исходя из того, что ошибка прогнозирования Δ в работе [6] распределена по нормальному закону и её среднее значение $\bar{\Delta}$ при большом числе прогнозирования стремится к нулю³:

для M_{40} :

$$\varepsilon_{0,95} = t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 109) \cdot S(\Delta) = 1,982 \cdot 0,89 = 1,76\%, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{0,99} = t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,99; 109) \cdot S(\Delta) = 2,622 \cdot 0,89 = 2,33\%; \quad (2)$$

для M_{10} :

$$\varepsilon_{0,95} = t(0,95; 109) \cdot S(\Delta) = 1,982 \cdot 0,34 = 0,67\%, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{0,99} = t(0,99; 109) \cdot S(\Delta) = 2,622 \cdot 0,34 = 0,89\%. \quad (4)$$

Рассчитанные доверительные интервалы в (1)–(4) для M_{40} и M_{10} означают, что при использовании математической модели, при её единичном прогнозе, ошибка прогнозирования будет находиться в соответствующем интервале, например, при единичном прогнозе по модели для M_{40} ошибка прогнозирования Δ с вероятностью 99% будет находиться в интервале $\pm 2,33\%$. В [9] для подтверждения адекватности вновь построенной модели предлагается сравнивать длину доверительного интервала со значением расхождения двух параллельных определений параметров M_{25} или M_{10} по ГОСТ 5953. Если длина доверительного интервала меньше разницы параметров M_{25} или M_{10} в параллельных пробах, то модель следует признать адекватной и работоспособной. Максимальное расхождение для параметра M_{40} и M_{10} при определении в двух параллелях составляет 3,0 и 1,0% соответственно. Таким образом, модель [6] с учётом рассчитанных по формулам (2) и (4) интервалов с доверительной вероятностью 99% имеет высокую отказоустойчивость и пригодна для использования в экономических расчётах.

Полученные результаты (1)–(4) для модели [6], и по сути аналогичной [7–9], сопоставимы с прогнозирующей способностью другой модели структурного типа [10–13], проверим её адекватность, исходя из ГОСТ 5953.

В работах [10–13], по нашему мнению, можно выделить два подхода к прогнозированию. В одном случае используются индексы отношения $K_{от}$ и коксуемости K , а в другом – микропрочность испытуемого угля B . Индексы $K_{от}$ и K , которые используются в первом подходе к моделированию, не будем подробно рассматривать, так как их физический смысл, достоинства и недостатки, по нашему мнению, аналогичны соответствующим коэффициентам из моделей [2–9], хотя хронологически они появились ранее в [10].

Микропрочность испытуемого угля B , используемая во втором подходе, определяется по формуле [13]

$$B = 100 / M_{10}. \quad (5)$$

Суммарную микропрочность в шихте предлагается учитывать как сумму взаимодействий каждого отдельного угля между одноименными и разноимёнными марками. Для n -компонентной шихты выражение для B будет иметь вид [13]

² По всей видимости, авторы работы [6], ввиду большого объёма выборки, при аналогичных расчётах воспользовались правилом «2-х сигм», что в данном случае, оправданно.

³ Прогноз по модели может быть как больше, так и меньше истинного значения, то есть ошибка Δ принимает как положительные, так и отрицательные значения.

$$B = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot B_{ii} + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i \cdot a_j \cdot B_{ij}, \quad (6)$$

где a_i, a_j – массовая доля угля в смеси; B_{ii} – прочность спекания фрагментов кокса из индивидуальных углей; B_{ij} – прочность спекания фрагментов кокса из i -й и j -й марки углей.

Суммарная массовая доля всех углей в n -компонентной шихте составит

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (7)$$

В отличие от моделей [2–9], в которых все стороны характеризовались начальное состояние (характеристика углей), а затем конечное, без описания происходящего процесса, в уравнениях (5)–(7) закладывается именно процесс коксования, взаимодействия углей между собой (B_{ij}). Упрощение в такой модели состоит в том, что учитываются только взаимодействия между двумя сортами углей, а не тремя, четырьмя, ..., n сортами в n компонентной шихте.

Для оценки прогнозирующей способности модели, основанной на коэффициентах $K_{от}$ и K , воспользуемся данными, приведенными в работе [12]:

$$\begin{aligned} M_{25} &= 36,60 + 0,1602 \cdot G; \\ N &= 31; S(\Delta) = 1,2; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{10} &= 58,58 - 0,1523 \cdot G; \\ N &= 41; S(\Delta) = 1,6, \end{aligned} \quad (9)$$

где G – остаток в большом колосниковом барабане, рассчитываемый с помощью $K_{от}$ и K , кг; $S(\Delta)$ – оценка среднеквадратического отклонения ошибки прогнозирования; N – количество раз сопоставления результатов коксования и прогнозирования.

Для модели [12] найдём доверительную ошибку для результата единичного измерения Δ при вероятностях 95 и 99%⁴:

для M_{25} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 30) \cdot S(\Delta) = \\ &= 2,04 \cdot 1,2 = 2,45\%; \quad \varepsilon_{0,99} = 3,30\%; \end{aligned} \quad (10)$$

для M_{10} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 40) \cdot S(\Delta) = \\ &= 2,02 \cdot 1,6 = 3,23\%; \quad \varepsilon_{0,99} = 4,32\%. \end{aligned} \quad (11)$$

⁴ При расчётах полагали, что модель [12] не имеет систематической ошибки, то есть она в среднем не занижает и не завышает прогнозируемое значение, математическое ожидание ошибки прогнозирования Δ в пределе от количества прогнозирований стремится к нулю, и она имеет нормальное (гауссово) распределение.

По ГОСТ 5953 при трёх параллельных испытаниях расхождения между параллелями для M_{25} могут составлять 3,6%; возможное количество определений в параллелях – четыре, при этом максимальное расхождение для параметра M_{10} составляет 1,6%. Сравнивая значения (10) и (11) с 3,6 и 1,6% соответственно, можно отметить, что прогнозирование параметра M_{25} по модели [12] не противоречит ГОСТ 5953, тогда как прогноз по показателю M_{10} не является адекватным.

Нами была проанализирована прогнозирующая способность модели [12] при моделировании качества кокса из углей, которые не входили в сырьевую базу, на основе которой она была построена, по данным из [13].

Найдём интервал попадания ошибки прогнозирования при различных значениях доверительной вероятности. Оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения, рассчитанные по данным работы [13], соответствуют:

$$N = 10; \tilde{m}_{M_{25}} = -0,58; S(\Delta_{M_{25}}) = 1,49; \quad (12)$$

$$N = 10; \tilde{m}_{M_{10}} = 0,54; S(\Delta_{M_{10}}) = 1,14. \quad (13)$$

Найдём доверительные интервалы для средних значений $\tilde{m}_{M_{25}}$ и $\tilde{m}_{M_{10}}$:

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{25}}) = \frac{t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{25}})}{\sqrt{N}} = \frac{2,26 \cdot 1,49}{\sqrt{10}} = 1,06;$$

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{10}}) = \frac{t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{10}})}{\sqrt{N}} = \frac{2,26 \cdot 1,14}{\sqrt{10}} = 0,81.$$

Так как

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{25}}) = 1,06 > |-0,58| = |\tilde{m}_{M_{25}}|$$

$$\varepsilon(\tilde{m}_{M_{10}}) = 0,81 > |0,54| = |\tilde{m}_{M_{10}}|,$$

то $\tilde{m}_{M_{25}}$ и $\tilde{m}_{M_{10}}$ значимо от нуля не отличаются, их можно принять равными нулю. Тогда доверительный интервал для ошибки прогнозирования Δ модели [12] по данным [13] составит:

для M_{25} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{25}}) = \\ &= 2,26 \cdot 1,49 = 3,37; \quad \varepsilon_{0,99} = 4,84, \end{aligned} \quad (14)$$

для M_{10} :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{0,95} &= t(P; f) \cdot S(\Delta) = t(0,95; 9) \cdot S(\Delta_{M_{10}}) = \\ &= 2,26 \cdot 1,14 = 2,58; \quad \varepsilon_{0,99} = 3,71, \end{aligned} \quad (15)$$

Из формул (14) и (15) следует, что параметр M_{25} при доверительной вероятности 95% может использоваться для «прикидочной» оценки каче-

ства кокса из углей, не входивших в сырьевую базу, на которой она была построена. Параметр M_{10} для прогнозирования качества кокса и в случае «незнакомых» для модели углей использовать нельзя, что является закономерным, с учётом выводов, сделанных относительно [12].

Произведём дополнительную оценку прогнозирующей способности модели [13] тем же методом, что и в работе [15], результаты которой представим в **таблице**.

Процент попадания значений параметров M_{25} , M_{10}

| Величина интервала ошибки, % | Процент попадания значений параметров M_{25} , M_{10} в заданный интервал при моделировании качества кокса из углей, которые не входили в сырьевую базу, на основе которой была построена модель, % | |
|------------------------------|---|----------|
| | M_{25} | M_{10} |
| $\pm 0,5$ | 30 | 20 |
| $\pm 0,7$ | 40 | 30 |
| $\pm 1,0$ | 70 | 90 |
| $\pm 1,5$ | 80 | 90 |
| $\pm 2,0$ | 80 | 90 |
| $\pm 3,0$ | 90 | 90 |
| $\pm 4,0$ | 100 | 100 |

Примечание. Количество прогнозируемых значений – 10.

Из **таблицы** видно, что фактически, с учётом ГОСТ 5953, все прогнозные значения по параметру M_{25} и M_{10} , кроме одного прогноза для M_{10} , можно было принять за «прикидочные» для оценки качества кокса из углей нового месторождения. Таким образом, получение «прикидочного» прогноза для M_{10} возможно при меньшей чем 95% доверительной вероятности, при условии, что прогнозирование будет осуществляться для значительного количества шихт, составленных из марок нового месторождения.

Заключение

Модель, рассмотренная в работах [11–13], адекватна для оценочного прогнозирования показателя качества кокса M_{25} на углях, входивших в её базу коксования.

Показано, что модель [11–13] имеет низкую прогнозирующую способность по сравнению с моделью [6–9], но может быть использована для «прикидочного» прогнозирования показателей качества кокса на «незнакомых» углях.

Наиболее продумана и закончена с точки зрения практического применения, по нашему мнению, модель, рассмотренная в работах [6–9].

Список литературы

1. Смирнов А.Н., Петухов В.Н., Алексеев Д.И. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} с целью классификации и разработки концепции «гибридной модели» // Кокс и химия. 2015. № 5. С. 13–18.
2. Взаимосвязь между механической прочностью кокса, химико-петрографическими параметрами шихт из кузнецких углей и режимом их коксования / Станкевич А.С., Золотухин Ю.А., Калинина Г.И. и др. // Кокс и химия. 1981. № 2. С. 27–31.
3. Станкевич А.С., Мюллер И.П., Лельчук В.И. Распределение углей и составление угольных шихт для коксования с прогнозом качества кокса на основе линейного программирования // Кокс и химия. 1981. № 11. С. 4–8.
4. Станкевич А.С. Расчёт шихт и прогноз качества кокса из углей восточных бассейнов на основе их петрографических параметров // Кокс и химия. 1983. № 9. С. 11–16.
5. Прогноз качества кокса на основе параметров Единой промышленно-генетической классификации углей / Станкевич А.С., Трегуб В.В., Алешин В.И. и др. // Кокс и химия. 1990. № 12. С. 36–39.
6. Прогноз прочности кокса на основе химико-петрографических параметров угольных шихт с учётом их пневмомеханической сепарации / Станкевич А.С., Степанов Ю.В., Гилязетдинов Р.Р. и др. // Кокс и химия. 2005. № 12. С. 14–21.
7. Станкевич А.С., Станкевич В.С. Определение технологической ценности углей, используемых для производства кокса // Кокс и химия. 2011. №6. С. 2–10.
8. Станкевич А.С., Станкевич В.С. Методика определения коксующести и технологической ценности углей пластов и их смесей // Кокс и химия. 2012. №1. С. 4–12.
9. Станкевич А.С., Базегский А.Е. Оптимизация качества кокса ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» с учётом особенностей угольной сырьевой базы // Кокс и химия. 2013. №10. С. 14–21.
10. Расчёт шихт для коксования на основе петрографических особенностей углей / Аммосов И.И., Ерёмин И.В., Сухенко С.И. и др. // Кокс и химия. 1957. №12. С. 9–12.
11. Ерёмин И.В., Гагарин С.Г. Расчёт шихт для коксования на основе петрографической модели // Кокс и химия. 1992. №12. С. 9–15.
12. Гагарин С.Г., Ерёмин И.В. Компьютерный мониторинг прочности кокса на основе петрографической модели расчёта угольных шихт // Кокс и химия. 1995. № 2. С. 10–15.
13. Гагарин С.Г. Оценка петрографической модели прогноза прочности кокса на примере углей Монголии // Кокс и химия. 2011. №4. С. 21–26.
14. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для студентов вузов. 10-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 576 с.
15. Метод прогноза прочности кокса и расчёта состава угольных шихт. 1. Проверка и критическая оценка предложенных методов прогноза / Киселёв Б.П., Стуков М.И. Ольшанецкий Л.Г. и др. // Кокс и химия. 1990. № 3. С. 34–37.

Поступила 15.03.17.

Принята в печать 07.06.17.

COMPARISON AND ADEQUACY ANALYSIS OF THE MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE M_{25} AND M_{10} COKE QUALITY INDICES

Andrey N. Smirnov – D.Sc. (Physics and Mathematics)

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sman@magtu.ru

Danil I. Alekseev – Teaching Assistant

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alekseev41047@mail.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): This article examines contemporary structural models [1] designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices, which are used for theoretical research and in practical application by Russia's coke producers. For the studied models, the model accuracy indicators were brought to a single format and the features were compared with the specification given in GOST 5953-93 "+20 mm coke. Physical strength determination" (ISO 556-80). **Objectives:** The objectives include a comparison and an adequacy analysis of the mathematical models designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices based on the models' predictive accuracy. **Methods Applied:** The authors carried out a statistical analysis of the confidence intervals for the prediction error of mathematical models designed for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices. The authors looked at the length of the confidence interval at various confidence probabilities before drawing conclusions on the models' predictive accuracy. **Originality:** This work provides an opportunity to verify the mathematical models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices based on the fact that the predictive accuracy of the model should not exceed the allowable discrepancy between two parallels when analyzing the coke quality per GOST 5953. **Findings:** The article provides a comparison between different structural models in terms of their predictive accuracy. This comparison helped analyze the adequacy of the mathematical models. **Practical Relevance:** The results obtained can be used for theoretical research and in practical application by Russia's coke producers.

Keywords: Coke, coke quality indices, mathematical model, classification on the basis of internal structure and algorithm, structural model.

References

1. Smirnov A.N., Petukhov V.N., Alekseev D.I. Looking at how mathematical models are built for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices for the purposes of classification and developing the concept of a hybrid model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2015, no. 5, pp. 13–18. (In Russ.)
2. Stankevich A.S., Zolotukhin Yu.A., Kalinina G.I., Aleshin V.I., Chemerko V.A. A relationship between the physical strength of coke, the chemical and petrographic composition of burden material made with the Kuzbass coal and the coking process. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1981, no. 2, pp. 27–31. (In Russ.)
3. Stankevich A.S., Myuller I.P., Le'chuk V.I. Coal blending for coking and linear programming for predicting the coal quality. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1981, no. 11, pp. 4–8. (In Russ.)
4. Stankevich A.S. Charge calculation and predicting the quality of coke made with coal from the Asian basins based on its terographic characteristics. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1983, no. 9, pp. 11–16. (In Russ.)
5. Stankevich A.S., Tregub V.V., Aleshin V.I., Fisich M.V., Gribovich A.V., Tsinker L.Z. Predicting the coke quality based on the Unified Industrial Coal Classification. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1990, no. 12, pp. 36–39. (In Russ.)
6. Stankevich A.S., Stepanov Yu.V., Gilyazetdinov R.R., Popova N.K. Predicting the physical strength of coke on the basis of the chemical and petrographic composition of coal burden material. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2005, no. 12, pp. 14–21. (In Russ.)
7. Stankevich A.S., Stankevich V.S. Determining the value of coals used for coke production. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2011, no. 6, pp. 2–10. (In Russ.)
8. Stankevich A.S., Stankevich V.S. Methods for determining the coking properties and the value of coal and coal mixtures. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2012, no. 1, pp. 4–12. (In Russ.)
9. Stankevich A.S., Bazegskiy A.E. Optimizing the quality of the EVRAZ ZSMK coke with regard to the properties of the available coal. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2013, no. 10, pp. 14–21. (In Russ.)
10. Ammosov I.I., Eremin I.V., Sukhenko S.I., Oshurkova L.S. Calculation of coking charges based on the petrographic properties of coals. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1957, no. 12, pp. 9–12. (In Russ.)
11. Eremin I.V., Gagarin S.G. Calculation of coking charges on the basis of a petrographic model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1992, no. 12, pp. 9–15. (In Russ.)
12. Gagarin S.G., Eremin I.V. Computer monitoring of coke strength on the basis of a petrographic coal charge calculation model. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1995,

- no. 2, pp. 10–15. (In Russ.)
13. Gagarin S.G. Coke strength petrographic prediction model assessment – A case study of Mongolian coals. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 2011, no. 4, pp. 21–26. (In Russ.)
14. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. 10th edition. Moscow: Akademiya Publishing Centre, 2005, 576 p. (In Russ.)
15. Kiselev B.P., Stukov M.I., Olshanetskiy L.G., Leushin B.A., Tyagunov L.I. A method for predicting the coke strength and calculating the coal charge mixtures. 1. Verification and assessment of the prediction methods proposed. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry], 1990, no. 3, pp. 34–37. (In Russ.)

Received 15/03/17

Accepted 07/06/17

Образец для цитирования

Смирнов А.Н., Алексеев Д.И. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M_{25} и M_{10} // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №3. С. 62–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>

For citation

Smirnov A.N., Alekseev D.I. Comparison and adequacy analysis of the mathematical models for predicting the M_{25} and M_{10} coke quality indices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017, vol. 15, no. 3, pp. 62–67. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-62-67>
