

УДК 669.187.2.036.74.001.57

ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ «КОСТРЕНИЯ» В ДСП

В. А. Ошурков¹, О. С. Логунова¹, В. В. Павлов²,
Д. В. Чистяков³, А. Н. Панов³, Ю. В. Щebleва¹

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
(г. Магнитогорск, Россия),

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (г. Магнитогорск, Россия),

³ ЗАО «Консом СКС» (г. Магнитогорск, Россия)

Представлены результаты модельных экспериментов в ходе анализа технологии загрузки металлического лома в рабочее пространство дуговой сталеплавильной печи (ДСП) с помощью совка и бады. На основе теории подобия разработаны критерии и определен набор замещающих объектов. Всего проведено 60 экспериментов в соответствии с разработанным планом. Результаты обработки видеоматериалов, полученных в ходе модельного эксперимента, показали, что с увеличением габаритов фрагментов металлического лома вероятность эффекта «кострения» возрастает от 0 до 1,14 %.

Ключевые слова: крупнотоннажная ДСП, модельный эксперимент, загрузка металлического лома, планирование эксперимента, эффект «кострения», система критериев подобия.

В настоящее время непрерывно расширяется производство стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), и за период с 2006 по 2015 г. производство электростали только в России возросло с 16269 до 21600 млн т [1, с. 23]. Основным сырьем, применяемым в технологии выплавки стали в ДСП, служат металлический лом, жидкий передельный чугун и альтернативные материалы. К металлическому лому, загружаемому в ДСП, предъявляются требования по габаритам и качественным показателям. Перед загрузкой материалов в ДСП проводят этап подготовки (резка негабаритных фрагментов, пресс-пакетирование и другие операции) и сортировку металлического лома. Несмотря на это, в рабочем пространстве ДСП оказываются негабаритные фрагменты металлического лома [2 – 4].

Особенность процесса загрузки металлического лома в ДСП-180, функционирующую в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», заключается в использовании совков и бады. Порядок загрузки совков и формирования их содержимого предопределяет дальнейшее расположение металлического лома в баде и рабочем пространстве печи. Габариты фрагментов металлического лома и порядок их загрузки в дуговую сталеплавильную печь определяют вероятность возникновения очагов эффекта «кострения» и влияют на производительность ДСП [4]. Другие крупные металлургические предприятия пользуются только бадью по упрощенной технологии или разрабатывают способы загрузки специальными коробами. С точки зрения моделирования процессов загрузки металлического лома упрощенные способы представляют частный случай полной цепочки использования двух видов оснастки — совка и бады.

Вопросы оптимального наполнения совков косвенно освещены в работах российских и зарубежных авторов. В работе [5] предлагается загружать перед-

нюю часть совка легковесным ломом, а оставшуюся часть — крупногабаритными фрагментами. В исследованиях [6, 7] представлены рекомендации по формированию содержимого бады: легковесный лом укладывать на дно и поверх крупногабаритного; крупногабаритный лом и лом средних размеров располагать над легковесным; плавка должна содержать 35 – 40 % крупного лома, 40 – 45 % лома средних размеров и 15 – 20 % мелкого лома. Проблема заполнения рабочего пространства плавильных агрегатов элементами конечных размеров и объема характерна для сталеплавильных производств и рассматривается в исследованиях [8 – 13]. Исследования направлены на выработку оптимальной последовательности загрузки совков, бады и рабочего пространства ДСП.

Несмотря на множество теоретических и практических разработок в области определения способов загрузки металлической шихты в ДСП, остаются актуальными проблемы, связанные с отсутствием:

а) методик, способных накапливать и сохранять причинно-следственные связи между способами загрузки совков и значениями насыпной плотности металлического лома в рабочем пространстве ДСП;

б) методик прогностического моделирования расположения фрагментов металлического лома в рабочем пространстве ДСП в зависимости от используемой оснастки;

в) средств интеллектуальной поддержки при принятии решений о коррекции режимов работы ДСП в зависимости от фракционного состава металлического лома.

Учитывая результаты теоретического анализа и существующие проблемы в области интеллектуальной поддержки принятия решений при загрузке металлического лома в рабочее пространство ДСП, определили цель исследования: повышение эффективности

Таблица 1. Этапы проведения модельного эксперимента для исследования причинно-следственных связей размещения элементов металлического лома в рабочем пространстве печи

№	Этап	Используемые методики	Предполагаемые результаты
1	Построение системы критериев геометрического подобия для выбора замещающих объектов	Теория подобия и моделирования. Метод аналогий	Система критериев геометрического подобия реальных объектов для поиска замещающих объектов
2	Разработка плана проведения модельных экспериментов	Теория планирования экспериментов	План проведения модельного эксперимента
3	Проведение имитационного моделирования процесса загрузки с использованием замещающих объектов	Предметное моделирование, аналоговое моделирование	Набор результатов наблюдений в виде видеоизображений размещения элементов в конечном объеме
4	Обработка результатов наблюдения	Методы описательной и математической статистики	Оценка вероятности возникновения очагов эффектов «кострения» в конечном объеме

принятия решений о ведении выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи на основе результатов имитационного моделирования при размещении элементов металлического лома в рабочем пространстве печи. Объектом исследования является крупнотоннажная дуговая сталеплавильная печь для выплавки стали (ДСП-180). Предмет исследования — процесс загрузки шихтовых материалов в рабочее пространство ДСП с помощью имитационной модели процесса.

Обоснование способа исследования с помощью модельного эксперимента. При загрузке металлического лома в рабочее пространство ДСП существует вероятность производственных рисков, связанных с возникновением очагов «кострения» [3, 4, 14]:

- возрастание общей продолжительности цикла плавки дуговой сталеплавильной печи;
- увеличение времени нахождения дуги под током;
- увеличение удельного расхода электроэнергии;
- снижение производительности дуговой сталеплавильной печи;

обрушение негабаритных фрагментов металлического лома в процессе проплавления шихты, что приводит к поломке элементов оборудования в рабочем пространстве ДСП (графитированные электроды, водоохлаждаемые панели, газоокислородные горелки).

Проведение натурного эксперимента по исследованию причинно-следственных связей в технологической цепочке загрузки металлического лома в ДСП осложняется закрытостью рабочего пространства совка и бадьи, высокими температурами в рабочем пространстве ДСП и загрязненной атмосферой вокруг технологического оборудования. Изучение взаимосвязей расположения фрагментов металлического лома в бадье и рабочем пространстве ДСП и вероятности возникновения эффекта «кострения» [14 – 16] рационально провести с помощью модельных экспериментов (табл. 1).

Построение системы критериев геометрического подобия для выбора замещающих объектов. Схема технологического процесса формирования содержимого совков для загрузки в рабочее пространство печи ДСП-180 состоит из следующих этапов: исследовать содержимое совков; сформировать содержимое совка; перегрузить металлический лом из совков в бадью; загрузить металлический лом из бадьи в ДСП.

Основными объектами технологического процесса служат совок, загрузочная бадья, ДСП и металлическая шихта. Для указанных объектов определены замещающие объекты: пластиковый прозрачный совок; пластиковый прозрачный стакан; прозрачная банка; металлические фрагменты. На рис. 1 представлена схема соответствия замещающих объектов и объектов технологического процесса.

Для обоснования соответствия замещающих объектов и объектов технологического процесса использовали систему геометрических критериев подобия: геометрический критерий подобия высоты совка

$$K_{hs} = \frac{H_{rs}}{H_{ms}}, \quad (1)$$

где K_{hs} — геометрический критерий подобия высоты совка; H_{rs} — высота совка, м; H_{ms} — высота замещающего объекта, м;

геометрический критерий подобия длины совка

$$K_{ls} = \frac{L_{rs}}{L_{ms}}, \quad (2)$$

где K_{ls} — геометрический критерий подобия длины совка; L_{rs} — длина совка, м; L_{ms} — длина замещающего объекта, м;

геометрический критерий подобия высоты бадьи

$$K_{hb} = \frac{H_{rb}}{H_{mb}}, \quad (3)$$

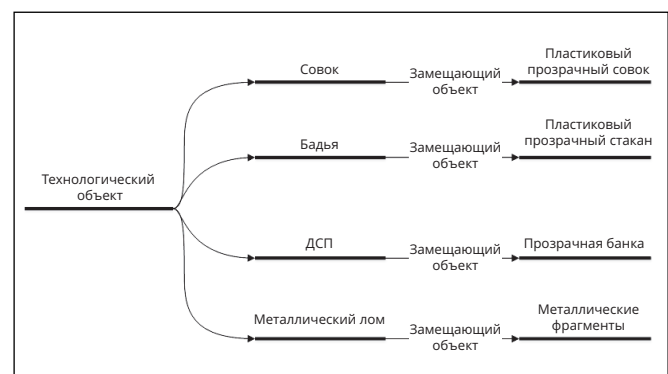


Рис. 1. Схема соответствия замещающих объектов и объектов технологического процесса

Таблица 2. Соответствие замещающих объектов и объектов технологического процесса

Объект	Коэффициент подобия, %	Параметры замещающих объектов, м
Пластиковый прозрачный совок	80 ± 1	$H_s = 0,14$ $L_s = 0,041$
Пластиковый прозрачный стакан	80 ± 1	$H_b = 0,08$ $D_b = 0,076$
Прозрачная банка	80 ± 1	$H_e = 0,058$ $D_e = 0,088$
Металлические фрагменты	80 ± 1	$L_{ms} = 0,03$
	80 ± 1	$L_{ms} = 0,0185$
	80 ± 1	$L_{ms} = 0,01$

где K_{hb} — критерий подобия высоты бадьи; H_{rb} — высота бадьи, м; H_{mb} — высота замещающего объекта, м; геометрический критерий подобия диаметра бадьи

$$K_{db} = \frac{D_{rb}}{D_{mb}}, \quad (4)$$

где K_b — критерий подобия диаметра бадьи; D_{rb} — диаметр бадьи, м; D_{mb} — диаметр замещающего объекта, м; геометрический критерий подобия высоты печи

$$K_{he} = \frac{H_{re}}{H_{me}}, \quad (5)$$

где K_{he} — критерий подобия высоты печи; H_{re} — высота печи, м; H_{me} — высота замещающего объекта, м; геометрический критерий подобия диаметра печи, вычисляемый по формуле (6):

$$K_{de} = \frac{D_{re}}{D_{me}}, \quad (6)$$

где K_{de} — критерий подобия диаметра печи; D_{re} — диаметр печи, м; D_{me} — диаметр замещающего объекта, м; геометрический критерий подобия длины металлического лома

$$K_{lm} = \frac{L_{rm}}{L_{mm}}, \quad (7)$$

Таблица 3. Порядок проведения модельного эксперимента

№	Операция	Входные данные	Выходные данные
1	Определить вариант формирования содержимого совка	Набор элементов конечной формы	Варианты формирования содержимого совков $Va_i, i = 1, 2, 3, 4$
2	Сформировать содержимое пластикового прозрачного совка	Варианты формирования содержимого совков Va_i Параметры объектов: размеры пластикового прозрачного совка; размеры металлических фрагментов	Содержимое пластикового прозрачного совка
3	Перезагрузить металлические фрагменты из пластикового прозрачного совка в пластиковый прозрачный стакан	Содержимое пластикового прозрачного совка	Содержимое пластикового прозрачного стакана
4	Загрузить металлические фрагменты из пластикового прозрачного стакана в прозрачную банку	Содержимое пластикового прозрачного стакана	Содержимое прозрачной банки

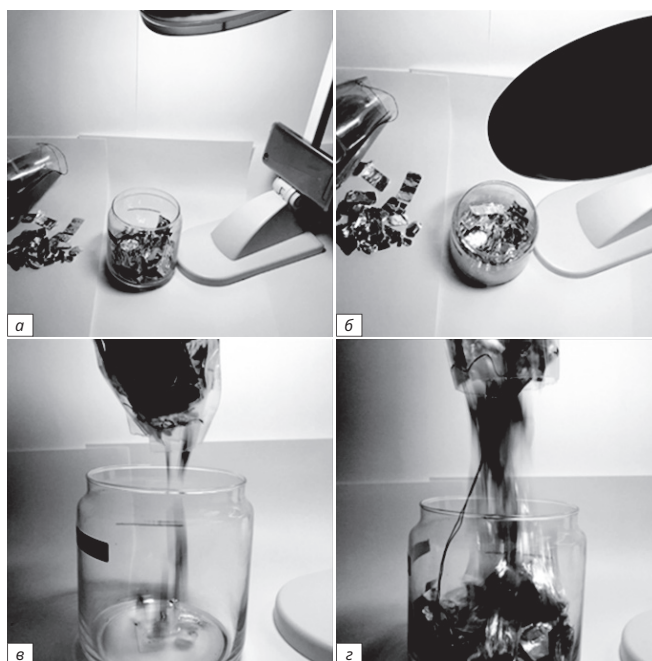


Рис. 2. Рабочее место для проведения модельных экспериментов: а — вид рабочего места сбоку; б — вид рабочего места сверху; в — видеокادر с процесса начала заполнения замещающего объекта; г — видеокادر процесса окончания заполнения замещающего объекта

где K_{lm} — критерий подобия длины металлического лома; L_{rm} — длина фрагмента металлического лома, м; L_{mm} — длина замещающего объекта, м.

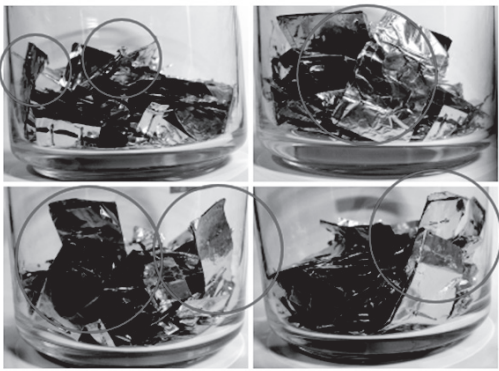
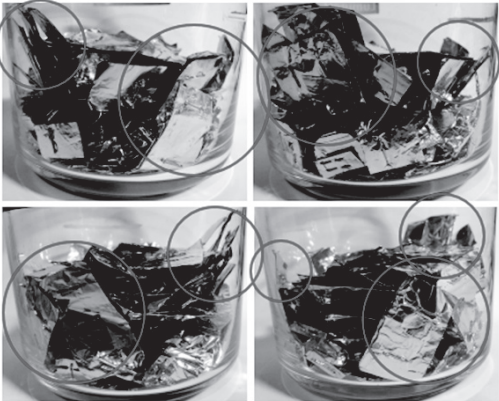
В результате расчета системы геометрических критериев подобия получили значения коэффициентов подобия и выбрали параметры замещающих объектов (табл. 2).

Разработка плана проведения модельных экспериментов. Цель модельных экспериментов — получить эмпирические данные о расположении металлических фрагментов в конечном объеме. Перечень объектов и оборудования, используемых в модельных экспериментах:

1) объекты:

замещающие объекты (пластиковый прозрачный совок, пластиковый прозрачный стакан, прозрачная банка, металлические фрагменты);

Таблица 4. Примеры экспериментов, при которых возникал эффект «кострения»

Показатель	Результат наблюдений
<p>Вариант формирования содержимого совков</p> <p>Снимки рабочего пространства замещающего объекта</p>	<p>Var₁: «А–В–С»</p> 
<p>Описание наблюдения</p>	<p>После завалки по одной стороне замещающего объекта обнаружено три наложения на стенки и одно взаимное налегание негабаритных металлических фрагментов</p>
<p>Количество очагов «кострения», шт.</p>	<p>Четыре</p>
<p>Снимки рабочего пространства замещающего объекта</p>	
<p>Описание наблюдения</p>	<p>После подвалки «В–С» обнаружено наложение негабаритных металлических фрагментов на 75 % окружности замещающего объекта. Зарегистрировано взаимное налегание негабаритных металлических фрагментов</p>
<p>Количество очагов «кострения», шт.</p>	<p>Пять</p>

2) контрольно-регистрирующее оборудование:
 фотовидеорегирующая аппаратура (мобильное устройство) для проведения фотосъемок размещения элементов в конечном объеме,
 персональный компьютер или мобильное устройство для обращения к порядку проведения модельных экспериментов,
 ручка и бумага для записи наблюдений;
 3) вспомогательное оборудование:
 настольная лампа для обеспечения цветопередачи и освещенности предметов.

Модельные эксперименты проводили в научной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им Г. И. Носова» в марте-апреле 2017 г. Были обеспечены удобные подходы к контролируемым элементам оборудования для визуального наблюдения за порядком проведения эксперимента (рис. 2). Модельные эксперименты проводили в соответствии с выбранными вариантами формирования содержимого совков {Var_i}. Обозначения: Var_i — вариант *i* формирования со-

держимого совков; А — металлический лом мелких размеров (до 0,5 м); В — металлический лом средних размеров (0,5 – 1,5 м); С — негабаритный лом (от 1,5 м).

Перечень вариантов формирования содержимого совков:

Var₁: «А–В–С» с двумя дополнительными загрузками (подвалки) «В–С» и «С–В»;

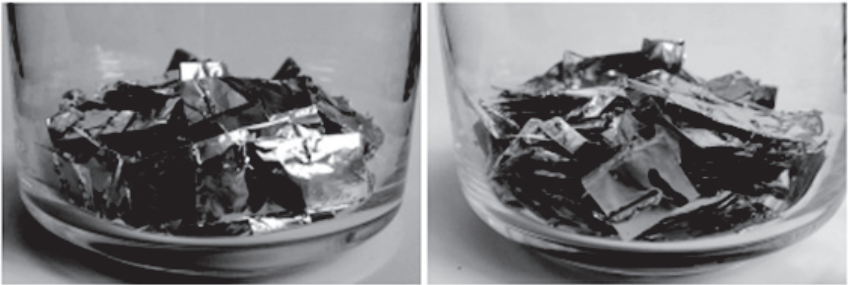

Var₂: «С–В–А» с подвалкой «С–В–А»;

Var₃: «С–В–С–В» с подвалками «С–В–С»;

Var₄: «В–С–В–С» с подвалками «В–С–В–С» и «С–В–С–В».

Имитационное моделирование процесса загрузки с использованием замещающих объектов проводили в количестве 60 наблюдений. Одному варианту формирования содержимого совка соответствовало 15 загрузок. Порядок проведения модельного эксперимента представлен в табл. 3. Выборочные результаты наблюдений (табл. 4 и 5) демонстрируют наличие и частичное отсутствие эффекта «кострения».

Таблица 5. Примеры экспериментов, при которых эффект «кострения» частично отсутствовал

Показатель	Результат наблюдения
Вариант формирования содержимого совков	Var ₃ : «С–В–С–В»
Снимки рабочего пространства замещающего объекта	
Описание наблюдения	После завалки не обнаружено наложений габаритных и негабаритных металлических фрагментов на стенки замещающего объекта или друг на друга
Количество очагов «кострения», шт.	Ноль
Снимки рабочего пространства замещающего объекта	
Описание наблюдения	После подвалки «С–В–С» обнаружено два незначительных наложения на стенки замещающего объекта. Взаимных налеганий габаритных и негабаритных металлических фрагментов не зарегистрировано
Количество очагов «кострения», шт.	Два

Обработка результатов наблюдения. В результате проведения имитационного моделирования процесса загрузки с использованием замещающих объектов получили эмпирические данные о количестве очагов «кострения» по вариантам формирования содержимого совков (табл. 6).

По результатам наблюдений построены:

1) гистограмма относительных частот по количеству эффектов «кострения» для каждого варианта формирования содержимого совков (рис. 3), которая продемонстрировала наличие очагов «кострения» с вероятностью от 0 (в одном случае) до 5 % в каждом варианте формирования содержимого совка;

2) гистограммы частот по количеству загруженных металлических фрагментов мелких, средних и негабаритных размеров для варианта формирования содержимого совка Var₁ (рис. 4 – 6). Модельные эксперименты доказывают, что:

металлические фрагменты мелких размеров в наименьшей степени воздействует на возникновение очагов «кострения» в пространстве прозрачной банки;

увеличение количества металлических фрагментов средних размеров в совке (от 200 шт.) способствует росту вероятности очагов «кострения» в рабочем пространстве печи;

Таблица 6. Результаты наблюдений

Номер наблюдения	Количество очагов «кострения» по вариантам, шт.			
	Var ₁	Var ₂	Var ₃	Var ₄
1	3	2	2	10
2	5	4	2	4
3	4	4	1	6
4	5	4	3	8
5	5	5	4	2
6	6	3	2	5
7	8	4	2	5
8	4	3	2	6
9	1	4	3	4
10	5	5	2	9
11	4	4	1	5
12	4	3	0	5
13	3	3	2	6
14	6	2	2	3
15	5	2	1	6

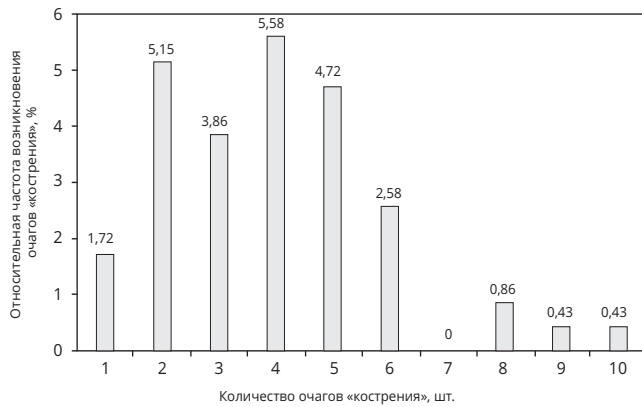


Рис. 3. Гистограмма частот по количеству очагов «кострения» по вариантам формирования содержимого совков

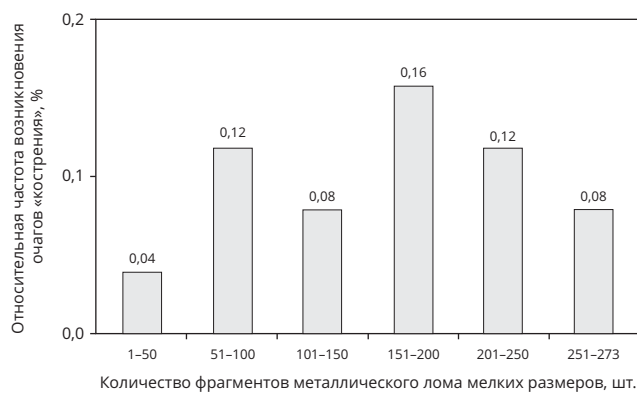


Рис. 4. Гистограмма частот по количеству загруженных металлических фрагментов мелких размеров с интервалом 50 по варианту формирования содержимого совка Var₁

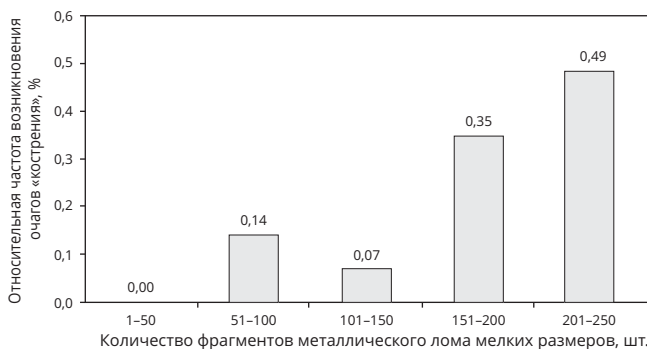


Рис. 5. Гистограмма частот по количеству загруженных металлических фрагментов средних размеров с интервалом 25 по варианту формирования содержимого совка Var₁

наличие металлических фрагментов негабаритных размеров в совке (от 2 до 22 шт.) приводит к вероятности возникновения очагов «кострения» в пространстве прозрачной банки.

ВЫВОДЫ

1. Построена система критериев геометрического подобия для выбора замещающих объектов, включающая геометрические критерии подобия по основным параметрам технологических объектов при приведении плавки в крупнотоннажной ДСП: совок, бадья, печь и металлический лом. С использованием систе-

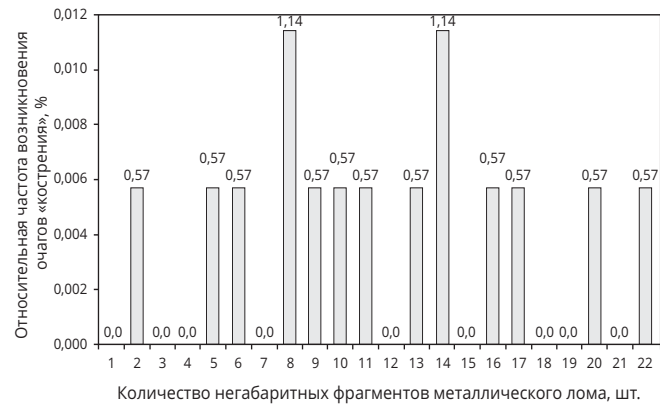


Рис. 6. Гистограмма частот по количеству загруженных негабаритных металлических фрагментов по варианту формирования содержимого совка Var₁

мы критериев геометрических подобия получены параметры объектов, позволившие осуществить выбор замещающих объекты для проведения модельных экспериментов.

2. Разработан план проведения модельных экспериментов, который включает определение цели наблюдений и перечень объектов наблюдения и оборудования (основное, контрольно-регистрирующее), выбор вариантов формирования содержимого совков {Var_i}. Сформировано рабочее место исследователя для проведения модельных экспериментов.

3. Проведено имитационное моделирование процесса загрузки с использованием замещающих объектов. Разработан порядок проведения модельного эксперимента. По результатам наблюдений получены видеоизображения размещения элементов в конечном объеме и количество очагов «кострения» в рабочем пространстве агрегата.

4. Результаты обработки видеоматериалов, полученных в ходе модельного эксперимента, показали: вероятность возникновения очагов «кострения» отлична от нуля в каждом варианте формирования содержимого совка, в который загружаются фрагменты металлического лома различных фракций;

в металлической шихте, составленной из металлических фрагментов мелких размеров, с вероятностью от 0 до 0,16 % возникают очаги «кострения» в рабочем пространстве агрегатов;

увеличение количества металлических фрагментов средних размеров в совке (от 200 шт.) способствует росту вероятности эффекта «кострения» в пространстве агрегата до 0,49 %;

наличие металлических фрагментов негабаритных размеров в совке (от 2 до 22 шт.) приводит к вероятности возникновения очагов «кострения» в рабочем пространстве агрегата до 1,14 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Steel statistical yearbook 2016. Brussels: World Steel Association, 2016. — 128 с.
- Логунова О. С., Павлов В. В., Ивин Ю. А. и др. // Сталь. 2012. № 9. С. 76 – 79.

3. Павлов В. В., Ивин Ю. А., Пехтерев С. В. и др. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи // Электromеталлургия. 2011. № 11. С. 2 – 6.
4. Трухов А. П., Маляров А. И. Литейные сплавы и плавка : учебник для вузов. — М. : ИЦ «Академия», 2004. — 336 с.
5. Поволоцкий Д. Я., Рошин В. Е., Рысс М. А. и др. Электromеталлургия стали и ферросплавов. — М. : Металлургия, 1974. — 551 с.
6. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали : учебник для вузов. — М. : Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. — 528 с.
7. ТИ 101-СТ-ЭСЦ—64. Технологическая инструкция «Выплавка стали в электропечах». — Магнитогорск, 2012. — 44 с.
8. VAI Continuous Casting Conference // Steel Times. 1996. Т. 8. С. 269 – 271.
9. Пат. 2478720 РФ, МПК С 21 С 5/52. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / Шишимиров М. В., Сосонкин О. М. ; опубл. 05.07.2011, Бюл. № 10.
10. Пат. 2407805 РФ, МПК С 21 С 5/52. Способ выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи и устройство для его осуществления / Шишимиров М. В., Сосонкин О. М. ; опубл. 06.06.2008, Бюл. №.36.
11. Пат. 2552807 РФ, МПК С 22 В 1/248. Способ подогрева металлического скрапа / Савин А. В., Никольский В. Е. ; опубл. 21.09.2011, Бюл. №. 12.
12. Логунова О. С., Ошурков В. А., Панов А. Н., Павлов В. В. Планирование модельных экспериментов для изучения процессов загрузки дуговой сталеплавильной печи // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 12-4. С. 60 – 68.
13. Саонов К. Е. Модельный эксперимент в океанологии. — СПб : РГГМУ, 2011. — 93 с.
14. Ошурков В. А., Логунова О. С., Чистяков Д. В. Критерии подобия составляющих элементов модельного эксперимента для изучения процесса загрузки шихтовых материалов в дуговой сталеплавильной печи / Тр. V всерос. конф. «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений». — УФА : ФГБОУ ВО «УГАТУ», 2017. С. 161 – 165.
15. Мухамбетов Б., Сагындыкова С., Нурлыбеков А. и др. Модельный эксперимент по очистке нефтезагрязненных почв // Научно-агрономический журнал. 2012. № 1 (90). С. 36 – 38.
16. Reinaud J. Industrial competitiveness under the European Union emissions trading scheme. — Paris: International Energy Agency, 2005. — 91 с.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Журнал «Сталь» публикует статьи о новых технологиях и оборудовании, а также о совершенствовании уже применяемых в черной металлургии, о передовом опыте улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции, путях достижения рентабельности производства, уменьшении вредного воздействия на окружающую среду и о других важных для отрасли вопросах.

В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи объемом не более 12 страниц должен быть дополнен **кратким рефератом** (3 – 5 предложений) и **ключевыми словами на русском и английском языках**, указанием УДК, а также списком подписей к рисункам. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1–2003; на труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки (рекомендуемая норма — до 5) должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями, без масштабной сетки (за исключением номограмм).

К статье должен быть приложен список авторов с указанием ФИО полностью, места работы каждого, телефона и электронного адреса.

Число авторов от 1 – 2 организаций не должно превышать 5 человек. Если статья представлена от большего числа организаций, то допускается в среднем по два человека от каждой организации.

Все материалы статьи редакция просит представлять в электронном виде (текст — в программе Word (Times New Roman, размер шрифта 12, междустрочный интервал 1,5)), рисунки — отдельным файлом в форматах TIFF или JPEG, диаграммы — в формате EXCEL).