

УДК 662.8.057.24:621.74

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ЛИТЕЙНОГО КОКСА

Побегалова Е.О., старший преподаватель (pobegalovaeo@gmail.com)
Иванова В.А., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология материалов,
стандартизация и метрология» (ivanova-waleriya@mail.ru)

Ярославский государственный технический университет
(150023, Россия, Ярославль, Московский пр., 88)

Аннотация. Значения показателей качества литейного кокса определяют путем испытаний на коксохимических предприятиях. Потребители литейного кокса – предприятия литейного производства, как правило, находятся в отдалении от коксохимических предприятий. Транспортируют литейный кокс насыпью в открытых железнодорожных вагонах. В этой связи задачей данной работы является установление влияния транспортирования на качество литейного кокса. Для оценки влияния расстояния транспортирования был введен показатель разрушения P_t (%). Результаты экспериментальных исследований показали, что степень разрушения литейного кокса не одинакова на различных интервалах транспортирования. При транспортировании на расстояния до 300 км разрушению подвергается кокс с минимальным значением показателя прочности M_{40} . При увеличении расстояния транспортирования с 900 км до 2500 км показатель разрушения литейного кокса увеличивается на 2,08 – 3,02 % в зависимости от партии. Для всех партий наблюдалось образование класса крупности менее 40 мм в зависимости от значения показателя прочности M_{40} от 0,25 до 1,41 %. Для литейного кокса, характеризующегося большими значениями показателя прочности, при транспортировании сохраняется класс крупности 80 мм и более. При увеличении влажности окружающего воздуха в процессе транспортирования на 40 %, содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз. При снижении влажности воздуха на 34 % количество влаги в грамме кокса класса крупности 40 – 60 мм уменьшается в 2 раза, в коксе класса крупности 60 – 80 мм – в 1,26 раза, в коксе класса крупности 80 мм и более – в 1,45 раза. По сравнению с коксом классов крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более, влажность кокса класса крупности 40 – 60 мм растет с большей скоростью при увеличении влажности окружающего воздуха.

Ключевые слова: литейный кокс, качество, транспортирование, разрушение, влажность, показатели качества, класс крупности, испытания.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-823-828

ВВЕДЕНИЕ

Литейный кокс применяется для выплавки литейных чугунов в коксовых и коксогазовых вагранках. При этом к основным задачам литейного кокса относят обеспечение [1 – 3]:

- необходимого тепла для расплавления продуктов плавки;
- установленной температуры выплаваемого чугуна;
- дренажной способности столба шихты в шахте вагранки;
- нормируемого содержания углерода в чугуне.

Качество литейного кокса формируется при производстве, зависит от состава угольной шихты, технологии коксования [4 – 15] и определяется показателями, установленными ГОСТ 3340-88 [16]: массовая доля общей влаги в рабочем состоянии (W_t^r , %), зольность (A^d , %), массовая доля общей серы (S_t^d , %), показатель прочности (M_{40} , %), массовая доля кусков размером менее нижнего предела, в том числе менее 40 мм (%). Значения показателей качества зависят от марки и класса крупности литейного кокса [16] и определяются в условиях заводских испытательных лабораторий [17].

Значительная часть заводов литейного производства, на которых выплавляют литейные чугуны в вагранках, располагается в отдаленности от коксохимических предприятий. Транспортируют литейный кокс насыпью в открытых железнодорожных вагонах в соответствии с требованиями ГОСТ 22235-2010 [18], правилами перевозки грузов и техническими условиями погрузки и крепления грузов [16]. При этом значения показателей качества литейного кокса определяют путем испытаний на коксохимических предприятиях, а затем заносят в сопроводительные документы (сертификаты качества) для каждой партии (вагона) литейного кокса. В этой связи интерес представляет установление влияния транспортирования на качество литейного кокса.

С целью установления влияния условий транспортирования литейного кокса на его качество проведены испытания образцов литейного кокса различных партий (вагонов). Условия испытаний были максимально приближены к реальным условиям транспортирования литейного кокса. После испытаний определяли степень разрушения образцов литейного кокса путем оценки изменения крупности и массы образцов, а также изменения его влажности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения степени разрушения при транспортировании было отобрано 45 образцов литейного кокса различной крупности из трех партий: 40 – 60 мм, 60 – 80 мм, 80 мм и более (табл. 1). Образцы партий 1/1 и 1/2 по данным сертификатов качества, выданных коксохимическими предприятиями, соответствовали требованиям ГОСТ 3340-88 [16], а партии 1/3 – ТУ 0761-032-00187852-2015 [19].

Испытания проводились на вибрационном электродинамическом стенде УВЭ-100/5-300, максимальная амплитуда виброускорения составляла 29,4 м/с² (3g), частота вибрации 30 Гц. Образцы литейного кокса каждой партии испытывались отдельно общей продолжительностью 1 ч 10 мин, что соответствует транспортировке по железной дороге на расстояние приблизительно 2100 км. До и после проведения испытания измеряли массу образцов и рассчитывали показатель разрушения литейного кокса при транспортировании P_T (%), позволяющий оценить степень разрушения литейного кокса

$$P_T = 100 \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right), \%, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца литейного кокса до испытаний, г;
 m_2 – масса образца литейного кокса после испытаний, г.

Измерения значений m_1 и m_2 содержат только систематическую составляющую погрешности, связанную со средством измерения, которая в соответствии с паспортом прибора составляет $\pm 0,01$ г. Значения показателя P_T определяли при проведении испытаний, соответствующих расстояниям транспортирования 300, 900, 1500 и 2100 км.

Результаты косвенных измерений показателя разрушения литейного кокса при транспортировании обрабатывались в соответствии с требованиями МИ 2083-90 [20]. Полученные значения погрешности косвенных измерений показателя P_T не превышали 0,014 %.

Для исследования влияния условий окружающей среды при транспортировании на влажность литейного кокса отбирали образцы классов крупности 40 – 60 мм, 60 – 80 мм, 80 мм и более пяти различных партий (табл. 2). Для имитации воздействия погодных условий при транспортировании в железнодорожном вагоне образцы литейного кокса помещали на открытый воздух. Во время эксперимента проводили измерение массы образцов и влажности воздуха, а также фиксировали динамику изменения влажности за день с использованием данных метеорологической службы.

После эксперимента образцы литейного кокса нагревали в муфельных печах модели СНОЛ 3/10 при температуре 200 °С до постоянной массы и определя-

Таблица 1

Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния транспортирования на его разрушение

Table 1. Quality metrics of foundry coke samples to research the transportation impact on its destruction

Партия кокса	Массовая доля влаги, W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Массовая доля серы, S_t^d , %	Прочность, M_{40} , %	Доля кусков размером менее нижнего предела, %	В том числе менее 40 мм, %
1/1	1,00	10,60	0,58	78,40	6,00	–
1/2	2,50	11,50	0,60	81,60	13,90	4,30
1/3	1,10	11,10	0,60	82,60	19,20	3,40

Таблица 2

Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния условий окружающей среды на его влажность

Table 2. Quality metrics of foundry coke samples to research the environmental impact on moisture of foundry coke

Партия кокса	Массовая доля влаги, W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Массовая доля серы, S_t^d , %	Прочность, M_{40} , %	Доля кусков менее 40 мм, %
2/1	4,5	11,7	0,4	73,3	5,9
2/2	4,8	11,6	0,6	73,8	5,8
2/3	4,8	11,8	0,5	73,3	5,9
2/4	4,9	11,3	0,5	76,8	6,0
2/5	4,8	12,0	0,5	73,2	5,9

ли количество влаги, приходящейся на 1 г литейного кокса по формуле

$$B = \frac{m_3 - m_4}{m_4}, \text{ г}, \quad (2)$$

где B – количество влаги в грамме литейного кокса, г; m_3 – масса образца литейного кокса до нагревания, г; m_4 – масса образца литейного кокса после нагревания, г.

Результаты косвенных измерений количества влаги в грамме литейного кокса образцов также обрабатывались в соответствии с требованиями МИ 2083-90 [20]. Полученные значения погрешности косвенных измерений количества влаги в грамме литейного кокса не превышали 0,002 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований по определению степени разрушения литейного кокса при транспортировании 40 % образцов партии 1/1 и 20 % образцов партии 1/2 класса крупности 80 мм и более раскололись с образованием кусков класса крупности менее 40 мм после испытаний, соответствующих расстоянию транспортирования 300 км. При этом 20 % образцов литейного кокса класса 60 – 80 мм партии 1/3 раскололись также с образованием класса крупности менее 40 мм, а крупный кокс 80 мм и более сохранился при испытаниях. Влияние расстояния транспортирования литейного кокса на величину показателя разрушения представлено на рис. 1.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что литейный кокс разрушается в процессе транспортирования, при этом степень разрушения зависит от качества кокса, которое формируется при производстве. В частности, при повышении прочности кокса (пар-

тия 1/3) его сопротивление разрушению при транспортировании увеличивается (см. рис. 1).

При транспортировании на расстояние до 300 км наибольшему разрушению подвергся кокс партии 1/1 с минимальным значением показателя прочности M_{40} (см. рис. 1, табл. 1). При увеличении расстояния транспортирования с 900 до 2500 км показатель разрушения увеличивается для всех партий на 2,08 – 3,02 %. При транспортировании на расстояние свыше 900 км значение показателя разрушения партии 1/2, характеризующейся максимальной зольностью (см. табл. 1), превышает значения показателей разрушения других партий на 0,23 – 1,65 %. Это может быть связано с тем, что включения золы в коксе являются дополнительными концентраторами внутренних напряжений, приводящими к разрушению литейного кокса [21].

Результаты исследований гранулометрического состава свидетельствуют о том, что для литейного кокса, характеризующегося большими значениями показателя прочности, при транспортировании сохраняется класс крупности 80 мм и более (табл. 3), который является предпочтительным для плавки чугуна в вагранке. При этом появление класса крупности литейного кокса менее 40 мм при транспортировании происходит за счет разрушения кокса классов крупности 80 мм и более, который характеризуется меньшей прочностью по сравнению с коксом класса крупности 40 – 60 мм из-за особенностей формирования коксового пирога при коксовании (табл. 4). Необходимо отметить, что в любом случае при транспортировании литейного кокса увеличивается количество класса крупности менее 40 мм, причем оно будет тем меньше, чем выше прочность кокса (табл. 1, партия 1/3). Прочность оставшегося крупного кокса будет выше, так как при транспортировании куски, содержащие трещины, будут разрушаться в первую очередь.

Результаты исследования влияния условий окружающей среды при транспортировании на влажность литейного кокса показали, что количество влаги в грамме литейного кокса увеличивается с ростом влажности окружающего воздуха в большей степени для кокса класса крупности 40 – 60 мм, в меньшей – для кокса крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более (рис. 2). При увеличении влажности воздуха на 40 % (см. рис. 2), содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз. При снижении влажности воздуха на 34 % количество влаги в грамме кокса класса крупности 40 – 60 мм уменьшилось в 2 раза, в коксе класса крупности 60 – 80 мм – в 1,26 раза, в коксе класса крупности 80 мм и более – в 1,45 раза. По сравнению с коксом классов крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более, влажность кокса класса крупности 40 – 60 мм растет с большей скоростью при увеличении влажности окружающего воздуха (рис. 2) [22].

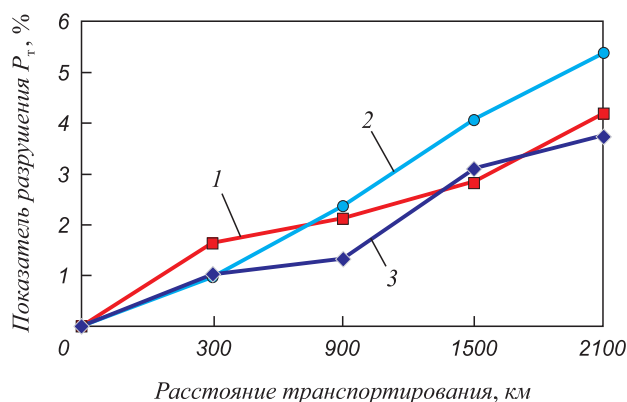


Рис. 1. Влияние расстояния транспортирования на показатель разрушения литейного кокса различных партий:
1 – 1/1; 2 – 1/2; 3 – 1/3

Fig. 1. Impact of transportation distance on the destruction index of foundry coke from different batches:
1 – 1/1; 2 – 1/2; 3 – 1/3

Таблица 3

Изменение содержания литейного кокса класса крупности 80 мм и более в зависимости от расстояния при транспортировании

Table 3. Difference in the composition of foundry coke of 80 mm and more size fraction depending on the transportation distance

Партия кокса	Расстояние транспортирования, км			
	300	900	1500	2100
	Содержание класса крупности 80 мм и более, %			
1/1	60,57	51,10	51,09	51,24
1/2	63,05	62,63	53,66	53,32
1/3	65,51	65,58	65,64	65,76

Таблица 4

Изменение содержания литейного кокса класса крупности менее 40 мм в зависимости от расстояния при транспортировании

Table 4. Difference in the composition of foundry coke of 40 mm and less size fraction depending on the transportation distance

Партия кокса	Расстояние транспортирования, км			
	300	900	1500	2100
	Содержание класса крупности 80 мм и более, %			
1/1	0	0	1,44	1,41
1/2	0,42	0,42	0,43	0,43
1/3	0,25	0,25	0,25	0,25

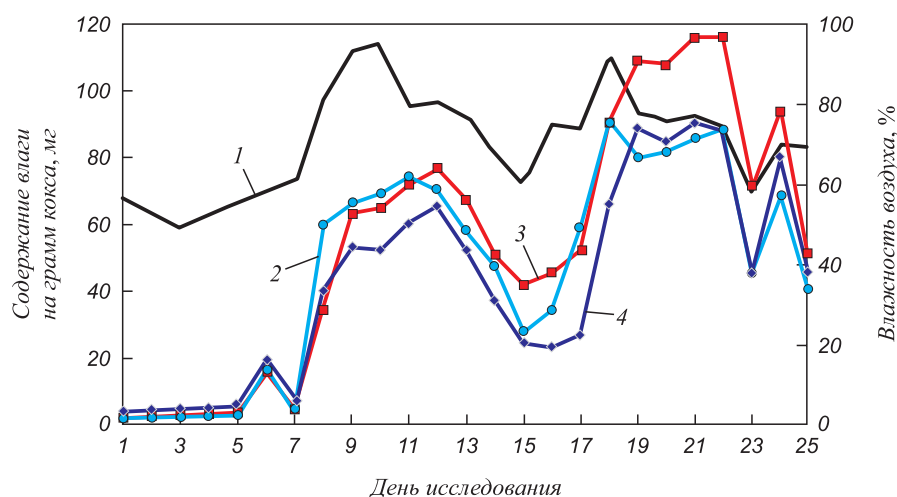


Рис. 2. Динамика изменения количества влаги в грамме литейного кокса в зависимости от влажности окружающего воздуха [21]: 1 – влажность воздуха; 2 – класс крупности 40 – 60 мм; 3 – класс крупности 60 – 80 мм; 4 – класс крупности 80 мм и более

Fig. 2. Dynamics of moisture changes in a gram of foundry coke depending on humidity of the surrounding air [21]: 1 – air humidity; 2 – size fraction 40 – 60 mm; 3 – size fraction 60 – 80 mm; 4 – size fraction 80 mm and more

Содержание влаги, приходящейся на 1 г литейного кокса, резко возрастает при увеличении влажности окружающей среды, при этом уменьшение содержания влаги в литейном коксе в связи с понижением влажности окружающей среды происходит значительно медленнее.

Выводы

При транспортировании на расстояния свыше 1500 км увеличивается количество класса крупности литейного кокса менее 40 мм на 0,25 – 1,44 %, причем с повышением прочности кокса (M_{40} , %) содержание класса крупности менее 40 мм уменьшается.

При транспортировании на расстояния свыше 1500 км уменьшается количество кокса класса крупности 80 мм и более на 9,39 – 9,48 %, при этом с повышением прочности кокса (M_{40} , %) количество крупного

кокса, разрушаемого при транспортировании, уменьшается.

При увеличении расстояния транспортирования с 900 км до 2500 км интенсивность разрушения литейного кокса возрастает, значение показателя разрушения (P_T) увеличивается на 2,08 – 3,02 % в зависимости от партии.

При транспортировании литейного кокса в открытых вагонах с увеличением влажности окружающего воздуха на 40 % содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз.

Таким образом, качество литейного кокса при транспортировании ухудшается, так как уменьшается количество крупного кокса и увеличивается количество мелочи. Кроме того, влажность литейного кокса

при транспортировании увеличивается с повышением влажности окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липницкий А.М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 192 с.
2. Неведов П.Я., Страхов В.М. Качество и эффективность использования литейного кокса в вагранках // Кокс и химия. 2003. № 7. С. 16 – 26.
3. Матюхин В.И., Матюхина А.В., Бабанин В.Б. и др. Выбор потребительских свойств металлургического кокса для обеспечения эффективности ваграночной плавки // Кокс и химия. 2015. № 3. С. 20 – 25.
4. Долинский В.А., Гайниев Г.Р., Никитин Л.Д. Влияние состава и свойств угольной шихты на качество кокса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. Т. 53. № 2. С. 14 – 16.
5. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M.R. Methods of coke quality prediction: A review // Fuel. 2018. Vol. 219. P. 426 – 445.
6. Zhang Q., Wu X., Feng A., Shi M. Prediction of coke quality at Baosteel // Fuel Processing Technology. 2004. Vol. 86. No. 1. P. 1 – 11.
7. Kishore G.S., Jagannadham G., Alma S. Coal blend modeling and coke quality prediction studies – GIKIL's success story // Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: 2 – 5 May 2011, Indianapolis, Indiana, USA. AIST, Association for Iron & Steel Technology. Ronald E. Ashburn, publ. 2011. Vol. 1. P. 207 – 216.
8. Tiwari H.P., Halder S.K., Roy A. etc. Data mining – new perspectives on predicting coke quality in recovery stamp charged coke making process // Metallurgical Research & Technology. 2015. Vol. 112. No. 6. P. 603 – 618.
9. Koszorek A., Krzesińska M., Pusz S. etc. Relationship between the technical parameters of cokes produced from blends of three Polish coals of different coking ability // Int. Journal of Coal Geology. 2009. Vol. 77. No. 3 – 4. P. 363 – 371.
10. Lorez D., Sanada Y., Mondragon F. Effect to low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability // Fuel. 1998. Vol. 77. No. 14. P. 1623 – 1628.
11. Sanchez J.E., Rincon J.M. Oxidation paths of a coking coal and comparison of its oxidized product with a non-coking coal // Fuel. 1997. Vol. 76. No. 12. P. 1137 – 1142.
12. Smędowski Ł., Piechaczek M. Impact of weathering on coal properties and evolution of coke quality described by optical and mechanical parameters // Int. Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 168. Part.1. P. 119 – 130.
13. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology // Fuel. 2016. Vol. 176. P. 11 – 19.
14. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C. Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke // Fuel Processing Technology. 2016. Vol. 148. P. 155 – 162.
15. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C., Alvarez R. Influence of biomass on metallurgical coke quality // Fuel. 2014. Vol. 116. P. 175 – 182.
16. ГОСТ 3340-88. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 4 с.
17. Иванова В.А., Яблонский О.П. Особенности подготовки документации для аккредитации заводских испытательных лабораторий в области контроля качества литейного кокса // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 6. С. 66 – 70.
18. ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневренных работ. – М.: Стандартиформ, 2011. – 18 с.
19. ТУ 0761-032-00187852-2015. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. 2015. – 13 с.
20. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 10 с.
21. Иванова В.А., Вдовин К.Н. Метод испытания для определения истираемости и абразивной способности литейного кокса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 149 – 153.
22. Иванова В.А., Шамина Е.О. Влияние влажности окружающей среды на влажность литейного кокса // Химия твердого топлива. 2018. № 6. С. 46 – 50.

Поступила в редакцию 9 декабря 2019 г.

После доработки 16 декабря 2019 г.

Принята к публикации 16 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 10, pp. 823–828.

IMPACT OF TRANSPORTATION ON FOUNDRY COKE QUALITY

E.O. Pobegalova, V.A. Ivanova

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The quality metrics of foundry coke are determined by testing at coke plants. Foundry coke consumers are foundry enterprises which are usually located far from the coke plants. Foundry coke is transported in bulk in open railway wagons. Therefore, this paper is aimed to determine the impact of transportation on the quality of foundry coke. The test conditions were as close as possible to real life conditions of foundry coke transportation. To estimate the impact of transportation distance we introduced the destruction index P_T (%). The results of experimental studies have shown that the destruction of foundry coke is not the same at different intervals of transportation. When transporting up to 300 km, the coke with the minimum durability index M_{40} is destroyed. When the distance is increased from 900 km up to 2500 km, the foundry coke destruction index (P_T , %) increases by 2.08 – 3.02 % depending on the batch. For all batches, a size fraction of less than 40 mm was noted depending on the durability index M_{40} from 0.25 to 1.41 %. The size fraction of more than 80 mm stays the same for foundry coke with higher durability indices. When the air humidity rises by 40 % during transportation, the amount of moisture in the coke

samples of a 40 – 60 mm size fraction is more than 24 times higher than usual, a 60 – 80 mm size fraction – more than 17 times, an 80 mm and larger – more than 10 times. When the air humidity decreases by 34 %, the amount of moisture in a gram of coke of a 40 – 60 mm size fraction becomes 2 times lower than usual, a 60 – 80 mm size fraction – 1.26 times, an 80 mm and larger – 1.45 times. Compared to coke of size fractions 60 – 80 mm and 80 mm and larger, the moisture of the 40 – 60 mm size fraction coke grows faster when the air humidity increases as well.

Keywords: foundry coke, quality, transportation, destruction, moisture, quality metrics, size fraction, tests.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-823-828

REFERENCES

1. Lipnitskii A.M. *Plavka chuguna i spлавov tsvetnykh metallov* [Melting of Cast Iron and Non-Ferrous Alloys]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1973, 192 p. (In Russ.).
2. Nefedov P.Ya., Strakhov V.M. Quality and efficiency of utilization of foundry coke in cupola. *Koks i khimiya*. 2003, no. 7, pp. 16–26. (In Russ.).

3. Matyukhin V.I., Matyukhina A.V., Babanin V.B., Zorin M.V., Stakheev S.G. Selecting the properties of metallurgical coke for cupola furnaces. *Coke and Chemistry*. 2015, vol. 58, no. 3, pp. 96–100.
4. Dolinskii V.A., Gainieva G.R., Nikitin L.D. Coal charge composition and properties impact on coke quality. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, vol. 53, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.).
5. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M.R. Methods of coke quality prediction: A review. *Fuel*. 2018, vol. 219, pp. 426–445.
6. Zhang Q., Wu X., Feng A., Shi M. Prediction of coke quality at Baosteel. *Fuel Processing Technology*. 2004, vol. 86, no. 1, pp. 1–11.
7. Kishore G.S., Jagannadham G., Alma S. Coal blend modeling and coke quality prediction studies - GIKIL's success story. *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: 2 – 5 May 2011, Indianapolis, Indiana, USA*. AIST, Association for Iron & Steel Technology. Ronald E. Ashburn, publ. 2011, vol. 1, pp. 207–216.
8. Tiwari H.P., Haldar S.K., Roy A., Bhattacharjee A., Mishra P. Data mining – new perspectives on predicting coke quality in recovery stamp charged coke making process. *Metallurgical Research & Technology*. 2015, vol. 112, no. 6, pp. 603–618.
9. Koszorek A., Krzesińska M., Pusz S., Pilawa B., Kwiecińska B. Relationship between the technical parameters of cokes produced from blends of three Polish coals of different coking ability. *Int. Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 77, no. 3–4, pp. 363–371.
10. Lorez D., Sanada Y., Mondragon F. Effect to low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability. *Fuel*. 1998, vol. 77, no. 14, pp. 1623–1628.
11. Sanchez J.E., Rincon J.M. Oxidation paths of a coking coal and comparison of its oxidized product with a non-coking coal. *Fuel*. 1997, vol. 76, no. 12, pp. 1137–1142.
12. Smędowski Ł., Piechaczek M. Impact of weathering on coal properties and evolution of coke quality described by optical and mechanical parameters. *Int. Journal of Coal Geology*. 2016, vol. 168, part 1, pp. 119–130.
13. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology. *Fuel*. 2016, vol. 176, pp. 11–19.
14. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C. Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke. *Fuel Processing Technology*. 2016, vol. 148, pp. 155–162.
15. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C., Alvarez R. Influence of biomass on metallurgical coke quality. *Fuel*. 2014, vol. 116, pp. 175–182.
16. GOST 3340-88. *Koks liteinyi kamennougol'nyi. Tekhnicheskie usloviya* [Foundry coal coke. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, 4 p. (In Russ.).
17. Ivanova V.A., Yablonskii O.P. Preparation of accreditation documents of factory testing laboratories in the field of quality control of foundry coke. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2013, no. 6, pp. 66–70. (In Russ.).
18. GOST 22235-2010. *Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznikh dorog kolei 1520 mm. Obshchie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrennykh rabot* [Freight wagons of the main railway expensive gauge 1520 mm. General requirements for ensuring safety during handling and maneuvering operations]. Moscow: Standartinform, 2011, 18 p. (In Russ.).
19. TU 0761-032-00187852-2015. *Koks liteinyi kamennougol'nyi. Tekhnicheskie usloviya* [Foundry coal coke. Technical conditions]. 2015, 13 p. (In Russ.).
20. MI 2083-90 GSI. *Izmereniya kosvennye. Opredelenie rezul'tatov izmerenii i otsenivanie ikh pogreshnostei* [Indirect measurements. Determination of measurement results and evaluation of their errors]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1991, 10 p. (In Russ.).
21. Ivanova V.A., Vdovin K.N. Test method for the determination of abrasion strength and abrasive ability of foundry coke. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 149–153. (In Russ.).
22. Ivanova V.A., Shamina E.O. Influence of environmental humidity on humidity of foundry coke. *Khimiya tverdogo topliva*. 2018, no. 6, pp. 46–50. (In Russ.).

Information about the authors:

E.O. Pobegalova, Senior Lecturer (pobegalovaeo@gmail.com)
V.A. Ivanova, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor; Head of the Chair
 “Materials Technology, Standardization, and Metrology”
 (ivanova-waleriya@mail.ru)

Received December 9, 2019
 Revised December 16, 2019
 Accepted October 20, 2020