

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»

На правах рукописи



Побегалова Екатерина Олеговна

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА  
НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Валерия Анатольевна Иванова

Магнитогорск – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ПОДХОД К УСТАНОВЛЕНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ЛИТЕЙНОГО КОКСА .....	10
1.1 Сравнительный анализ нормируемых требований и требований потребителей к качеству литейного кокса.....	10
1.2 Разработка подхода установления требований к качеству литейного кокса....	15
1.3 Построение жизненного цикла литейного кокса .....	21
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНОГО КОКСА .....	26
ГЛАВА 3 АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА.....	44
3.1 Разработка информационной модели динамики характеристик качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла .....	44
3.1.1 Формирование требований к качеству литейного кокса.....	44
3.1.2 Проектирование свойств литейного кокса.....	48
3.1.3 Закупки .....	50
3.1.4 Производство .....	53
3.1.5 Поставка потребителю.....	64
3.1.6 Применение.....	65
3.2 Разработка подхода к оценке качества литейного кокса в условиях жизненного цикла .....	70
3.3 Анализ метрологического обеспечения оценки качества литейного кокса.....	77
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА СТАДИИ «ПОСТАВКА ПОТРЕБИТЕЛЮ».....	87

4.1 Разработка методики оценки прочности литейного кокса на этапе транспортирования.....	87
4.2 Разработка методики оценки влажности литейного кокса при транспортировании .....	97
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА СТАДИИ «ПРИМЕНЕНИЕ» .....	106
5.1 Применение разработанного метода оценки влажности .....	106
литейного кокса на этапе хранения .....	106
5.2 Разработка методики оценки прочности литейного кокса на .....	107
этапе загрузки в вагранку .....	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
Приложение А.....	143
Приложение Б .....	144

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Литейный кокс получают методом рассева каменноугольного кокса с выделением классов крупности 60 мм и более и применяют в процессе выплавки чугуна при производстве отливок различного назначения.

Оценка характеристик качества литейного кокса позволяет получить достоверные данные о его потребительских свойствах, обеспечивающих требуемые состав и температуру выплавляемого чугуна, энергоэффективность плавки, дренажную способность столба шихты.

В настоящее время характеристики качества литейного кокса установлены межгосударственным стандартом ГОСТ 3340-88 и техническими условиями, но, несмотря на это потребители не удовлетворены его качеством. Это свидетельствует о том, что нормируемые показатели качества не отражают потребительские свойства литейного кокса. Кроме того, большое значение при оценке характеристик качества литейного кокса имеют методы испытаний, условия которых должны соответствовать условиям применения литейного кокса, т.е. плавки чугуна в вагранке. Значения показателей (характеристик) качества литейного кокса, указанные в сопроводительных документах, не являются стабильными и изменяются на различных этапах жизненного цикла – в процессе хранения и доставки от изготовителя до потребителя, что осложняет разработку методов испытаний для их оценки.

В связи с этим возникает необходимость в исследовании динамики свойств, характеризующих качество литейного кокса на всех стадиях жизненного цикла, что позволит выявить перечень характеристик качества и разработать соответствующие методы испытаний.

**Степень разработанности темы исследований.** Проблемы качества каменноугольного кокса рассмотрены такими авторами, как В.И. Бабанин, Д.А. Мучник, Б.А. Онусайтис, С.И. Пинчук, К.И. Сысков, М.Л. Улановский, П.А. Щукин, Ф.Л. Шапиро и др. Результаты исследований в области качества литейного кокса

отражены в работах В.А. Ивановой, П.Я. Нефедова, И.Ф. Селянина. Вопросы, связанные с подходами к оценке качества продукции рассматривали Г.Г. Азгальдов, Ю.П. Адлер, А.А. Ивахненко, А.Г. Корчунов, Г.Ш. Рубин и др. Разработкой вопросов плавки чугуна в коксовой вагранке занимались В.А. Грачев, И.Ф. Селянин, Ю.С. Сухарчук, А.К. Юдкин. Исследования технологии производства и свойств каменноугольного кокса проводили А.А. Агроскин, А.Я. Ерёмин, Р.Е. Лейбович, Р. Луазон.

Несмотря на проработанность темы, вопросы изменения характеристик качества на различных этапах жизненного цикла не нашли подробного отражения в исследованиях. Важной и актуальной остается задача разработки методов оценки характеристик качества литейного кокса в условиях, сопоставимых с условиями процессов его жизненного цикла.

**Целью диссертационной работы является** разработка и научное обоснование методических основ оценки качества литейного кокса в условиях изменения характеристик качества на этапах жизненного цикла.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Научно обосновать перечень характеристик качества литейного кокса на основе классификации свойств и параметров;
- 2) разработать информационную модель изменения характеристик качества литейного кокса на этапах жизненного цикла;
- 3) разработать научно обоснованный подход к оценке качества литейного кокса в условиях изменения характеристик качества на этапах жизненного цикла;
- 4) провести анализ особенностей проведения методов испытаний для оценки характеристик качества литейного кокса на соответствие условиям его применения на этапах жизненного цикла;
- 5) разработать методы и средства испытаний для оценки характеристик качества литейного кокса на этапах жизненного цикла.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработан научный подход к установлению требований к качеству литейного кокса, основанный на упорядочении терминов и их определений, классификации его

свойств и систематизации параметров, характеризующих эти свойства, позволяющий формировать перечень характеристик качества на основании требований потребителей.

2. Разработана система классификации, определены классификационные признаки и проведена классификация свойств и параметров литейного кокса с учетом требований потребителей, что позволяет повысить согласованность требований между производителем и потребителем к качеству литейного кокса.

3. Разработана система оценки качества литейного кокса на этапах жизненного цикла, основанная на выборе показателей и методов испытаний для оценки характеристик качества, позволяющая оценить изменение качества литейного кокса на стадиях «Поставка потребителю» и «Применение».

**Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем.**

1. Проведены работы по классификации свойств и параметров литейного кокса, позволяющие достичь упорядоченности в применении терминов и определений, а также ввести два новых свойства «способность к поддержанию температуры плавки» и «способность к изменению химического состава чугуна».

2. Разработана информационная модель динамики характеристик качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла, на основе которой установлено, что формирование свойств литейного кокса происходит на стадиях «Закупки» и «Производство»; изменение свойств – на стадиях «Производство», «Поставка потребителю», «Применение».

3. Разработаны методы оценки качества литейного кокса на стадии «Применение» – метод испытаний и показатель  $P_T$ , позволяющие оценить разрушение литейного кокса различных классов крупности при транспортировании железнодорожным транспортом на различные расстояния; метод испытаний, испытательное оборудование и показатель  $P_3$ , позволяющие оценить прочность литейного кокса при загрузке в вагранку металлической части шихты.

4. В результате экспериментальных исследований установлено, что в условиях транспортирования железнодорожным транспортом литейный кокс класса крупности 80 мм и более разрушается до классов крупности 60-80 мм и менее 40 мм;

а при транспортировании и хранении на шихтовом дворе в условиях повышенной влажности окружающей среды влажность литейного кокса товарной крупности достигает 10 % и более, при этом наибольшее повышение влажности характерно для литейного кокса класса крупности 60-80 мм.

5. Результаты диссертационной работы внедрены в ПАО «Автодизель» (ЯМЗ), в ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» в учебном процессе по направлениям подготовки 22.03.01, 22.04.01 – Материаловедение и технологии материалов, 27.03.01, 27.04.01 – Стандартизация и метрология.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования проводили с использованием методов системного и статистического анализа, методов стандартизации (классификация, систематизация и упорядочение), планирования эксперимента. Экспериментальные исследования осуществляли с использованием промышленных образцов литейного кокса, средств измерений и аттестованного испытательного оборудования.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Система классификации свойств и параметров литейного кокса, включающая: метод классификации – иерархический; классификационный признак – природа проявления свойств; принцип классификации – ориентация на требования потребителей к качеству выплавляемого чугуна; классификацию свойств и параметров литейного кокса.

2. Новые методы испытаний для оценки характеристик качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла «Поставка потребителю» и «Применение» и характеризующие их параметры: показатель разрушения литейного кокса при транспортировании  $P_T$ ; показатель влажности литейного кокса товарной крупности при транспортировании и хранении  $W_{Т.К.}$ ; показатель прочности литейного кокса при загрузке в вагранку металлической части шихты  $P_3$ .

3. Методика оценки уровня качества литейного кокса в условиях жизненного цикла, основанная на выборе показателей характеристик качества и методов испытаний на каждом этапе жизненного цикла.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований, полученных экспериментальным путем, обеспечивают использование стандартных статистических методов обработки результатов прямых многократных измерений, а также применение стандартных методик расчета погрешностей прямых и косвенных измерений. Результаты исследований были опубликованы в печатных изданиях. Основные положения диссертации представлены и обсуждены на следующих Международных научно-практических конференциях: «Литейное производство сегодня и завтра» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.), «Наука и образование - ведущие факторы Стратегии «Казахстан – 2050» (г. Караганда, 2013 г.), «Научно-технический прогресс в черной металлургии» (г. Череповец, 2015, 2017 гг.), «Управление качеством» (г. Москва, 2016, 2017, 2018, 2020 гг.), «Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом: свойства, технология, контроль» (г. Набережные Челны, 2017 г.), «Наука и технологии модифицирования чугуна» (г. Набережные Челны, 2018 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием (г. Ярославль, 2014, 2015, 2016, 2019, 2020 гг.); Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Наследственность в литейно-металлургических процессах» (г. Самара, 2018 г.), «Управление качеством в образовании и промышленности» (г. Севастополь, 2019 г.); научно-практической конференции «Современное состояние науки и практики в областях стандартизации, метрологии и управления качеством в Российской Федерации» (г. Владимир, 2015 г.); I Всероссийской научно-практической конференции «Техническое регулирование, метрологическое обеспечение и управление качеством в коксохимическом производстве» (г. Ярославль, 2020).

**Область исследования.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом специальности 05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции: п. 1 «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики качества объектов», п. 2 «Стандартизация, метрологическое обеспечение, управление качеством и сертификация», п. 3 «Методы стандартизации и менеджмента (контроль, управление,

обеспечение, повышение, планирование) качества объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции».

**Объект и предмет исследований.** Объектом исследования является качество литейного кокса на этапах жизненного цикла, предметом – оценка качества литейного кокса на этапах жизненного цикла.

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 35 работ, из них 5 статей опубликованы в российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, имеется 9 публикаций в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 177 наименований. Текст диссертации изложен на 142 страницах и содержит 22 рисунка, 41 таблицу, 11 формул, 2 приложения на 2 страницах.

Автор выражает благодарность за содействие при выполнении работы А.М. Турову, начальнику литейного цеха Ярославского электровозоремонтного завода имени Б.П. Бещева – филиал ОАО «Желдорреммаш» (г. Ярославль), С.В. Губанову, заместителю генерального директора по режиму, кадрам и социальным вопросам ПАО «Ростовский оптико-механический завод», В.В. Афоничеву, руководителю контрольно-испытательного центра ПАО «Ростовский оптико-механический завод», И.В. Яичкову, главному технологу по подготовке производства отдела главного металлурга ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод).

## ГЛАВА 1 ПОДХОД К УСТАНОВЛЕНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К КАЧЕСТВУ ЛИТЕЙНОГО КОКСА

### 1.1 Сравнительный анализ нормируемых требований и требований потребителей к качеству литейного кокса

В настоящее время номенклатура характеристик, по которым принято оценивать качество литейного кокса, установлена в межгосударственном стандарте ГОСТ 3340-88 [1], а также в различных ТУ [2–4]. На данный момент в соответствии с указанными нормативными документами выделяют следующие характеристики качества литейного кокса: 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 (%) и, в некоторых случаях, выход летучих веществ ( $V^{daf}$ , %) и массовую долю фосфора ( $P^a$ , %) (табл. 1).

Несмотря на это, потребители неудовлетворены качеством литейного кокса.

Недовольство потребителей может объясняться следующими причинами:

- 1) в нормативно-технической документации (ГОСТ 3340-88, ТУ) установлены требования не позволяющие объективно оценить качество литейного кокса;
- 2) значения характеристик качества литейного кокса, указанное в сопроводительных документах, изменяются;
- 3) существующие методы оценки не позволяют оценить качество литейного кокса в следствие их несоответствия реальным условиям, в которых находится литейный кокс.

Таблица 1 – Требования нормативных документов к качеству литейного кокса

	Нормативный документ					
	ГОСТ 3340-88 [1]			ТУ 0761-250-00190437-2014 [4]	ТУ 0761-028-00187852-10[3]	ТУ 0761-027-00187852-10[2]
	КЛ 1	КЛ 2	КЛ 3			
Массовая доля влаги, $W_t^r$ , %, не более	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Зольность, $A^d$ , %, не более	12,0	11,0	11,5	12,0	12,5	12,0
Массовая доля серы, $S_t^d$ , %, не более	0,6	1,0	1,4	0,5	0,6	0,6
Показатель прочности, $M_{40}$ , %, не менее:						
для 80 мм и более				76,0		78,0
для 60 мм и более	76,0	78,0	78,0			76,0
для 40 мм и более	73,0	77,0	77,0		70,0	73,0
Показатель прочности $M_{10}$ , %, не более					10,0	
Доля кусков размером менее нижнего предела, %, не более:						
для 80 мм и более				30,0		28,0
для 60 мм и более	14,0(20,0)	14,0(20,0)	14,0(20,0)			20,0
для 40 мм и более	6,0	6,0	6,0		10,0	6,0
Доля кусков менее 40 мм, %, не более				6,0		
Выход летучих веществ, $V^{daf}$ , %, не более					1,2	1,0
Массовая доля фосфора, $P^a$ , %, не более				0,065		

Проведен анализ требований потребителей к качеству литейного кокса с использованием метода экспертных оценок. В качестве экспертов был привлечен инженерно-технический персонал, ответственный за плавку чугуна в вагранке на предприятиях ОАО «Каменск-уральский металлургический завод», ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод), ОАО «Литмаш», АО «ТЯЖМАШ», ООО «Группа компаний «ВЭМЗ». Экспертам была предоставлена анкета, в которой предлагалось проставить баллы наиболее значимым показателям качества литейного кокса. Также эксперты имели возможность самостоятельно внести дополнительные показатели. Результаты анкетирования представлены в таблице 2 [5].

Таблица 2 – Экспертные оценки характеристикам литейного кокса

Номер	Характеристики литейного кокса	Эксперт				
		1	2	3	4	5
1	Сера	4	4	5	1	5
2	Зольность	2	2	4	4	4
3	Влажность	5	1	3	0	5
4	Крупность	3	3	3	5	5
5	Пористость	3	0	1	5	1
6	Прочность на истирание	4	1	2	4	0
7	Прочность на сбрасывание	4	0	2	5	0
8	Прочность на ударные нагрузки	4	5	2	5	1
9	Прочность при высоких температурах	4	5	2	1	0
10	Равномерность по крупности	5	3	3	3	5
11	Содержание летучих	0	1	1	1	2
12	Содержание фосфора	0	1	3	0	4
13	Реакционная способность	5	2	5	3	4
Дополнительные показатели						
14	Теплота сгорания	-	-	5	-	-

Исследование выявило слабую согласованность мнений экспертов (расчетное значение коэффициента конкордации составляет  $W=0,3$ ). Несмотря на это, проведенная оценка значимости коэффициента конкордации (расчетное значение коэффициента Пирсона  $\chi^2=18,08$  меньше табличного (21,02607) при заданном уровне значимости  $\alpha=0,05$ ) позволяет использовать полученные данные в дальнейших исследованиях [6].

Анализ мнения потребителей литейного кокса выявил, что наиболее значимыми являются такие показатели, как содержание серы, реакционная способность, крупность, равномерность по крупности, прочность на ударные нагрузки, зольность и влажность.

Для определения содержания серы в литейном коксе в настоящее время используют шесть методов: определение содержания серы с использованием ИК-спектрометрии (показатели: массовая доля общей серы в сухом топливе  $S^d_t$ , % и в расчете на аналитическую пробу  $S^a_t$ , % [7]), метод Эшка (показатели: массовая доля общей серы  $S$ , % и массовая доля общей серы в расчете на аналитическую пробу  $S^a_t$ , % [8]), метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре (показатель: массовая доля общей серы в расчете на аналитическую пробу  $S^a_t$ , % [9]) и метод определения форм серы (показатели: массовая доля сульфатной серы  $S^{a_{SO_4}}$ , %, пиритной серы  $S^a_p$ , %, органической серы  $S^a_o$ , % [10]). Требованиями нормативной документации установлено значение массовой доли серы в сухом состоянии топлива  $S^d_t$ , % (табл. 1).

В качестве показателей реакционной способности каменноугольного кокса по  $CO_2$  выделяют CRI, % [11, 12] и  $K$ ,  $cm^3/gc$  [13]. В нормативной документации, регламентирующей требования к литейному коксу, показателей реакционной способности нет (табл. 1).

Выход классов крупности литейного кокса определяют методами ситового анализа [14]. Классификация каменноугольного кокса по размеру кусков установлена в [15]. В нормативной документации есть ограничения по содержанию классов крупности менее нижнего предела, однако точных требований к распределению кокса по классам крупности и равномерности его гранулометрического состава нет (табл. 1).

Для оценки прочности литейного кокса существует целый ряд методов: метод определения механической прочности в МИКУМ и ИРСИД-барабанах (показатели прочности  $M_{10}$ ,  $M_{20}$ ,  $M_{25}$ ,  $M_{30}$ ,  $M_{40}$ ,  $M_{60}$ ,  $M_{80}$ ,  $M_{100}$ , % и  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{30}$ ,  $I_{40}$ , % [16]), метод определения структурной прочности (показатель  $P_c$ , % [17]) и прочности кускового кокса (показатели  $P_{25}$ ,  $P_{10}$  ( $I_{10}$ ), % [17]). В нормативной документации встречаются

показатели прочности  $M_{40}$ , % и  $M_{10}$ , % (табл. 1). Однако, условия испытаний, для определения этого показателя представляют собой совокупность дробящих и истирающих воздействий, сопровождаемых ударами отдельных образцов кокса друг о друга и падением их с высоты не более 1 м. По причине комплексного характера нагружения нельзя однозначно сказать, что данный показатель воспроизводит поведение литейного кокса при чистых ударных воздействиях, характерных для процесса загрузки вагранки и плавки чугуна [18, 19].

Метод определения зольности литейного кокса регламентирован в [20], показатель  $A^d$ , % входит в требования всех нормативных документов (табл. 1).

Влажность литейного кокса оценивается параметрами общей влаги ( $W_t^r$ ,  $W_t$ , % [21]) и влаги в аналитической пробе ( $W^a$ , % [21]). В нормативной документации содержатся требования к массовой доле общей влаги  $W_t^r$ , % (табл. 1). Однако стандартный метод испытаний предполагает проведение испытаний на измельченных пробах кокса, что в свою очередь не вполне отражает реальные условия его применения и может быть причиной недовольства потребителей.

Это свидетельствует о том, что требования нормативной документации не отражают в полной мере требования потребителей (табл. 3).

Таблица 3 – Сравнение требований потребителей с требованиями нормативной документации

Требование потребителей	Требование нормативной документации			
	ГОСТ 3340-88 [1]	ТУ 0761-250-00190437-2014 [4]	ТУ 0761-028-00187852-10 [3]	ТУ 0761-027-00187852-10 [2]
Содержание серы	+	+	+	+
Реакционная способность	-	-	-	-
Крупность	+/-	+/-	+/-	+/-

Таблица 3 (окончание)

Требование потребителей	Требование нормативной документации			
	ГОСТ 3340-88 [1]	ТУ 0761-250-00190437-2014 [4]	ТУ 0761-028-00187852-10 [3]	ТУ 0761-027-00187852-10 [2]
Равномерность по крупности	-	-	-	-
Прочность на ударные нагрузки	+/-	+/-	+/-	+/-
Зольность	+	+	+	+
Влажность	+/-	+/-	+/-	+/-
Примечание: знак «+» означает, что требование содержится в нормативной документации; знак «-» - требование отсутствует; знак «+/-» - требование присутствует в нормативной документации частично.				

## 1.2 Разработка подхода установления требований к качеству литейного кокса

На данный момент не сложилось единого мнения относительно исчерпывающего перечня характеристик качества каменноугольного кокса [22–24]. Однако, нужно отметить, что большинство работ посвящено качеству кокса металлургического, отличающегося по свойствам и назначению от кокса литейного [25–29].

В России литейный и металлургический кокс производят по единой технологии [30, 31]. После прохождения сортировки валовый кокс, полученный из одной печи, делится на металлургический (преимущественно мелкие классы крупности 40-60 мм) и литейный (классы крупности 40-60 мм, 60-80 мм и 80 мм и более) [32]. Поскольку большая часть всего производимого кокса используется в доменном переделе, при составлении шихты чаще всего ориентируются на получение заданных свойств металлургического кокса [33–36].

Литейный кокс отличается от доменного не только крупностью, но и решаемыми задачами в процессе плавки чугуна [18, 37]. Если в доменном производстве в задачи кокса входит обеспечение теплом и создание восстановительной среды, то в производстве литейном помимо требуемой температуры для перегрева чугуна большое значение имеет обеспечение дренажной способности, позволяющей беспрепятственно проходить в шахте вагранки дутью и расплавленному металлу [18, 37]. В конце двадцатого века на территории нашей страны литейный кокс производили несколько заводов, в том числе велись исследовательские работы по улучшению качества литейного кокса [38]. В последнее десятилетие объем кокса для литейных производства был сокращен из-за снижения спроса. По этой причине деятельность по повышению качества литейного кокса должна осуществляться в первую очередь вне печной камеры [38].

В связи с этим возникает необходимость в более глубоком анализе процессов производства и применение литейного кокса и пересмотре номенклатуры требований к качеству литейного кокса [39].

Для объективной оценки качества литейного кокса необходимо:

- 1) определить требования к качеству – установить перечень характеристик качества;
- 2) проследить динамику изменения характеристик качества на стадиях жизненного цикла;
- 3) определить соответствие методов оценки характеристик качества условиям, в которых находится литейный кокс.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000-2015 требования, как правило, определяют в виде характеристик. Характеристика представляет собой отличительное свойство объекта стандартизации. Она может быть присущей или присвоенной, а также качественной или количественной [40].

Характеристики объекта делят на классы, к которым относят [40]:

- 1) физические (например, механические, электрические, химические или биологические характеристики);

- 2) органолептические (например, связанные с запахом, осязанием, вкусом, зрением, слухом);
- 3) этические (например, вежливость, честность, правдивость);
- 4) характеристики, связанные со временем (например, пунктуальность, безотказность, доступность, непрерывность);
- 5) эргономические (например, физиологические характеристики или связанные с безопасностью человека);
- б) функциональные (например, максимальная скорость самолета).

Под характеристикой качества понимают присущую объекту характеристику, относящуюся к требованию, т.е. к установленной потребности в чем-то [40]. При этом важно отметить, что к характеристикам качества относят только характеристики, присущие объекту. Присущие характеристики, в отличие от присвоенных (цена), существуют в самом объекте на постоянной основе (размер, электросопротивление и т.д.). При этом установленным является только то требование, которое определено в документальной форме [40].

При регламентировании тех или иных характеристик в документе (стандарте, технических условиях) применяют численные значения этих характеристик, т.е. не отличительные свойства, а параметры, характеризующие эти свойства.

Исходя из этого, под характеристикой качества мы будем понимать присущее литейному коксу отличительное свойство, относящееся к потребности или ожиданию, которое установлено, предполагается или является обязательным [40]. В свою очередь, показатель качества – это параметр, численно характеризующий заданную характеристику качества литейного кокса [40, 41].

Задача разработки требований к качеству литейного кокса в первом приближении сводится к определению перечня характеристик его качества. Для решения этой задачи была разработан представленный ниже подход (рис. 1).

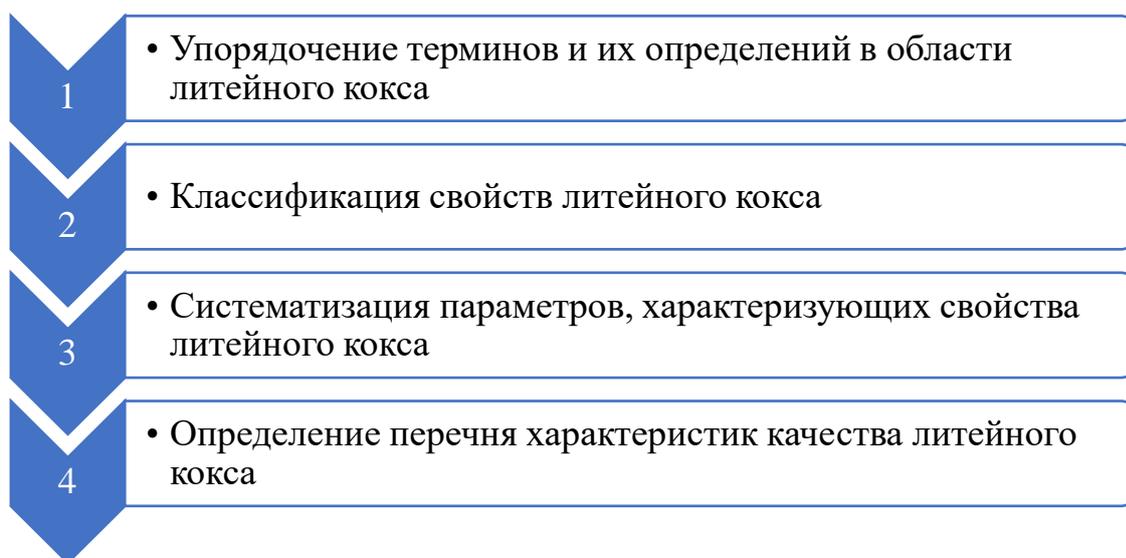


Рисунок 1 – Подход к определению требований к качеству литейного кокса

Необходимость в первом этапе указанного подхода возникает по причине неоднозначности в применении понятий свойств и параметров в работах, посвященных качеству каменноугольного кокса [25, 30, 31, 42].

В области коксохимии применяют большое многообразие различных терминов (например, «гранулометрический анализ», «гранулометрический состав», «содержание золы», «зольность» и т.д.) [43], а также существует путаница в понятиях «свойство» и «параметр» [44, 45] в области каменноугольного кокса (например, под свойством «Влажность» [22, 23, 30, 46] зачастую подразумевают параметр, установленный в ГОСТ 3340-88 «массовая доля общей влаги в рабочем состоянии топлива,  $W_t$ , %»). Второй распространенный пример – прочность, являющаяся свойством кокса [30, 47, 48], которое характеризуется целым рядом параметров, полученных при испытаниях в различных условиях –  $M_{40}$  [16],  $M_{25}$  [16], CSR [11, 12] и др. Однако эти параметры зачастую представляют, как свойства. Причем, если для металлургического кокса, используемого в доменном переделе, существуют работы в области классификации свойств, то для литейного кокса – они отсутствуют [43]. Кроме того, необходимо отметить, что действует стандарт, устанавливающий достаточно полный перечень показателей (параметров) качества [49], однако подобная стандартизация отсутствует для свойств.

Второй этап – классификация свойств литейного кокса в соответствии с выбранным классификационным признаком должна порождать жесткую ветвящуюся структуру большой информационной емкости, которая позволит в дальнейшем наиболее объективно выделить именно те свойства и характеризующие их параметры, которые наилучшим образом подходят для оценки качества литейного кокса.

Свойства каменноугольного кокса рассматриваются во множестве работ, при этом единая классификация отсутствует (табл. 4).

Таблица 4 – Свойства каменноугольного кокса, определяющие его качество по мнению различных авторов

Группа свойств	Свойства	Источник
Физические свойства	Структура, плотность, твердость, прочность, гранулометрический состав насыпной массы, термостойкость, электрическая проводимость (удельное электрическое сопротивление)	[50]
	микроструктура, истинная и кажущаяся плотность, пористость, электропроводность (электросопротивление), структурная прочность, прочность на раздавливание, теплоемкость, теплота сгорания, температура воспламенения, теплопроводность, температуропроводность	[30]
	микроструктура, истинная и кажущаяся плотности, пористость, электропроводность (электросопротивление), структурная прочность, прочность на раздавливание, теплота сгорания, температура воспламенения, теплопроводность, температуропроводность	[42]

Таблица 4 (окончание)

Группа свойств	Свойства	Источник
Химические свойства	выход летучих веществ, элементный состав, теплота сгорания, влага, содержание минеральных примесей, содержание серы, содержание фосфора	[47]
	влага, зола, сернистость, выход летучих веществ, фосфор	[30]
	влажность, зольность, выход летучих, содержание серы, углерода и водорода, реакционная способность	[48]
	влажность, зольность, сернистость, фосфористость, выход летучих веществ, содержание углерода, водорода, азота.	[42]
Физико-химические свойства	реакционная способность, горючесть	[50]
	реакционная способность, горючесть	[47]
	горючесть, реакционная способность, смачиваемость	[30]
	горючесть, реакционная способность	[42]
Физико-механические свойства	пористость, прочность, дробимость, истираемость, сопротивление раздавливанию, термическая стойкость	[47]
	крупность кусков, равномерность гранулометрического состава, прочность по отношению к дробящим и истирающим усилиям	[30]
	крупность кусков, равномерность гранулометрического состава, прочность к дробящим и истирающим нагрузкам, насыпная масса	[42]
Механические свойства	гранулометрический состав, механическая прочность, трещиноватость, газопроницаемость	[48]

Подобная несогласованность затрудняет взаимодействие между производителями и потребителями литейного кокса, не позволяет однозначно сформулировать требования и как следствие оценить качество.

Систематизация – третий этап – позволит установить номенклатуру показателей, характеризующих каждое отдельное свойство. Например, одно и то же свойство, например, реакционная способность, может оцениваться несколькими параметрами: CRI [11, 12], K [13] и PC [51].

На последнем этапе предстоит выделить перечень характеристик качества на основании требований потребителей литейного кокса.

Для дальнейшего определения динамики качества литейного кокса необходимо проанализировать процессы, происходящие с ним на всех стадиях и этапах жизненного цикла.

Определив динамику качества литейного кокса и установив стадии и этапы ЖЦ, на которых изменяются его характеристики качества необходимо проанализировать наличие метрологического обеспечения определения значений характеристик качества.

Установив перечень характеристик качества и метрологическое обеспечение определения значений этих характеристик, можно говорить об оценке качества литейного кокса.

### 1.3 Построение жизненного цикла литейного кокса

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 9001-2015 [52] управление качеством продукции должно осуществляться на всех стадиях жизненного цикла.

Под жизненным циклом продукции (ЖЦП) понимают совокупность взаимосвязанных процессов изменения состояния продукции при ее создании, использовании (эксплуатации) и ликвидации (с избавлением от отходов путем их утилизации и/или удаления) [53].

Жизненный цикл принято делить на стадии. Каждая стадия представляет собой условно выделяемую часть ЖЦП, которая характеризуется спецификой

направленности работ, производимых на этой стадии, и конечными результатами [53]. В зависимости от специфики продукции количество и наименование стадий может различаться, некоторые стадии могут объединяться, а также перекрывать друг друга [54]. Сопоставление описания стадий жизненных циклов различных видов продукции (табл. 5) дает наглядное представление о различиях в названиях, формулировках и общем количестве стадий, выделяемых в различных стандартах даже для продукции одного вида [55].

Таблица 5 - Сопоставление содержания стадий жизненного цикла различной продукции

Продукции военного назначения ГОСТ Р 56135- 2014	Антропогенных объектов и сред ГОСТ Р 57269- 2016	Продукция производственно- технического назначения		ГОСТ Р ИСО 9001-2015
		ГОСТ Р 15.000- 2016	ГОСТР Р 53791-2010	
	Идея			Формирование требований
	Концепция		Обоснование разработки	
Создание НТЗ	Планирование	Исследование и проектирование	Разработка ТЗ	Проектирование и разработка
Формирование концепции образца	Требование			
Разработка	Разработка	Разработка	Проведение ОКР	Закупки
Производство	Проверка на соответствие требованиям	Изготовление	Производство и испытания	Производство
	Реализация		Модернизация	
		Поставка		Выпуск
	Валидация и верификация			

Таблица 5 (окончание)

Продукции военного назначения ГОСТ Р 56135- 2014	Антропогенных объектов и сред	Продукция производственно- технического назначения		ГОСТ Р ИСО 9001-2015
	ГОСТ Р 57269- 2016	ГОСТ Р 15.000- 2016	ГОСТР Р 53791-2010	
Эксплуатация	Эксплуатация	Эксплуатация	Использование	
Капитальный ремонт	Накопление знаний			
	Модернизация			
Утилизация	Вывод из эксплуатации	Ликвидация	Ликвидация	

Внутри стадий ЖЦП выделяют этапы [53] - части стадии, характеризующие существенное, качественное изменение системы [54]. При описании ЖЦ литейного кокса можно выделить стадии и этапы, описанные ниже (рис. 2).

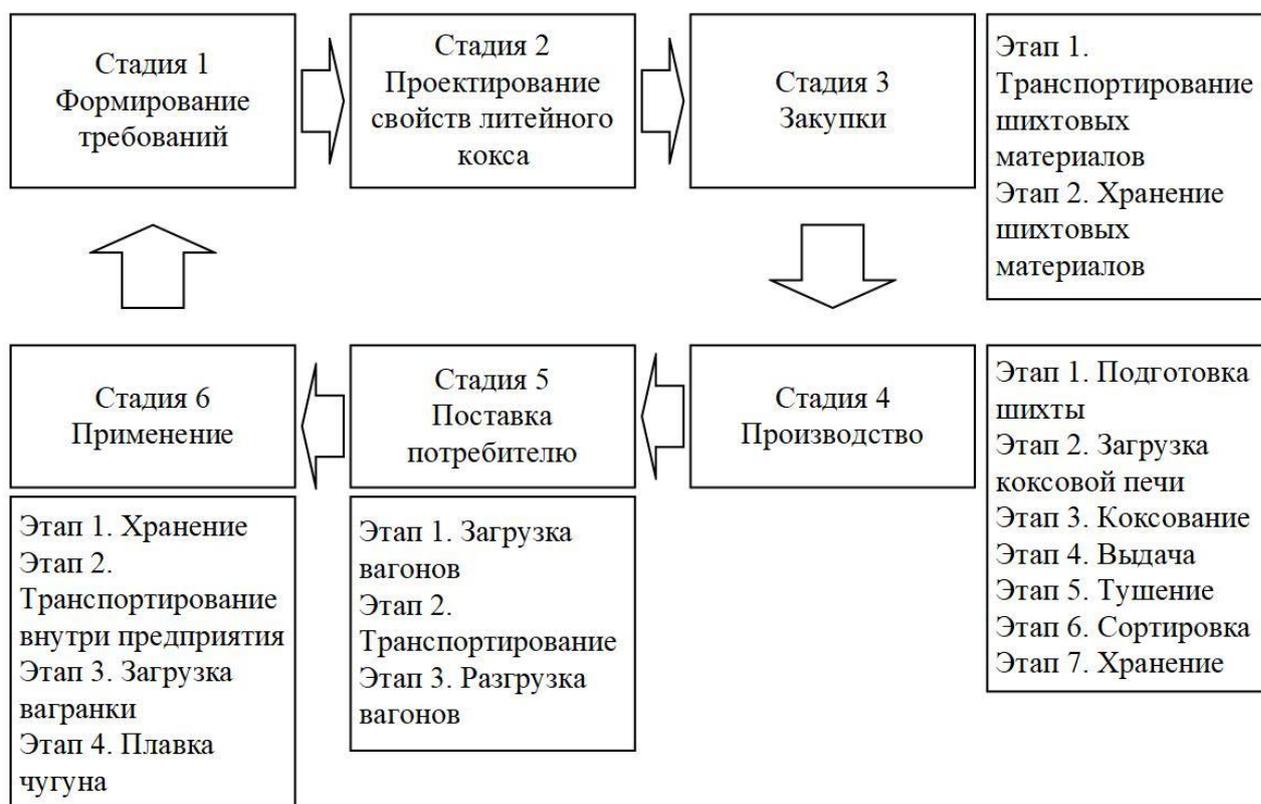


Рисунок 2 – Жизненный цикл литейного кокса

Первой стадией является «Формирование требований». Специфика работ на данной стадии в общем случае предусматривает проведение маркетинговых исследований [53], а также осуществление связи с потребителем, определение и анализ требований к продукции [52, 56].

Поскольку потребителями литейного кокса являются организации – предприятия литейного производства [52]. Однако, поскольку применение литейного кокса локализовано в чугунолитейном цеху, на плавильном участке, требования к качеству должны выдвигаться исходя из специфики процессов, протекающих при плавке чугуна непосредственно в вагранке. Соответственно, на данной стадии необходимо проанализировать физические, химические и физико-химические процессы при плавке чугуна в вагранке и выделить перечень свойств, обеспечивающих выполнение требуемых от литейного кокса функций.

На второй стадии «Проектирование свойств литейного кокса» закладывается реализация требований к продукции, установленных на предыдущей стадии [52, 53, 56]. Деятельность на этой стадии заключается в обоснованном подборе шихты и технологии коксования, позволяющей получить требуемые свойства литейного кокса [54, 56]. Проектирование свойств осуществляют как правило с использованием математического моделирования [26, 57–60]. На этой же стадии проводят выбор поставщика, поскольку в данном случае поставщик определяет свойства угольной шихты.

Третья стадия «Закупки шихтовых материалов» можно разделить на два этапа. Первый этап «Транспортирование шихтовых материалов» заключается в доставке до коксохимического предприятия угольной шихты. Второй этап «Хранение шихтовых материалов» включает разгрузку, складирование и хранение угольной шихты.

Деятельность на четвертой стадии «Производство» направлена на обеспечение выпуска продукции, соответствующей требованиям [53, 56, 60]. Для литейного кокса эта стадия делится на 7 этапов: подготовка шихты, загрузка коксовой печи, коксование, выдача, тушение, сортировка и хранение.

На стадии 5 «Поставка потребителю» проводят работы, направленные на сохранение качества готовой продукции при ее поставке потребителям в заданные

сроки [52, 54]. Эта стадия включает в себя три этапа: загрузка вагонов, транспортирование и разгрузка вагонов.

На последней стадии – «Применение» - осуществляют в первую очередь целевое использование литейного кокса [54, 60]. Стадия включает в себя реализацию требований потребителей, обеспечивающих максимально полезный эффект от использования продукции [53].

Данная стадия включает 4 этапа: хранение, транспортирование внутри предприятия, загрузка вагранки и плавка чугуна.

Поскольку литейный кокс полностью расходуется при плавке чугуна, стадия утилизации [53, 54, 60] для него отсутствует.

В результате составлен жизненный цикл литейного кокса содержащий 6 стадий и 16 этапов (рис. 2) [61, 62].

## Выводы

1. Разработан подход к установлению требований к качеству литейного кокса, включающий 4 этапа: упорядочение терминов и их определений в области литейного кокса, классификация свойств литейного кокса, систематизация параметров, характеризующих свойства литейного кокса, определение перечня характеристик качества литейного кокса.
2. На основе анализа требований нормативно-технической документации сопоставлены типовые стадии жизненного цикла продукции, что позволило определить порядок и содержание стадий жизненного цикла литейного кокса.
3. Разработана модель жизненного цикла литейного кокса, включающая 6 стадий и 16 этапов.

## ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ЛИТЕЙНОГО КОКСА

Говоря о качестве каменноугольного кокса, авторы обычно описывают определенные свойства и их влияние на эффективность плавки и/или свойства чугуна. Анализ данных, проведенный в работе [22], показал, что перечень таких свойств представляет собой довольно внушительный список. Наиболее полный перечень свойств металлургического (доменного) кокса, определяющих его качество, предложен в работе [25].

Как уже говорилось выше, нельзя утверждать, что существует единая классификация свойств каменноугольного кокса (табл. 4).

Многообразие свойств и соответствующих им параметров нуждается в систематизации. Систематизация представляет собой последовательное научно-обоснованное классифицирование и ранжирование объектов стандартизации [63, 64].

Классификация представляет собой разделение множества объектов на подмножества по сходству или различию в соответствии с принятыми признаками [63]. Для классификации свойств литейного кокса наиболее подходит иерархический метод классификации. Сущность метода состоит в том, что заданное множество последовательно делится на подчиненные подмножества, постепенно конкретизируя объект классификации, а совокупность получившихся группировок при этом образует иерархическую древовидную структуру в виде ветвящегося графа, узлами которого являются группировки [65]. Классификация свойств литейного кокса в соответствии с выбранным классификационным признаком должна порождать жесткую ветвящуюся структуру большой информационной емкости, которая позволит в дальнейшем наиболее объективно выделить именно те свойства и характеризующие их параметры, которые наилучшим образом подходят для оценки качества литейного кокса. Иерархический метод классификации в отличие от фасетного, где множество объектов делится на независимые подмножества по различным признакам, позволяет учитывать общность и соподчинённость всех свойств литейного кокса.

Помимо этого, необходимо учитывать то, что для многих свойств каменноугольного кокса характерно наличие двух и более параметров, получаемых при испытаниях в различных условиях. По этой причине для достижения упорядоченности необходимо соотнести свойства и характеризующие их параметры.

Как правило, под системой классификации понимают совокупность методов и правил классификации, а также ее результат. В процессе проведения классификации в работе использовали принцип ориентации на требования потребителей к качеству литейного кокса. Литейный кокс будет рассматривали как продукт, обеспечивающий определенные свойства, а соответственно и качество, выплаваемого в вагранке серого чугуна. Все выделенные свойства литейного кокса соответствуют этому принципу.

В первую очередь перед проведением классификации необходимо определиться с понятиями «свойство» и «параметр». В соответствии с ГОСТ 15467-79 [41] под свойством литейного кокса будем понимать объективную особенность, которая может проявляться при создании и применении литейного кокса. При этом данная объективная особенность должна представлять собой способность литейного кокса к реакции на различного рода внешние воздействия, либо к влиянию на протекание процессов с его участием, а также на качество серого чугуна. Под параметром в свою очередь будем понимать признак литейного кокса, количественно характеризующий его свойства и состояния.

Таким образом, свойство, как уже говорилось в главе 1, может являться характеристикой качества, а параметр – показателем качества литейного кокса.

В качестве классификационного признака была выбрана природа проявления свойств литейного кокса. На рисунке 3 представлена иерархическая структура свойств литейного кокса на верхних уровнях которой находятся укрупненные группы свойств [66].

Как отличительные особенности литейного кокса, свойства формируются структурой и химическим составом [67]. Под структурой будем понимать пространственное строение литейного кокса. Ее можно рассматривать на микро- и макроуровнях. Макроструктура литейного кокса представляет собой сложную

рельефную поверхность, видимую невооруженным глазом или при не большом увеличении в 30-40 раз и, состоящую из впадин, выступов, пор, межпорового пространства, трещин (рис. 4, а) и др. Под микроструктурой литейного кокса понимают структуру кокса, полученную при большем увеличении (рис. 4, б), а также строение углерода, образующего структурно упорядоченные элементарные единицы (рис. 4, в). В целом структура определяет физические и физико-химические свойства литейного кокса [68–73].

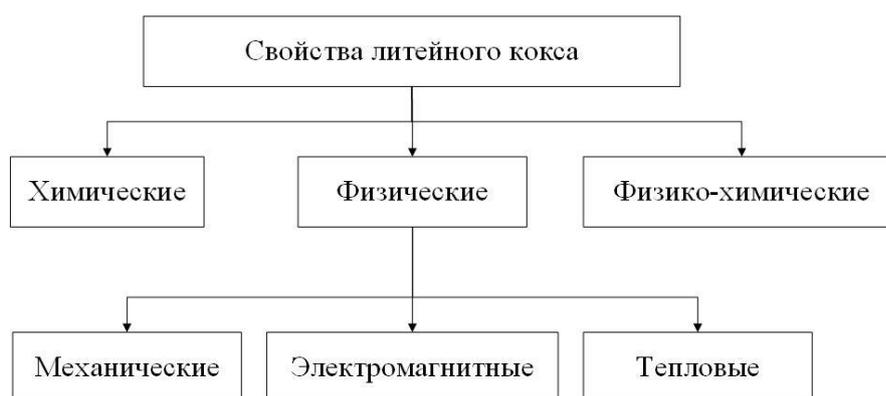


Рисунок 3 – Иерархическая структура свойств литейного кокса

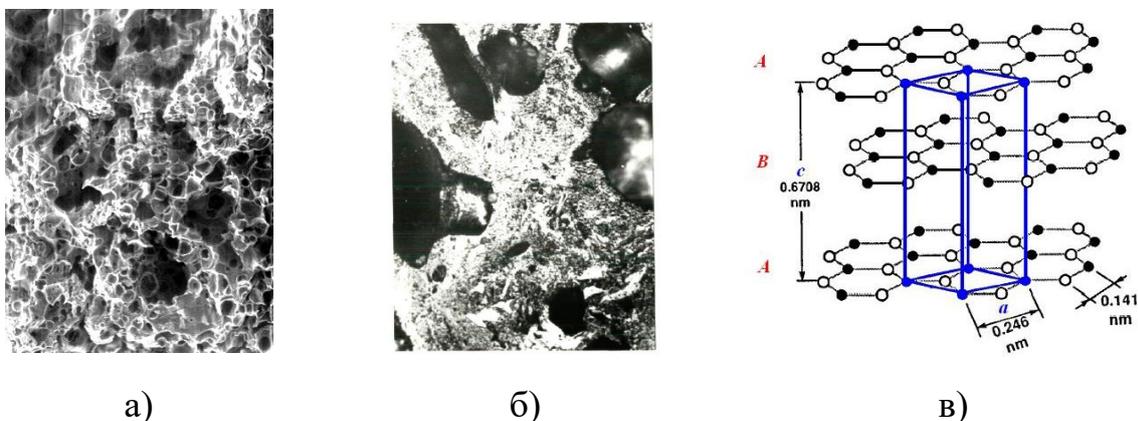


Рисунок 4 – Изображение структуры литейного кокса;

а) макроструктура (увеличение 45 х); б) микроструктура литейного кокса (увеличение 500 х); в) упорядоченная структура углерода

Химический состав литейного кокса может быть представлен химическими элементами и химическими соединениями. Среди химических элементов можно выделить углерод, содержание которого составляет более 80 % (табл. 6), серу

(содержание массовой доли общей серы  $S_t^d$  не должно превышать 1,4 % [1], фосфор (массовая доля фосфора  $P^a$  как правило не нормируется, но по некоторым данным не должна превышать 0,065 [4]), а также другими элементами, содержащимися в небольших количествах. К химическим соединениям, характеризующим потребительские свойства литейного кокса, относятся летучие вещества (выход летучих веществ  $V^{daf}$  должен составлять не более 1,2 % [3]) и оксиды различных элементов ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  [22], не нормируются). Содержащиеся в литейном коксе химические элементы и соединения определяют большинство химических и физико-химических свойств.

Химические свойства (рис. 5) проявляются при химических реакциях и влияют на процессы их протекания. Среди химических свойств литейного кокса можно выделить способность к изменению химического состава чугуна и способность к обеспечению плавки теплом.

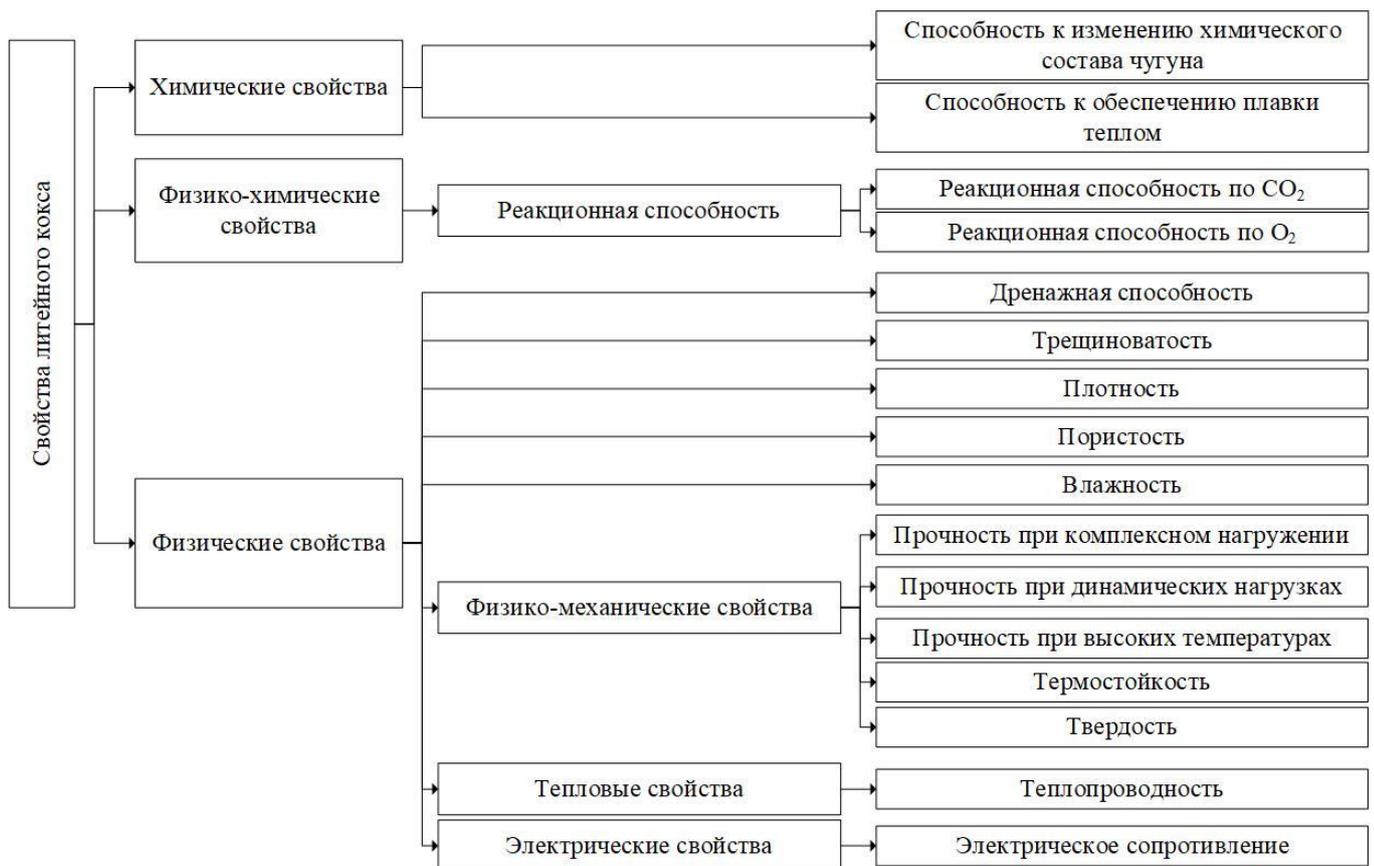


Рисунок 5 – Классификация свойств литейного кокса

Химические свойства характеризуют параметрами, указанными в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры и методы испытаний для определения химических свойств литейного кокса

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний / нормативный документ
Способность к изменению химического состава чугуна	Массовая доля фосфора	$P^a$ , %	0,02-0,065 [4]	Объемный, гравиметрический, фотоколориметрические методы / ГОСТ 1932-93
	Массовая доля общей серы в сухом топливе	$S^d_t$ , %	0,6-1,4 [1–3]	Метод ИК-спектromетрии / ГОСТ 32465-2013
	Массовая доля общей серы в расчёте на аналитическую пробу	$S^a_t$ , %	Отсутствует	Метод ИК-спектromетрии / ГОСТ 32465-2013 Метод Эшка / ГОСТ 8606-2015 ГОСТ 2059-95
	Массовая доля сульфатной серы	$S^{a_{SO_4}}$ , %	0,36-0,41 [42, 74]	Методы определения форм серы / ГОСТ 30404-2013
	Массовая доля пиритной серы	$S^a_p$ , %	0,13-0,26 [42]	
	Массовая доля органической серы	$S^a_o$ , %	1,19-1,30 [74]	
	Массовая доля общей серы	$S$ , %	1,63-1,74 [74]	Метод Эшка / ГОСТ 8606-2015
	Массовая доля оксида кремния в золе	$X$ , %	0,75-3,90 [22]	Методы определения химического состава золы / ГОСТ 10538-87
	Массовая доля углерода в аналитической пробе	$C^a$ , %	80,41-84,67 [46]	Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота / ГОСТ 32979-2014
	Массовая доля углерода в органической массе топлива	$C_o$ , %	96-98 [30, 47]	Метод Либиха, ускоренный метод / ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625-96)

Таблица 6 (окончание)

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний / нормативный документ
Способность к поддержанию температуры плавки	Выход летучих веществ	$V^a, \%$ $V^{a_{CO_2}}, \%$	0,5-1,5 [30, 47]	Метод определения выхода летучих веществ / ГОСТ Р 55660-2013
	Высшая теплота сгорания при постоянном объеме	$Q_{s,v}, \text{кДж/кг}$	28050-31400 [42]	Метод определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания / ГОСТ 147-2013
	Высшая теплота сгорания при постоянном давлении	$Q_{s,p}, \text{кДж/г}$	Отсутствует	
	Низшая теплота сгорания при постоянном объеме	$Q_{i,v}, \text{кДж/кг}$	27100-28100 [46]	
	Низшая теплота сгорания при постоянном давлении	$Q_{i,p}, \text{кДж/г}$	Отсутствует	
	Массовая доля углерода в аналитической пробе	$C^a, \%$	80,41-84,67 [46]	Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота / ГОСТ 32979-2014
	Массовая доля углерода в органической массе топлива	$C_o, \%$	96-98 [30, 47]	Метод Либиха, ускоренный метод / ГОСТ 2408.1-95 (ИСО 625-96)
	Зольность	$A^d, \%$	10-13 [1-3, 30, 47]	Метод определения зольности / ГОСТ Р 55661-2013

«Способность к изменению химического состава чугуна» – это предлагаемый термин, который представляет собой свойство, характеризующееся рядом параметров литейного кокса, непосредственно влияющих на химический состав чугуна в процессе плавки, например, на содержание фосфора, общей серы, углерода, кремния и т.д. (табл. 6).

Свойство «способность к обеспечению плавки теплом» также предложено для объединения параметров, влияющих на температуру в процессе плавки чугуна в вагранке, и характеризуется выходом летучих веществ, теплотой сгорания, зольностью и массовой долей углерода (табл. 6).

Летучие вещества образуются в процессе нагревания топлива, либо без доступа кислорода, либо при его недостаточном количестве. При уменьшении выхода летучих веществ в коксе увеличивается содержание углерода в нем, что приводит к снижению расхода кокса. Кроме того, выход летучих веществ в коксе свидетельствует о степени «готовности» кокса [47].

Теплота сгорания представляет собой количество теплоты, выделившееся при полном сгорании массовой единицы литейного кокса. Она является важнейшим показателем качества энергетического топлива, характеризует теплоценность топлива [75], и зависит от его химического состава [46]. Различают высшую и низшую теплоту сгорания при постоянном объеме и при постоянном давлении. Теплота сгорания кокса уменьшается в основном с повышением его влажности и зольности. При влажности кокса 2-3 % и зольности 9-10 % теплота сгорания составляет в среднем 29,3 МДж/кг [31].

Массовая доля углерода в литейном коксе непосредственно влияет на температуру плавки, поскольку при горении углерод является основным источником тепла.

Зола кокса представляет собой остаток, образующийся из минеральных примесей при полном сгорании кокса. Увеличение зольности кокса (значения параметра) способствует повышению расхода кокса и флюса при плавке [76].

К физико-химическим свойствам (рис. 5), характеризующимся изменением активности химического взаимодействия в зависимости от физических параметров, можно отнести реакционную способность. Физико-химические свойства характеризуют параметрами, указанными в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры и методы испытаний для определения физико-химических свойств литейного кокса

Сложное свойство	Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний
Реакционная способность	Реакционная способность по CO <sub>2</sub>	Показатель реакционной способности по CO <sub>2</sub>	CRI, %	20,0-45,8 [22, 46, 78]	Стандартный метод определения показателей реакционной способности CRI / ГОСТ 32248-2013, ГОСТ Р 54250-2010
			K, см <sup>3</sup> /гс	0,51-0,76 [22]	Метод определения реакционной способности / ГОСТ 10089-89
	Реакционная способность по O <sub>2</sub>	Показатель реакционной способности по O <sub>2</sub>	R <sub>O2</sub> , %	Отсутствует	Отсутствует

Реакционная способность кокса характеризует его химическую активность, определяемую пропусканием через слой раскаленного кокса углекислого газа или кислорода. В связи с этим выделяется два вида реакционной способности: реакционная способность по  $\text{CO}_2$  и реакционная способность по  $\text{O}_2$ . Степень химической активности определяется площадью поверхности взаимодействия литейного кокса с внешней средой, именно по этой причине реакционная способность относится к физико-химическим свойствам. Реакционная способность по  $\text{CO}_2$  влияет на количество образовавшегося оксида углерода и, в конечном счете, на расход кокса [77].

Под физическими понимают свойства, присущие веществу вне химического взаимодействия (рис. 5) [77]. В результате их проявления не изменяется состав вещества и характер межмолекулярных связей. Среди физических свойств можно выделить дренажную способность, трещиноватость, плотность, пористость и влажность. Физические свойства характеризуют параметрами, указанными в таблице 8.

Дренажная способность характеризует способность насыпной массы литейного кокса пропускать газовый поток и расплавленный металл. Эта способность находится в зависимости от формы, размера и количества кусков кокса определенного размера (гранулометрического состава), а также его пористости. Для определения дренажной способности могут быть использованы два параметра: критерий гидравлического подобия  $\Gamma$ , по методу К.И. Сыскова, и удельное гидравлическое сопротивление  $\Delta P$ , по методу А.С. Брука [47]. Также к параметрам дренажной способности относятся порозность, гранулометрический состав, его равномерность и средний размер куска, насыпная плотность и насыпная масса (табл. 8).

Таблица 8 – Параметры и методы испытаний для определения физических свойств литейного кокса

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний
Дренажная способность	Критерий гидравлического подобия	$\Gamma$ , м <sup>2</sup> /(с*Па)	Отсутствует	Метод К.И. Сыскова [79]
	Удельное гидравлическое сопротивление	$\Delta P$	Отсутствует	Метод А.С. Брука [47]
	Насыпная плотность в малом контейнере	(ВД) <sup>a</sup> , кг/м <sup>3</sup>	400-500 [80]	Метод определения насыпной плотности в малом контейнере / ГОСТ Р 54251-2010
	Насыпная масса в большом контейнере	Нет, т/м <sup>3</sup>	430-480 [81]	Метод определения насыпной массы в большом контейнере / ГОСТ ИСО 1013-95
	Объем межкусковых промежутков (порозность)	V, -	Отсутствует	Метод К.И. Сыскова [79]
	Равномерность гранулометрического состава	Нет	Отсутствует	Ситовый метод определения гранулометрического состава / ГОСТ 2093-82
	Средний размер куска	d <sub>cp</sub> , мм	50-60 [22]	Ситовый анализ класса крупности 20 мм и более / ГОСТ 5954.1-91

Таблица 8 (окончание)

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний
Дренажная способность	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	$\gamma$ , %		Ситовый анализ класса крупности 20 мм и более / ГОСТ 5954.1-91; Ситовый метод определения гранулометрического состава / ГОСТ 2093-82
		80 мм и более	70-72 [2, 4]	
		60 мм и более	80-86 [1, 2]	
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	$T_{\text{общ}}, T_{\text{поп}}, T_{\text{пр}}$ , см/см <sup>2</sup>	0,05-0,30 [31, 42]	Метод определения общей трещиноватости [50]
	Общая длина трещин, отнесенных на единицу поверхности	L, мм/см <sup>2</sup>	Отсутствует	Метод определения общей трещиноватости [50]
Плотность	Действительная плотность	$d_r^d$ , %	1,86-2,08 [22, 42]	Методы определения действительной относительной и кажущейся относительной плотности и пористости / ГОСТ 10220-82
	Действительная относительная плотность	d, %	Отсутствует	
	Кажущаяся плотность	$d_r^a$ , %	0,6-0,9 [22, 42]	
	Кажущаяся относительная плотность	$d_A$ , %	Отсутствует	
Пористость	Пористость	$P_r$ , %	62,11-77,5 [22]	
	Кажущаяся пористость	$P_k$ , %	35-45 [31, 82]	
Влажность	Общая влага	$W_t^r, W_t$ , %	1,2-5,0 [1-3]	Метод определения общей влаги в коксе / ГОСТ 27588-91
	Влага в аналитической пробе	$W^a$ , %	Отсутствует	

Значение насыпной массы (насыпной плотности) напрямую связано с величиной межкусковых промежутков и гранулометрическим составом. Методики определения насыпной плотности и насыпной массы различаются только объемом контейнера, в который помещают литейный кокс. В первом случае это контейнер кубической формы жесткой конструкции вместимостью 0,200 м<sup>3</sup>, во втором - железнодорожный вагон или скип, вмещающий не менее 3 т кокса.

Порозность представляет собой величину межкусковых промежутков насыпной массы литейного кокса. Она влияет в первую очередь на сечение каналов, по которым проходят газы и жидкие продукты плавки [23].

Гранулометрический состав представляет собой параметр, отражающий процентное соотношение различных классов крупности литейного кокса. Гранулометрический состав влияет на плотность распределения кусков кокса по диаметру печи и, тем самым, определяет дренажную способность шихты. Равномерность гранулометрического состава характеризуют преобладающим содержанием в партии кусков кокса определенного класса крупности. Уплотнение насыпной массы литейного кокса, вызванное неоднородностью гранулометрического состава, приводит к снижению газопроницаемости.

Трещиноватость является прямым следствием несовершенства макроструктуры литейного кокса и представляет собой простое свойство, характеризующееся общей длиной трещин, отнесенных на единицу площади [50]. Трещинообразованию способствуют зерна породы и промпродукта, которые становятся центрами локальных напряжений в процессе коксования. Реализация трещин при эксплуатации литейного кокса приводит к ухудшению дренажной способности столба шихты [72]. Помимо этого, трещиноватость оказывает основное сопротивление тепловому потоку и, тем самым, уменьшает суммарную теплопроводность кокса [83].

Плотность кокса определяют как отношение массы тела кокса к занимаемому им объему. Различают действительную и кажущуюся плотности, абсолютную и относительную. Плотность используют при определении пористости. Пористость в общем случае представляет собой долю объема пор в пористом теле. Увеличение

пористости положительно сказывается на газопроницаемости насыпной массы литейного кокса, однако негативно влияет на его прочностные характеристики.

Влажность характеризует содержание влаги в теле кокса. Ее принадлежность к физическим свойствам объясняется тем, что в процессе набора влаги само вещество литейного кокса и его молекулярная структура сохраняются неизменными. Повышенная влажность отрицательно сказывается на технологии плавки в связи с расходом тепла на ее испарение и приводит к перерасходу кокса [68].

Физические свойства рассматривают как специфическое поведение тела под влиянием определенных сил и полей. В соответствие с этим в группу физических свойств включают механические, тепловые и электромагнитные свойства, выделенные по трем основным способам воздействия на литейный кокс в процессе транспортирования и применения. Механические свойства (рис. 5) характеризуют сопротивление материала деформации, разрушению или особенность его поведения в процессе разрушения. Эта группа включает такие свойства, как прочность, жесткость (упругость), пластичность, твердость и вязкость [84, 85]. Физико-механические свойства характеризуют параметрами, указанными в таблице 9.

Для литейного кокса большое значение имеет такое сложное свойство как прочность. В зависимости от характера действующей на литейный кокс в процессе испытаний нагрузки можно выделить: прочность при комплексном нагружении, прочность при динамических нагрузках, прочность при высоких температурах. Снижение прочности кокса способствует появлению в процессе плавки классов крупности менее 40 мм, что приводит к уменьшению газопроницаемости шихты и перерасходу кокса.

Под термостойкостью понимают степень изменения основных свойств литейного кокса в результате повторного нагрева. Чаще всего при ее определении опираются на изменение гранулометрического состава после повторного нагрева. Другими словами, термостойкость тесно связана с прочностью кокса при высоких температурах. Однако, при определении термостойкости стараются исключить влияние трещин в коксе, которые могут реализовать при незначительном механическом нагружении. Достигают этого за счет измельчения, в результате которого реализуются все основные дефекты [33, 50].

Таблица 9 – Параметры и методы испытаний для определения физико-механических свойств литейного кокса добавить

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний
Прочность при комплексном нагружении	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	M <sub>10</sub> , %	6,0-11,0 [4, 48]	Микум-испытание / ГОСТ 5953-93
		M <sub>20</sub> , %	Отсутст.	
		M <sub>25</sub> , %	83,7-92,3 [46]	
		M <sub>30</sub> , %	Отсутст.	
		M <sub>40</sub> , %	69-78 [4, 48]	
		M <sub>60</sub> , %	Отсутст.	
		M <sub>80</sub> , %	Отсутст.	
		M <sub>100</sub> , %	Отсутст.	
	Прочность, определяемая в ИРСИД- барабане	I <sub>10</sub> , %	7,7-10,8 [86]	Ирсид-метод / ГОСТ 5953-93
		I <sub>20</sub> , %	Отсутст.	
		I <sub>30</sub> , %	Отсутст.	
		I <sub>40</sub> , %	67,6-72,4 [86]	
	Структурная прочность	П <sub>с</sub> , %	75,4-88,2 [22]	Методы определения показателей прочности / ГОСТ 9521-74
Показатели прочности кускового кокса	П <sub>25</sub> , %	77,0-86,3 [87]		
Показатели прочности кускового кокса	П <sub>10</sub> (И <sub>10</sub> ), %	11,0-16,6 [87]	Методы определения показателей прочности / ГОСТ 9521-74	

Таблица 9 (окончание)

Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра	Значение параметра	Метод испытаний
Прочность при динамических нагрузках	Индекс сбрасывания	ИС 80 мм, %	Менее 50 [88]	Метод определения прочности на сбрасывание / ГОСТ 28946-91
		ИС 50 мм, %	50-60 [88]	
		ИС 40 мм, %	70-80[88]	
		ИС 25 мм, %	92-95 [88]	
		ИС 10 мм, %	95-98 [88]	
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с CO <sub>2</sub>	CSR, %	32,6-58,2 [22]	Стандартный метод определения прочности кокса после реакции CSR / ГОСТ 32248-2013; ГОСТ Р 54250-2010
	Показатель истираемости после реакции с CO <sub>2</sub>	ПИ, %	Отсутст.	Стандартный метод определения прочности кокса после реакции CSR / ГОСТ 32248-2013
		AV, %	Отсутст.	Стандартный метод определения прочности кокса после реакции CSR / ГОСТ Р 54250-2010
	Термостойкость	Т, -	Отсутст.	[33]
Твердость	Показатель твердости	Н, -	70-140 [42]	Метод Гинсбурга [33, 42, 50]

Кроме того, для литейного кокса представляет интерес твердость – способность сопротивляться внедрению другого более твердого материала, так как в вагранке литейный кокс контактирует не только с соседними кусками кокса, но и с крупными кусками металлической части шихты. Твердость кокса измеряют прямым методом, с использованием микротвердомера и косвенным – по отношению к твердости металлической пластинки. Твердость, измеренную указанным способом, называют так же абразивной [33, 50].

Тепловые свойства (рис. 5) литейного кокса отражают его способность поглощать и передавать тепло. От тепловых свойств зависит скорость и время возгорания. Поскольку литейный кокс представляет собой неоднородное вещество, состоящее из твердых компонентов и воздушных ячеек, по своим свойствам он приближается к теплоизоляторам.

Теплопроводность характеризует способность литейного кокса передавать тепло как внутри одного куска, так и в насыпной массе. При этом коэффициент теплопроводности увеличивается с увеличением влажности, поскольку вода значительно улучшает теплопередачу.

Среди электромагнитных свойств (рис. 5) для литейного кокса наиболее значимым является электрическое сопротивление. Величина электрического сопротивления зависит от молекулярной и надмолекулярной структуры кокса, и снижается по мере упорядочивания его структуры [89–91]. Также оно зависит от химического состава примесей, гигроскопичности [47] и пористости. Таким образом, величина электрического сопротивления может применяться для оценки структуры кокса. Тепловые и электрические свойства характеризуют параметрами, указанными в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры и методы испытаний для определения тепловых и электромагнитных свойств литейного кокса

Группа свойств	Простое свойство	Параметры	Обозначение параметра и единицы измерения	Значение параметра	Метод испытаний
Тепловые	Теплопроводность	Коэффициент теплопроводности	$\lambda$ , Вт/(м*К)	0,46-0,93 [42]	Метод определения теплопроводности [30]
Электромагнитные	Электрическое сопротивление	Электрическое сопротивление	R, Ом	8,20 - 11,15 [6]	Метод определения электросопротивления литейного кокса / [89]
		Удельное электрическое сопротивление	$\rho$ , Ом·м	0,025-0,100 [87, 92]	Метод измерения удельного электрического сопротивления порошка / ГОСТ 4668-75

Разработанная система классификации, включающая классификационные признаки, принципы и метод применяется в учебном процессе при подготовке обучающихся по направлениям 27.03.01, 27.04.01 – Стандартизация и метрология, 22.03.01, 22.04.01 – Материаловедение и технология материалов (уровень бакалавриата и магистратуры) (Приложение А).

Выводы:

1. Классифицировано многообразие свойств литейного кокса. Классификационным признаком является природа проявления свойств.
2. Введены два новых понятия для определения химических свойств литейного кокса «Способность к изменению химического состава чугуна» и «Способность к поддержанию температуры плавки».
3. Систематизировано многообразие параметров, характеризующих свойства литейного кокса.
4. Проведен анализ метрологического обеспечения испытаний с целью определения параметров, характеризующих свойства литейного кокса.
5. Установлено, что 25 % методик испытаний не установлены национальными или межгосударственными стандартами, 7 % параметров допускается определять по более чем 1 методике испытаний, а 4 % параметров не имеют установленных методик испытаний.

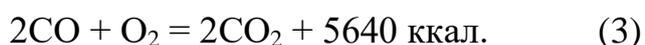
### ГЛАВА 3 АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА

#### 3.1 Разработка информационной модели динамики характеристик качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла

##### 3.1.1 Формирование требований к качеству литейного кокса

Требования к литейному коксу формируются потребителем. Потребителем литейного кокса является ваграночный процесс, цель которого заключается в получении чугуна с заданными химическим составом и температурой на выпуске. Соответственно и требования к качеству литейного кокса должны способствовать достижению установленной цели [5].

В состав металлической части шихты для получения литейного чугуна может входить чушковый передельный чугун, чугунный и стальной лом, возврат собственного производства, чугунная и стальная стружка. Поскольку температура плавления перечисленных компонентов около 1150—1200 °С, первое требование к литейному коксу – обеспечение плавки теплом, необходимым для расплавления металлической части шихты и ее перегрева до необходимой при плавке температуры. Количество тепловой энергии, выделяемое при горении кокса, а также ее распределение описывают группой тепловых свойств. Тепло, выделяемое при сгорании литейного кокса, возрастает с увеличением горючих компонентов (углерода и серы) и снижается с возрастанием содержания золы и влажности. Основное количество тепловой энергии образуется при взаимодействии углерода кокса с кислородом по реакциям (1, 2) [18, 93] и при догорании оксида углерода до диоксида по реакции (3) [18, 93]



Однако, углерод может окисляться при взаимодействии с углекислым газом с потерей тепла по реакции (4), скорость протекания которой тесно связана с пористым строением поверхности литейного кокса [18, 93]



Соответственно обеспечение плавки теплом будет зависеть от группы тепловых свойств (глава 2, табл. 10), а также от такого свойства литейного кокса, как способность к поддержанию температуры плавки (глава 2, табл. 6), которое характеризуется такими параметрами, как влажность, реакционная способность, пористость.

После расплавления капли металла должны скапливаться в горне, а подаваемое дутье должно беспрепятственно проходить вверх по шахте печи. Это возможно только при обеспечении дренажной способности насыпной массы литейного кокса. Она обеспечивается соответствующей крупностью применяемого литейного кокса и ее равномерностью. Равномерная по крупности насыпная масса литейного кокса образует внутри себя промежутки, способствующие прохождению расплавленного чугуна и газов. Сохранение высокой крупности литейного кокса и ее равномерности при транспортировании и загрузке вагранки возможно только при наличии достаточной прочности и низкой трещиноватости.

В нижних зонах шахты вагранки горящий литейный кокс должен выдерживать столб шихты не разрушаясь, соответственно он должен обладать высокой прочностью при высоких температурах.

Влияние литейного кокса на химический состав чугуна выражается в насыщении его углеродом, серой и фосфором в процессе стекания капель металла по кускам кокса. Соответственно литейный кокс должен насыщать чугун углеродом, и не увеличивать в нем содержание вредных примесей, что определяется свойством – способность к изменению химического состава чугуна. Литейный кокс также влияет на структуру выплавляемого чугуна, что в свою очередь определяет его механические свойства [94].

Еще одно требование к литейному коксу – обеспечение энергоэффективности плавки. Низкий расход литейного кокса позволяет уменьшить затраты на выплавку чугуна. К повышению расхода кокса приводит высокая влажность (из-за дополнительных затрат тепла на испарение влаги кокса), а также высокая реакционная способность к  $\text{CO}_2$  (за счет потерь тепла по реакции (4)). Также перерасходу способствует увеличение зольности кокса вследствие снижения содержания углерода и необходимости дополнительных затрат тепла на плавление минеральной массы. Таким образом, на увеличение расхода влияет способность кокса к поддержанию температуры плавки (табл. 11).

Таблица 11 – Требования потребителей к литейному коксу и свойства, обеспечивающие эти требования

Требование потребителя	Свойство
Обеспечение плавки теплом	Способность к поддержанию температуры плавки Реакционная способность Пористость Влажность Группа тепловых свойств
Обеспечение дренажной способности	Дренажная способность Прочность при комплексном нагружении Прочность при динамических нагрузках Трещиноватость
Поддержка столба шихты	Прочность при высоких температурах
Насыщение чугуна углеродом, снижение вредных примесей	Способность к изменению химического состава чугуна
Энергоэффективность	Влажность Реакционная способность Способность к поддержанию температуры плавки

Таким образом, для оценки качества литейного кокса по мнению потребителей можно отнести следующие свойства:

- 1) способность к поддержанию температуры плавки,
- 2) реакционная способность,
- 3) влажность,
- 4) тепловые свойства,
- 5) дренажная способность,
- 6) прочность при комплексном нагружении,
- 7) прочность при динамических нагрузках,
- 8) прочность при высоких температурах,
- 9) трещиноватость,
- 10) способность к изменению химического состава чугуна.

Параметры, характеризующие перечисленные свойства, представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Параметры, характеризующие потребительские свойства литейного кокса

Свойство	Параметры
Способность к поддержанию температуры плавки	$V^a, V^{a_{CO_2}}, Q_{s,v}, Q_{s,p}, Q_{i,v}, Q_{i,p}, C^a, C_o, A^d$
Реакционная способность	CRI, K, $R_{O_2}$
Влажность	$W_t^r, W_t, W^a$
Тепловые свойства	$\lambda, T$
Дренажная способность	$\Gamma, \Delta P, (ВД)^a, V, d_{cp}, \gamma$
Прочность при комплексном нагружении	$M_{10}, M_{20}, M_{25}, M_{30}, M_{40}, M_{60}, M_{80}, M_{100}, I_{10}, I_{20}, I_{30}, I_{40}, П_c, П_{25}, П_{10} (И_{10})$
Прочность при динамических нагрузках	80, 50, 40, 25 и 10 мм
Прочность при высоких температурах	CSR, ПИ, AV

Таблица 12 (окончание)

Свойство	Параметры
Трещиноватость	$T_{\text{общ}}, T_{\text{поп}}, T_{\text{пр}}, L$
Способность к изменению химического состава чугуна	$P^a, S_t^d, S_t^a, S_{SO_4}^a, S_p^a, S_o^a, S,$ $X, C^a, C_o$

### 3.1.2 Проектирование свойств литейного кокса

Под проектированием свойств литейного кокса в данной работе понимают процесс выбора состава исходной угольной шихты для обеспечения конкретных параметров получаемого каменноугольного кокса, а также выбор режимов коксования и метода тушения. Шихтой для производства кокса называют смесь углей определенных марок, взятых в определенной пропорции.

Состав угольной смеси, для производства кокса должен обладать достаточной спекаемостью, коксуемостью, обеспечивать давление распираания, не разрушающее стены печной камеры и способствующие образованию соответствующей структуры кокса [30, 47, 50].

Марочный состав и свойства угольной шихты определяют физико-механические свойства кокса. При постоянстве технологии подготовки угольной шихты и режимов коксования оптимизация состава и качества угольной шихты является основным инструментом влияния на прочность кокса, определяя ее на 70-80 % [27, 95, 96].

При расчете шихты и прогнозировании качества получаемого кокса используют методы математического моделирования, при этом расчет так или иначе автоматизирован [26, 56, 57, 59]. Как правило математическая модель использует в качестве входа ряд параметров, характеризующих используемую шихту или технологический процесс, а на выходе получает прогноз по показателям качества кокса ( $M_{25}$ ,  $M_{10}$ , CSR, CRI и др.). Подавляющее большинство моделей используют показатели качества применительно к металлургическому коксу.

Математические модели, как правило, базируются на эмпирических данных. Знания о взаимосвязи свойств получаемого кокса и исходных углей фрагментарны, что приводит к большому разнообразию существующих моделей прогнозирования. При этом степень точности модели варьируется в зависимости от ситуации на внутреннем рынке угля и специфики коксохимической отрасли конкретного государства. В настоящее время практически каждое предприятие имеет свою собственную модель для прогнозирования свойств кокса, ориентированную на свойства поставляемых углей [97]. Следовательно, методики и выведенные уравнения по большей части справедливы для конкретного предприятия [34].

Также прогноз тепловых свойств литейного кокса возможен через прогнозирование содержания углерода, которое зависит от зольности [35, 98], содержания серы [35, 98] и влажности [32]. Содержание влаги в коксе в значительной степени зависит от выбора способа тушения [32]. Выбранный способ тушения позволяет также прогнозировать степень трещиноватости литейного кокса [32].

Анализ математических моделей, представленных как в российской, так и в зарубежной литературе, показал, что на стадии проектирования возможно прогнозирование свойств и параметров литейного кокса, представленных в таблице 13.

Таблица 13 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на стадии «Проектирование»

Свойство	Параметр	Обозначение
Способность к изменению химического состава чугуна	Массовая доля общей серы в сухом топливе	$S^d_c$ [35, 98]
Способность к поддержанию температуры плавки	Зольность	$A^d_c$ [35, 98]
Реакционная способность по $CO_2$	Показатель реакционной способности по $CO_2$	CRI [26, 28, 98–104]

Таблица 13 (окончание)

Свойство	Параметры	Свойство
Прочность при комплексном нагружении [63-65]	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	$M_{40}$ [38, 100, 105] $M_{25}$ [35, 58, 95, 105, 106], $M_{10}$ [35, 38, 58, 95, 100, 105, 106]
	Показатели прочности кускового кокса	$P_{25}$ , $P_{10}$ [99]
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с $CO_2$	CSR [26, 28, 59, 98–104, 107]
Дренажная способность	Крупность	$\gamma$ [9]
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	$T_{общ}$ , $T_{поп}$ , $T_{пр}$ [32]
Тепловые свойства	-	$\lambda$ , $T$ , $T_{макс}$ , $t_{кал}$ , $t_{расч}$ , $t_{теор}$ [32, 35, 98]

### 3.1.3 Закупки

На первом этапе стадии при выборе поставщика и закупках сырья коксохимические предприятия учитывают как технологические, так и экономические факторы. В первую очередь источники угольного сырья, надежность поставок и доступность марок углей, тенденции роста в них содержания золы, содержание фосфора, серы и т.д. [108].

При транспортировании углей происходит их окисление [109]. Окислительные процессы не успевают перейти на стадии интенсивного окисления, однако приводят к изменению прочности при комплексном нагружении [48, 110, 111], прочности при

высоких температурах [111, 112], гранулометрического состава [86], реакционной способности [111, 112].

Общее снижение качества кокса связано в первую очередь с несоответствием угольной базы, вызванным дефицитом углей коксовой группы (КЖ, К, ОС) [113]. Дефицит жирных и коксующихся углей приводит к тому, что одна марка угольного концентрата включает широкий спектр углей, зачастую совместно не коксуемых, при соответствии общих пластометрических показателей и технического анализа [57].

Недовольство коксохимических предприятий качеством сырья связано как с низкой объективностью общепринятых показателей качества [56, 57, 113, 114], так и с метрологическими аспектами входного контроля [115]. Сильные колебания в структуре поставок угольных концентратов [113], вызванные непостоянством сырьевого обеспечения конкретных производств, приводят к нестабильности угольных шихт [57]. По этой причине получение качественного кокса возможно только в случае внедрения на предприятии входного контроля [57, 114, 115] обеспечивающего соответствие поставляемой шихты спроектированной.

На втором этапе происходит выгрузка угольной шихты и она направляется на склад (открытый или закрытый). Поскольку в отдельных случаях на предприятие могут поступать до 15 видов угольных концентратов, мероприятия по усреднению шихты начинают уже при их складировании за счет применения специальных методов укладки угольного сырья [30, 115, 116]. Усреднение угольной шихты способствует ее равномерному распределению внутри камеры коксования и постоянству свойств получаемого кокса.

В процессе хранения углей происходит их окисление [109]. Интенсивность окислительных процессов зависит от марки угля [78, 86, 109, 110, 112, 117–119], времени хранения [78, 112] и погодных условий [78, 112, 117–119].

Окислительные процессы приводят к постепенному снижению спекаемости (уменьшается толщина пластического слоя вплоть до полной ее утраты) [30, 118, 120], текучести угля [119], в целом ухудшению коксующихся свойств и уменьшению выхода ценных продуктов пиролиза [117].

Окисленность снижает давление распираания угольной шихты, что приводит к снижению механической прочности получаемого кокса [78, 86, 110, 111], в том числе прочности при комплексном нагружении [48, 109–111]. Наиболее резко ухудшается истираемость, что является следствием снижения прочности вещества кокса, формирующего стенки пор [48, 86, 110, 111], ухудшается структурная прочность, способствующая уменьшению трещиноватости [121], увеличивается зольность [86, 120], а также снижается выход классов крупности 25 мм и менее, 10 мм и менее [86].

Кокс, полученный из угольной шихты с участием окисленного угля, характеризуется большим содержанием изотропного углерода и меньшим анизотропного [78, 111], что способствует не только ухудшению ряда его прочностных характеристик, но и повышению реакционной способности [78, 111] и снижению прочности кокса после реакции с  $\text{CO}_2$  [78, 111].

Можно выделить следующие критерии определения срока хранения:

- 1) изменение спекаемости;
- 2) снижение коксующести, выраженное ухудшением показателей механической прочности кокса на величину, превышающую погрешность ее определения (если переход на следующую стадию окисления не предопределяет изменение качества кокса).

Для обеспечения качества кокса необходимо соблюдать сроки хранения углей [122]. В случае хранения дольше установленного срока, необходимо провести дополнительные исследования на коксующесть или спекаемость.

Таким образом, на стадии «Закупки» формируются свойства и параметры литейного кокса, представленные в таблице 14.

Таблица 14 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на стадии «Закупки»

Свойство	Параметр	Обозначение
Способность к поддержанию температуры плавки	Зольность	$A^d$ [86]
Реакционная способность по $\text{CO}_2$	Показатель реакционной способности по $\text{CO}_2$	CRI [78, 111]

Таблица 14 (окончание)

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с CO <sub>2</sub>	CSR [78, 111, 112]
Прочность при комплексном нагружении [85]	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	M <sub>40</sub> [48, 111], M <sub>10</sub> [111]
	Прочность, определяемая в ИРСИД- барабане	I <sub>40</sub> [86], I <sub>10</sub> [86]
	Показатели прочности кускового кокса	P <sub>25</sub> [110, 111], I <sub>10</sub> [110, 111]
	Структурная прочность	P <sub>c</sub> [111]
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	T <sub>общ</sub> , T <sub>поп</sub> , T <sub>пр</sub> [111]
Дренажная способность	Выход классов крупности	γ [86, 120]

### 3.1.4 Производство

На первом этапе «Подготовка шихты» угли отправляют со складов в углеподготовительный цех. Подготовка шихты для коксования включает в себя следующие этапы:

- 1) дозирование;
- 2) измельчение;
- 3) смешение;
- 4) сушка и термическая обработка.

Также в отдельных случаях возможно введение добавок, гранулирование и брикетирование.

Правильное дозирование шихты и точное соблюдение расчетного марочного состава обеспечивает постоянство свойств получаемого кокса. Затем шихта направляется на измельчение, основная задача которого заключается в равномерном

распределении зерна всех компонентов шихты по объему загрузки, что также обеспечивает постоянство свойств получаемого кокса [30].

Помимо этого, крупные частицы в шихте имеют гораздо меньшую усадку, чем зерна углей, и после спекания около поверхности частиц породы образуется сеть трещин, снижающих прочность кокса [30, 113, 123]. Также данная технология позволяет контролировать зольность угольных концентратов [113].

В целом применение различных схем дробления приводит к увеличению прочности при комплексном нагружении [33, 51, 123], снижению реакционной способности получаемых коксов [33, 51], уменьшению выхода крупных классов кокса, а также повышению дренажной способности [33].

После дробления шихту смешивают. Смешение осуществляют до разделения общего потока шихты на несколько, питающих отдельные угольные башни коксовых печей. Разделение не смешанного слоистого потока приводит к неравномерному распределению различных компонентов угольной шихты, что негативно отражается на качестве кокса [30].

После смешения возможна термическая обработка шихты, снижающая влажность угольной загрузки [30, 33, 113]. Классическая термическая подготовка, предусматривающая сушку и нагрев шихты до конечных температур, позволяет увеличить прочность при комплексном нагружении, однако, значительно повышает (в 3-4 раза) давление коксования, приводящее к разрушению стен печных камер [113].

Глубокая сушка шихты позволяет максимально снизить содержание влаги, что приводит к повышению прочности при комплексном нагружении, увеличению выхода класса крупности 80 мм и более, и увеличению среднего размера куска [33, 124].

Помимо этого, термическая подготовка слабоспекающихся газовых углей позволяет добиться снижения содержания серы в коксе [125], а также повысить его структурную прочность и абразивную твердость [126].

Прочность кокса во многом обеспечивается наличием химического взаимодействия между связующим и наполнителем [33]. Брикетирование и

гранулирование представляют собой способы уплотнения шихт, не требующих термического нагрева. Брикетирование способствует увеличению поверхности спекающихся угольных шихт и повышает концентрацию плавких компонентов в единице объема. Это так же способствует повышению прочности кокса [30, 33, 113]. Использование в шихте брикетов, состоящих из смеси неспекающегося угля, древесных опилок и каменноугольного связующего могут приводить к изменению CSR кокса [127, 128].

Отсеивание и выборочное измельчение окисленных углей позволяет практически устранить их влияние на прочность при комплексном нагружении, при высоких температурах и на реакционную способность [111].

Таким образом, на этапе подготовки шихтовых материалов формируются свойства и параметры литейного кокса, представленные в таблице 15.

Таблица 15 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на этапе 1 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с CO <sub>2</sub>	CSR [111, 127, 128]
Реакционная способность по CO <sub>2</sub>	Показатель реакционной способности по CO <sub>2</sub>	CRI [33, 51, 111]
Прочность при комплексном нагружении [87, 89]	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	M <sub>40</sub> [123], M <sub>25</sub> [33, 113], M <sub>10</sub> [33, 113, 123]
	Показатели прочности кускового кокса	П <sub>25</sub> [33, 51, 111], И <sub>10</sub> [33, 51, 111]
Дренажная способность	Средний размер куска	d <sub>ср</sub> [33]
	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	γ [33, 124]

Таблица 15 (окончание)

Свойство	Параметр	Обозначение
Способность к изменению химического состава чугуна	Массовая доля общей серы в сухом топливе	$S^{dt}$ [125]
Способность к поддержанию температуры плавки	Зольность	$A^d$ [113]
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	$T_{общ}, T_{поп}, T_{пр}$ [33, 123]

На втором этапе происходит загрузка коксовой печи. Угольную шихту можно загружать в камеры как в виде свободной насыпи, так и в виде предварительно утрамбованного угольного пирога [129]. Способ загрузки трамбованной шихты расширяет возможности использования низкосортных углей без негативного влияния на качество кокса [130].

Насыпная плотность зависит от ряда факторов, таких как влажность шихты, гранулометрический состав, а также энергия тромбования/прессования. В целом увеличение массы загрузки (насыпной плотности) приводит к улучшению показателей прочности при комплексном нагружении и при высоких температурах, а также увеличению выхода кокса высоких классов крупности [131].

Таким образом, на этапе загрузки коксовой печи формируются свойства и параметры литейного кокса, представленные в таблице 16.

На четвертом этапе осуществляют коксование. Постоянство физико-механических свойств кокса помимо параметров загрузки характеризуется параметрами процесса коксования – это параметры режима и длительности термической обработки шихты, уровень подачи тепла в различные участки камер

коксования в соответствии с количеством, плотностью и характером распределения коксующей шихты, а также конструктивные особенности коксовых печей [30, 132].

Таблица 16 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на этапе 2 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с $\text{CO}_2$	CSR [121]
Прочность при комплексном нагружении	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	$M_{40}$ [121], $M_{10}$ [121]
Дренажная способность	Выход классов крупности	$\gamma$ [121]

С увеличением времени коксования и соответственно «готовности» кокса снижаются остаточный выход летучих веществ, истиримость, реакционная способность, а показатели структурной прочности и абразивной твердости незначительно возрастают. «Горячая» прочность кокса (CSR) увеличивается с ростом длительности [51]. Прочность кокса при высоких температурах не одинакова по объему коксового пирога. Наибольшее значение CSR характерно для кокса, находящегося в нижней центральной области печи [123].

Время коксования (при сохранении неизменными остальных технологических режимов) влияет на крупность кокса и его механическую прочность при комплексном нагружении [38].

Введение в шихту мелкодисперсной пыли УСТК приводит к увеличению выхода крупных классов 40 мм и более и 80 мм и более, а также к повышению механической прочности по показателю  $M_{40}$  [38].

Для повышения качества кокса ключевым параметром является скорость нагрева [133]. Равномерное распределение температуры в объеме коксующей загрузки является условием оптимальности температурного режима коксования [133]. Для процесса коксования характерна различная скорость усадки в смежных слоях, вызванная неравномерностью прогрева. Это приводит к формированию

внутренних напряжений и образованию трещин, от которых зависит гранулометрический состав кокса [30, 50, 130] и средний размер куска [130].

В процессе коксования формируется также макро- и микроструктура кокса, характеризующая его тепловые свойства [30].

Таким образом, на этапе коксования формируются свойства и параметры литейного кокса, представленные в таблице 17.

Таблица 17 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на этапе 3 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с $\text{CO}_2$	CSR [134]
Реакционная способность по $\text{CO}_2$	Показатель реакционной способности по $\text{CO}_2$	$K_m, \text{см}^3/(\text{гс})$ [51]
Прочность при комплексном нагружении	Прочность, определяемая в МИКУМ-барабане	$M_{40}$ [30, 38]
	Показатели прочности кускового кокса	$I_{10}$ [51]
Способность к поддержанию температуры плавки	Выход летучих веществ	$V_k^{\text{daf}}$ [51]
Дренажная способность	Средний размер куска	$d_{\text{cp}}$ [130]
	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	$\gamma$ [30, 38, 50]
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	$T_{\text{общ}}, T_{\text{поп}}, T_{\text{пр}}$ [30, 50, 130]

Четвертый этап стадии – «Выдача». Выдаваемый из печей кокс имеет температуру порядка 950-1100 °С. В процессе выдачи создаются условия для

равномерного тушения (при использовании воды). Также при соприкосновении кокса с воздухом происходит некоторый угар. Процесс выдачи влияет на равномерность размещения кокса в тушильном вагоне, что в свою очередь способствует равномерному поливу в процессе тушения [32].

Таким образом, на этапе выдачи формируются свойства и параметры литейного кокса, представленные в таблице 18.

Таблица 18 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на этапе 4 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Способность к изменению химического состава чугуна	Массовая доля углерода в аналитической пробе	C <sup>a</sup> [32]
Способность к поддержанию температуры плавки	Массовая доля углерода в аналитической пробе	C <sup>a</sup> [32]
Влажность	Общая влага	W <sup>p</sup> [32]

Пятый этап стадии – «Тушение». Этап охлаждения или тушения является важным звеном в цепи формирования физико-механических свойств кокса после выдачи коксового пирога из камер коксования [32]. Доставку к месту тушения от печной камеры осуществляют в тушильных вагонах. Процесс тушения кокса имеет своей целью получение кокса равномерной и по возможности низкой влажности [32, 135]. На данный момент по способу тушения выделяют мокрое – с использованием воды – и сухое тушение.

На влажность литейного кокса в первую очередь влияет продолжительность тушения, минимизация которого способствует выравниванию влажности в кусках кокса различной крупности. Однако, сокращение времени тушения, происходящее за счет интенсификации подачи потока воды, обуславливает термический удар, приводящий к снижению механической прочности кокса. Сила термического удара обратно пропорциональна времени тушения [32]. В результате в наружных слоях

возникают напряжения растяжения, а во внутренних слоях - сжатия. В определенных условиях под действием этих напряжений появляются дополнительные (вторичные) трещины. Наличие таких вторичных видимых и микротрещин снижает механическую прочность кокса [32, 135]. Основной проблемой является то, что данные трещины зачастую реализуются при вторичном нагреве уже в шахте печи. Кокс, расположенный в верхнем слое насыпи в тушильном вагоне, подвергается значительному дефектообразованию при тушении.

Куски разной крупности после одинакового времени тушения имеют различную влажность. Известно, что мелкие куски кокса, охлаждаясь быстрее, впитывают значительно большее количество воды, чем крупные [32]. Влажная мелочь, прилипающая к крупным кускам, влияет на показатели испытаний кокса на прочность, увеличивает замусоренность крупных классов и завышает показатель истираемости кокса  $M_{10}$ .

По технологии сухого тушения раскаленный кокс медленно охлаждается в среде инертного газа (азота). Медленное охлаждение предотвращает растрескивание кокса и обеспечивает его равномерную крупность, а также позволяет получить сухой кокс, т.к. в процессе не требуется вода [135, 136].

При переходе с мокрого способа тушения кокса на сухой значительно снижается влажность [42, 135, 137, 138], снижается остаточный выход летучих веществ [51], реакционная способность [51, 137], а термомеханическая стойкость [51, 135] и прочность при комплексном нагружении возрастает [42, 135, 137, 138]. Сухое тушение влияет на выход классов 40 мм и более, 60 мм и более и 80 мм и более, а также средний размер куска [42, 137, 138], содержание анизотропного и изотропного углерода, площадь трещин [135]. При уменьшении времени сухого тушения возрастает выход класса крупности 80 мм и падает прочность при комплексном нагружении [137].

Сухое тушение с содержанием CO 12-15 % способствует снижению зольности, но в то же время к повышению реакционной способности и ухудшению показателя «горячей» прочности. Также увеличивается средний размер куска, и возрастает выход крупных классов (60-80 мм и 80 мм и более), что важно для литейного кокса.

Метод тушения может оказывать влияние на содержание в коксе хлора и щелочных металлов [139]. Влияние на качество кокса также оказывает состав циркулирующих газов в камере сухого тушения. Установлено влияние процентного содержания CO на  $A^d$  (%),  $V^{daf}$  (%),  $S^d$  (%),  $M_{25}$  (%),  $M_{10}$  (%), CRI (%), CSR (%), гранулометрический состав и средний размер кусков [140].

Кокс мокрого тушения почти в два раза больше дробится, чем кокс сухого тушения. Истираемость кокса мокрого тушения почти в полтора раза больше, чем сухого [141].

Таким образом, на этапе тушения формируются свойства литейного кокса, представленные в таблице 19.

Таблица 19 – Свойства и параметры литейного кокса, формируемые на этапе 5 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Влажность	Общая влага	$W^p$
Прочность при высоких температурах	Показатель прочности после реакции с $CO_2$	CSR [27, 107]
Реакционная способность по $CO_2$	Показатель реакционной способности по $CO_2$	$K_m$ [51] и CRI [51, 140]
Прочность при комплексном нагружении [6]	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	$M_{40}$ [42, 137, 138] $M_{25}$ , [138] $M_{10}$ , [42, 137, 138]
Способность к поддержанию температуры плавки	Выход летучих веществ	$V^{daf}$ [140] $V^{daf}_k$ [51]
	Зольность	$A^d$ [140]
Дренажная способность	Средний размер куска	$d_{cp}$ [42, 137, 138, 140]
	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	$\gamma$ [42, 137, 138, 140]

Таблица 19 (окончание)

Свойство	Параметр	Обозначение
Способность к изменению химического состава чугуна	Массовая доля общей серы в сухом топливе	$S_t^d$ [139]
Трещиноватость	Общая, продольная и поперечная трещиноватость	$T_{общ}, T_{поп}, T_{пр}$ [32, 135]

После тушения кокс направляется на шестой этап – сортировку. После мокрого тушения кокс подается на сортировку по рампе, где он окончательно охлаждается [32]. Значительное увеличение времени нахождения кокса на рампе, а также наличие потока воздуха способствует снижению его влажности [32].

Рассев кокса по крупности производится с помощью валковых, вибрационных грохотов и сит с квадратными и круглыми отверстиями [14, 32, 142].

При увеличении механической нагрузки в процессе сортировки возможна стабилизация гранулометрического состава и увеличение прочности за счет дробления классов крупности 60-80 мм и 80 мм и более [14, 32, 142]. Применение резиновых сит позволяет снизить дробление кокса в процессе отсева [143].

Поскольку кокс крупности 80 мм и более в насыпной массе доменного кокса не желателен, но предпочтителен для использования в литейных вагранках, оптимальным решением при сортировке является использование сортировок, позволяющих выделять фракции 80 мм и более и 60 мм и более и стабилизировать их свойства [32].

Таким образом, на этапе «Сортировка» формируются следующие свойства литейного кокса (табл. 20).

Таблица 20 – Свойства и параметры литейного кокса, формирующиеся на этапе 6 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при комплексном нагружении	Прочность, определяемая в МИКУМ-барабане	M <sub>25</sub> [142], M <sub>10</sub> [142]
Дренажная способность	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	γ [32, 142]
Влажность	Общая влага	W <sup>p</sup> [32]

Поскольку после прохождения стадии сортировки литейный кокс является сформированной продукцией, в дальнейшем его свойства начинают изменяться. На седьмом этапе «Хранение» литейный кокс направляют в бункеры, где он хранится до отгрузки в вагоны. Такое перемещение кокса неизбежно сопряжено с дополнительным измельчением и снижением содержания класса крупности 60-80 мм и 80 мм и более и увеличением содержания мелочи [32].

Изменение гранулометрического состава в бункерах зависит как от свойств загружаемого кокса, так и от режима (технологии) заполнения. Крупный кокс, например, 60 мм и более, проходя бункера, будет разрушаться в большей степени, нежели кокс 40 мм и более или 25 мм и более. На степень измельчения влияет высота падения кокса при загрузке в бункер [32].

Таким образом, на этапе хранения изменяются следующие свойства литейного кокса (таблица 21).

Таблица 21 – Характеристики качества литейного кокса, формируемые на этапе 7 стадии «Производство»

Свойство	Параметр	Обозначение
Дренажная способность	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	γ [32]

### 3.1.5 Поставка потребителю

На первом этапе стадии, при погрузке в железнодорожные вагоны в первую очередь происходит изменение гранулометрического состава литейного кокса за счет разрушения крупных классов 60 мм и более. Причем при транспортировке вагонами кокс измельчается меньше, чем при подаче его по транспортерному тракту, имеющему значительное количество перегрузок. При этом наблюдается некоторое увеличение прочности при комплексном нагружении [29, 144]. По этой причине загрузка кокса в вагоны должна осуществляться плавно. Для этого можно использовать конвейерную загрузку, но в России она не применяется.

Второй этап стадии «Транспортирование». Транспортирование литейного кокса до потребителя осуществляют партиями (вагонами) по ГОСТ 22235-2010 и должна обеспечивать его сохранность требованиям, полученным при производстве.

В процессе транспортирования литейный кокс подвергается как механическим воздействиям, так и воздействию погодных условий. Было замечено, что при транспортировании литейного кокса от изготовителя до предприятия-потребителя содержание классов крупности 80 мм и более и 60-80 мм снижается, а прочность при комплексном нагружении несколько возрастает [82]. Эти процессы сопровождаются значительным возрастанием содержания мелких классов [82, 144].

Так как литейный кокс транспортируют в открытых вагонах, неизбежно воздействие осадков и влажности окружающей среды, влияющих непосредственно на влажность литейного кокса [93].

На третьем этапе стадии литейный кокс выгружают из вагонов на шихтовой двор, который может представлять собой бункер, крытый ангар или незащищенную от воздействия внешних условий территорию.

Применяют либо грейферная разгрузка, либо разгрузка в бункера и ямы. В бункер (яму) кокс ссыпают либо из вагонов с подъемной боковиной, либо переворачиванием вагона. Кокс высыпает на решетку, через которую он попадает в бункер. В случае достаточной заполненности бункера при высыпании литейный кокс

не испытывает сильных механических нагрузок. Однако, при загрузке кокса в пустой бункер нагрузки на него возрастают и может образовываться до 30 % мелочи [142]. За счет разрушения крупных классов изменяется прочность при комплексном нагружении.

Таким образом, на стадии «Поставка потребителю» изменяются следующие свойства литейного кокса (таблица 22).

Таблица 22 – Свойства и параметры литейного кокса, изменяющиеся на стадии «Поставка потребителю»

Свойство	Параметр	Обозначение
Прочность при комплексном нагружении	Прочность, определяемая в МИКУМ- барабане	M <sub>40</sub> [29, 82], M <sub>10</sub> [29, 82]
Дренажная способность	Выход классов крупности (гранулометрический состав, ситовой состав)	γ [29, 82, 142]
Влажность	Общая влага	W <sup>p</sup> [93]

### 3.1.6 Применение

Первый этап стадии «Хранение». После выгрузки литейный кокс хранится на шихтовом дворе или в бункере и находится под непрерывным воздействием условий окружающей среды. При открытом хранении на литейный кокс воздействует изменяющаяся влажность окружающего воздуха, температура, а также осадки. При хранении в бункере кокс защищен от осадков, однако влажность воздуха продолжает оказывать влияние на литейный кокс, пусть и в меньшей степени, чем при хранении на открытом складе [145].

Второй этап «Транспортирование внутри предприятия». При транспортировании внутри предприятия от шихтового двора до вагранки кокс многократно пересыпают (например, в бункер, на ленту транспортера, в бадью).

Степень разрушения кокса зависит от сложности системы коксоподачи на предприятии [146]. В результате перед загрузкой в вагранку появляется большое количество мелких классов. В целом характер разрушения аналогичен рассмотренным выше [146].

Третий этап – «Загрузка коксовой печи». Перед загрузкой вагранки необходимо отсеять мелкие классы менее 40 мм [19].

В процессе розжига вагранки литейный кокс холостой колоши начинают загружать частями: каждая последующая загружается после хорошего розжига предыдущей. Для холостой колоши как правило отбирают крупный кокс размером 100-150 мм [19]. Уровень первой холостой колоши должен быть выше верхнего края фурм на 200-250 мм, а по окончании розжига досыпают кокс до уровня 1200-1500 мм над основным рядом фурм. Загрузочное окно находится на высоте до 7 м в зависимости от размера вагранки.

При загрузке литейный кокс испытывает ударные воздействия, в следствии чего изменяется его гранулометрический состав. После продувки холостой колоши в течении 2-3 минут начинают загрузку вагранки, чередуя слои металлической шихты, кокса и флюса. При этом части металлической шихты, загружаемые сверху на литейный кокс, оказывают на него ударные воздействия.

Размеры кусков металлической шихты не должны превышать 250x200x100 мм при весе не более 35 кг. Все вторичные материалы должны быть разделены на части, не превышающие по длине 1/3 диаметра вагранки. Максимальный вес отдельных кусков не должен превышать 50 кг для вагранок диаметром до 1000 мм, и 70 кг для больших.

Чушки чугуна разбивают по пережигам на 2-3 части. Масса кусков лома не должна превышать 10-15 кг, масса ферросплавов – 3-5 кг. Металлическую колошу загружают в последовательности: стальной лом, чушковый чугун, лом чугуна, цеховые отходы. На практике при загрузке металлическая шихта может на 30 % состоять из возврата собственного производства – литниковых систем. Соответственно при загрузке металлической колоши на литейный кокс попадают куски металла массой от 10 до 70 кг, некоторые из которых имеют острые элементы

(литниковые системы), что может приводить к разрушению кокса и, как следствие, изменению его гранулометрического состава и дренажной способности столба шихты.

После заполнения шахты вагранки шихтой до нижнего порога загрузочного окна, весь объем загрузки прогревают при естественной тяге в течении 15-30 минут, после чего подают дутье [19].

Четвертый этап – «Плавка чугуна». В процессе плавки чугуна в вагранке литейный кокс проходит несколько температурных зон (рис. 6).

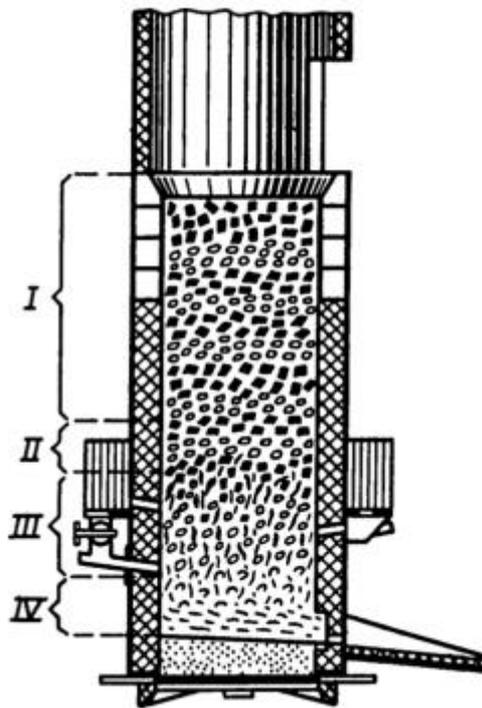


Рисунок 6 – температурные зоны вагранки

В первой зоне – зоне подогрева шихты – литейный кокс постепенно нагревается до 1150—1200 °С. Данный процесс сопровождается испарением влаги, последующим возгоранием кокса при температуре 600-700 °С и удалением летучих веществ. Испарение влаги и выход летучих веществ требуют дополнительных затрат тепла, что понижает энергоэффективность плавки.

Реализуется влажность, изменяется способность литейного кокса к поддержанию температуры плавки. Также при вторичном нагреве возможна

реализация трещин, образовавшихся при тушении литейного кокса [32]. Реализация трещин может приводить к изменению прочности литейного кокса при комплексном нагружении.

Во второй зоне металлическая шихта плавится и каплями стекает по горящим кускам литейного кокса, насыщаясь углеродом и серой, через третью зону, чем обеспечивается перегрев чугуна.

Во второй и третьей зоне литейный кокс горит уже достаточное время, а развиваемая его горением температура максимальна. Вследствие горения снижается механическая прочность литейного кокса при высоких температурах. Возможно изменение дренажной способности из-за изменения гранулометрического состава литейного кокса под тяжестью столба шихты. Разрушению литейного кокса способствует также снижение его прочности, вызванное изменением микроструктуры в следствие нагрева [147, 148]. В процессе насыщения расплавленного чугуна углеродом, фосфором и серой реализуется способность литейного кокса к изменению химического состава чугуна. В этих зонах углерод литейного кокса наиболее интенсивно взаимодействует с кислородом и углекислым газом, реализуется реакционная способность литейного кокса, что влияет на его способность к поддержанию температуры плавки.

В четвертой зоне – горне, кокс и продукты его горения имеют более низкую температуру из-за недостатка кислорода [19]. В процессе горения снижается механическая прочность кокса при высоких температурах вплоть до его полного разрушения. В данной зоне литейный кокс должен выдерживать нагрузку всего столба шихты [149].

Таким образом, на этапе плавки чугуна изменяются и проявляются по назначению свойства, представленные в таблице 23.

На основе анализа процессов на всех стадиях и этапах жизненного цикла на предмет их влияния на установленные характеристики качества литейного кокса, построена информационная модель динамики качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла (рис. 7).

Таблица 23 – Свойства литейного кокса изменяющиеся и реализующиеся в процессе плавки чугуна

Свойство	1-я зона	2-я зона	3-я зона	4-я зона
Способность к поддержанию температуры плавки	Изменяется	Проявляется по назначению		
Реакционная способность		Проявляется по назначению	Проявляется по назначению	
Влажность	Проявляется по назначению			
Тепловые свойства	Проявляется по назначению	Проявляется по назначению	Проявляется по назначению	Проявляется по назначению
Дренажная способность	Изменяется, проявляется по назначению			
Прочность при высоких температурах		Изменяется, проявляется по назначению	Изменяется, проявляется по назначению	Проявляется по назначению
Трещиноватость	Проявляется по назначению	Проявляется по назначению	Проявляется по назначению	
Способность к изменению химического состава чугуна			Проявляется по назначению	Проявляется по назначению

В результате построения информационной модели установлено, что формирование свойств литейного кокса начинается на стадии «Закупки» и заканчивается на этапе «Сортировки» стадии «Производство» (рис. 2). Последним формируемыми свойствами является влажность, дренажная способность, прочность при динамических нагрузках и комплексном нагружении. Начиная с этапа «Хранения» стадии «Производство» свойства литейного кокса начинают изменяться (рис. 7). После прохождения этапа «Сортировка» стадии «Производство»



В разделе 3.1 главы 3 обозначено, что литейный кокс обладает рядом свойств, определяющих его качество (см. табл. 11, рис. 8). При этом каждое такое свойство (характеристика 1, характеристика 2 и т.д., рис. 8) может характеризоваться неограниченным набором параметров (П1, П2 и т.д., рис. 8), количественно его определяющих.

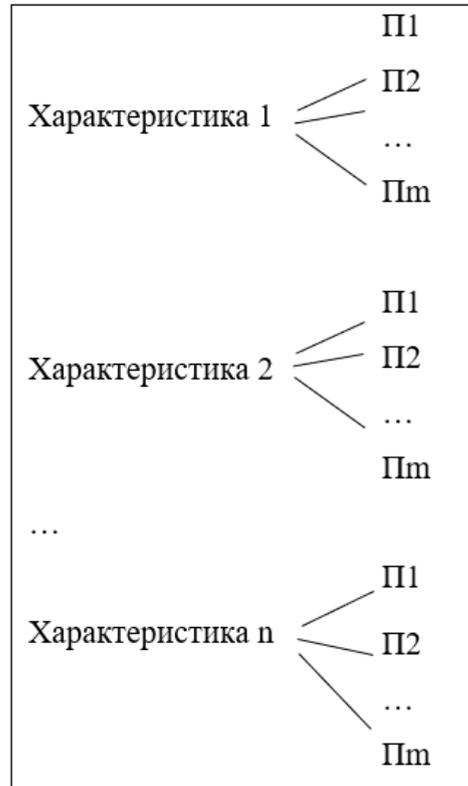


Рисунок 8 – Схематическое изображение качества объекта: характеристика 1, характеристика 2 и т.д. – свойства литейного кокса; П1, П2 и т.д. – показатели, характеризующие отдельные свойства.

Условия, в которых находится литейный кокс на каждом этапе жизненного цикла, различны. По этой причине одно и то же свойство должно характеризоваться на разных этапах жизненного цикла разными параметрами (показателями качества). При этом условия испытаний, для определения значений этих параметров должны соответствовать условиям, в которых находится литейный кокс на конкретном этапе его жизненного цикла. В связи с наблюдаемым изменением параметров литейного кокса на этапах его жизненного цикла, показанным в разделе 3.1 главы 3, подобный подход необходим также для прогноза качества литейного кокса у потребителя.

Разрабатываемый подход заключается в том, что качество литейного кокса определяют набором характеристик-свойств, неизменным на каждом этапе жизненного цикла, а каждая характеристика описывается индивидуальным набором показателей для каждого отдельного этапа. Показатели, численно выражающие характеристику качества и используемые для ее оценки, выбирают таким образом, чтобы условия испытаний для их определения отражали условия данного этапа жизненного цикла литейного кокса.

В процессе жизненного цикла, характеристики литейного кокса изменяются и соответственной изменяется качество (рис. 9).

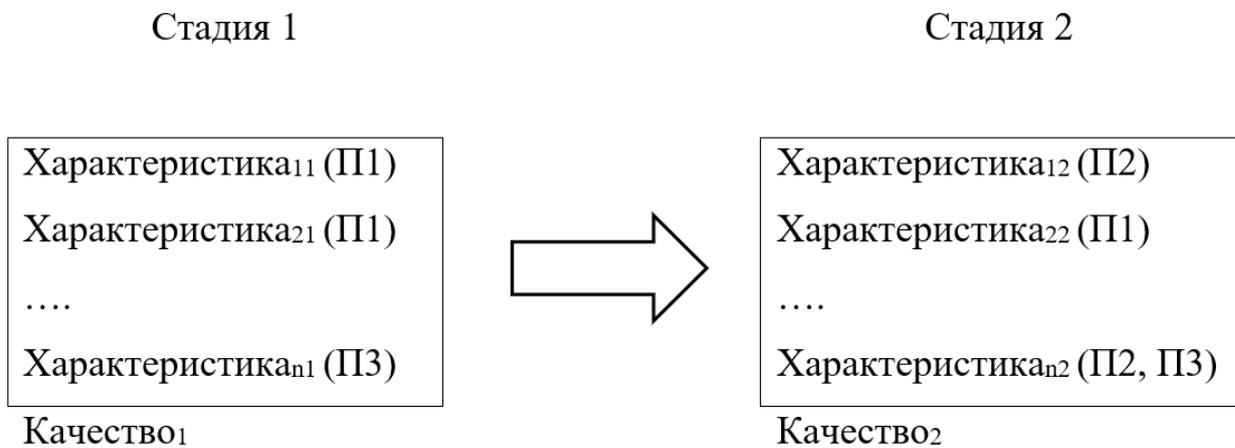


Рисунок 9 – Принципиальная схема динамики характеристик качества

Таким образом, для определения уровня качества литейного кокса на отдельном этапе жизненного цикла необходимо:

- 1) установить влияние процессов этапа ЖЦ на характеристики литейного кокса;
- 2) выявить перечень показателей, отражающих изменение характеристики литейного кокса в условиях данного этапа;
- 3) определить значение характеристик и оценить уровень качества литейного кокса на данном этапе.

Оценку качества литейного кокса предлагается проводить путем присвоения весовых коэффициентов характеристикам-свойствам качества, поскольку значимость этих характеристик качества зависит от требуемых свойств выплавляемого чугуна и назначения получаемых отливок. Весовые коэффициенты

каждой характеристики зависят от требований к выплавляемому литейному чугуно, устанавливаются экспертным путем и не меняются от этапа к этапу. Параметру (показателю качества), определяющему характеристику на данном этапе, присваивают уровни качества: отличное (5), хорошее (4), удовлетворительное (3), неудовлетворительное (2). Если характеристику определяют несколькими параметрами на данной стадии, то находят среднее арифметическое значений уровней качества для данных параметров.

Уровень качества литейного кокса на стадии его жизненного цикла оценивают по формуле [151]

$$K_k = B_1 \cdot K_{X1} + B_2 \cdot K_{X2} + \dots + B_n \cdot K_{Xn}, \quad (5)$$

где  $K_k$  – уровень качества литейного кокса на стадии жизненного цикла;  $K_{X1}$ ,  $K_{X2}$ , ...,  $K_{Xn}$  – уровни качества литейного кокса, соответствующие характеристикам на стадии жизненного цикла;  $B_1$ ,  $B_2$ , ...,  $B_n$  – весовые коэффициенты характеристик литейного кокса.

Уровни качества литейного кокса, соответствующие определенным характеристикам ( $Y_{X1}$ ,  $Y_{X2}$ , ...,  $Y_{Xn}$ ) устанавливают по четырех балльной шкале: 5 – отличное качество характеристики, 4 – хорошее качество, 3 – удовлетворительное, 2 – неудовлетворительное. Для присвоения уровня качества характеристик можно опираться на методику, описанную в работе [151]. Используя статистические данные по значению характеристики за определенный период времени (например, за 1 год) и опираясь на рекомендации национального стандарта ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) [152] можно вычислить интервалы значений показателей для соответствующих уровней качества.

Опираясь на рекомендации [152] установим уровни качества литейного кокса следующим образом:  $K_k > 4,5$  – отличное качество литейного кокса;  $3,5 < K_k \leq 4,5$  – хорошее качество литейного кокса;  $2,5 < K_k \leq 3,5$  – удовлетворительное качество литейного кокса;  $K_k \leq 2,5$  – неудовлетворительное качество литейного кокса. При использовании данной методики для назначения уровня качества можно

использовать рекомендованные выше значения или опираться практический опыт плавки чугуна в вагранке.

В соответствии с требованиями к качеству литейного кокса, сформулированными в пункте 3.1, качество литейного кокса характеризуется 10 свойствами: способностью к поддержанию температуры плавки, влажностью, реакционной способностью, дренажной способностью, прочностью при комплексном нагружении, при динамических нагрузках и при высоких температурах, трещиноватостью и способностью к изменению химического состава чугуна.

В качестве примера использования данной методики оценим изменение качества литейного кокса на этапе «Хранение» стадии «Применение».

Установим весовые коэффициенты для каждой характеристики качества. Самый большой весовой коэффициент 0,2 присваиваем характеристике «способность к изменению химического состава чугуна», поскольку химический состав выплавляемого чугуна строго нормирован [153]. Сера и фосфор, содержащиеся в литейном коксе, в процессе плавки переходят в чугун, что снижает его потребительские свойства [18, 19]. Помимо этого, способы снижения серы в чугуне предусматривают увеличение расхода флюса и литейного кокса, а также снижает производительность печи [25, 154].

На втором месте по значимости характеристики «способность к поддержанию температуры плавки», «дренажная способность» и «прочность при динамических нагрузках». Им присваиваем весовой коэффициент равный 0,15. Как уже говорилось выше, способность литейного кокса к поддержанию температуры плавки обеспечивает необходимую температуру выпускаемого чугуна [19, 25, 37]. Повышение такого показателя, как зольность, приводит к увеличению расхода кокса в следствие повышения затрат тепла на плавление минеральной массы [22]. Дренажная способность обеспечивает беспрепятственное прохождение расплавленного чугуна, а также дутья и отходящих газов сквозь столб шихты вагранки. Эффективность плавки зависит от дренажной способности [22]. Низкая дренажная способность может привести к снижению температуры выпускаемого чугуна и нарушению технологических режимов плавки [19, 25, 37]. От прочности

литейного кокса при динамических нагрузках зависит его гранулометрический состав и, как следствие, дренажная способность столба шихты [22].

Следующими по значимости являются характеристики «прочность при комплексном нагружении» и «влажность». Этим характеристикам присваиваем коэффициент весомости равный 0,1. Высокая прочность литейного кокса при комплексном нагружении, как это было показано в разделе 3.1, способствует сохранению его гранулометрического состава в процессе доставки кокса от предприятия-изготовителя, а также в процессе его транспортирования внутри предприятия-потребителя. Повышенная влажность приводит к дополнительным затратам тепла в процессе плавки чугуна в вагранке, что приводит к повышению расхода литейного кокса и снижению энергоэффективности плавки [155–157].

Наименее значимыми будем считать реакционную способность, прочность при высоких температурах и трещиноватость, им присваиваем коэффициент весомости равный 0,05. Реакционная способность литейного кокса в процессе плавки чугуна в вагранке имеет гораздо меньшее значение, чем в доменном производстве, за счет разницы в технологии плавки. Она оказывает влияние на снижение температуры внутри вагранки и приводит к перерасходу кокса [22]. Прочность при высоких температурах менее важна, чем прочность при динамических нагрузках. Это обусловлено относительно небольшим размером вагранок, меньшей продолжительностью плавки и преимущественно меньшими температурами, а также тем, что основные ударные воздействия, оказываемые на литейный кокс и влияющие на его дренажную способность, осуществляются на этапе загрузки вагранки [19, 25, 37]. Высокая трещиноватость влияет на изменение гранулометрического состава литейного кокса, но в меньшей степени, чем прочность при комплексном и динамическом нагружении [22].

На этапе «Хранение» стадии «Производство» изменяется только влажность литейного кокса (рис. 10), соответственно, изменение уровня качества на данном этапе будет определяться изменением значений показателя влажности. Влажность характеризуется показателями общей влаги и влаги в аналитической пробе (табл. 8), однако, определение этих параметров проводится на измельченных пробах кокса. В

главе 4 предложена методика оценки влажности литейного кокса товарной крупности, которая позволяет учесть крупность различных кусков литейного кокса. Таким образом, на этапе «Хранение» стадии «Производство» необходимо оценить только один параметр  $W_{т.к.}$ . Предположим, что на этапе «Разгрузка» стадии «Поставка потребителю» все характеристики имели отличный уровень качества. В результате хранения влажность литейного кокса выросла до 11,61 % (см. главу 4). Опираясь на предложенную в статье [151] методику оценки уровня качества по показателю влажности, влажность, превышающую 5 %, считаем неудовлетворительной. Таким образом, используя формулу (5), получаем, что на этапе «Хранение» стадии «Применение» уровень качества литейного кокса снизился на 0,3 (табл. 24).

Таблица 24 – Пример применения методики оценки уровня качества литейного кокса на этапах жизненного цикла

Характеристика качества	Весовой коэффициент	Уровень качества характеристики	
		Этап «Разгрузка вагонов»	Этап «Хранение»
Способность к поддержанию температуры плавки	0,15	5	5
<b>Влажность - <math>W_{т.к.}</math></b>	0,1	5	2
Реакционная способность	0,05	5	5
Дренажная способность	0,15	5	5
Прочность при комплексном нагружении	0,1	5	5
Прочность при динамических нагрузках	0,15	5	5
Прочность при высоких температурах	0,05	5	5
Трещиноватость	0,05	5	5
Способность к изменению химического состава чугуна	0,2	5	5
<b>Уровень качества литейного кокса</b>		<b>5</b>	<b>4,7</b>

### 3.3 Анализ метрологического обеспечения оценки качества литейного кокса

Метрологическое обеспечение испытаний для оценки качества литейного кокса представляет собой строго определённый набор средств и методов [158].

Анализ информационной модели (рис. 7) показал, что качество литейного кокса начинает изменяться уже на стадии хранения. Оценка качества литейного кокса возможна только после прохождения этапа сортировки стадии «Производство», когда из общей массы валового кокса выделяется кокс литейный, соответственно литейный кокс сформирован как готовая продукция.

Проанализируем наличие метрологического обеспечения испытаний тех свойств литейного кокса, которые изменяются на этапах жизненного цикла.

После прохождения этапа сортировки литейный кокс загружается в бункеры для хранения, при этом он подвергается ударным нагрузкам.

Метод определения сопротивления каменноугольного кокса удару установлен в ГОСТ 28946-91 [159]. Для определения прочности кокса на сбрасывание из партии отбирают пробу с размером кусков 50 мм и более. После определения гранулометрического состава пробы, ее помещают в ящик 1, после чего ящик поднимают на высоту 1830 мм и открывают. Проба кокса падает на стальную плиту 2 (рис. 10). Операцию повторяют еще три раза. После проведения испытаний литейный кокс просеивается на комплекте сит с квадратными отверстиями. По результатам испытаний определяют индексы сбрасывания, а также среднюю величину кусков до и после испытаний. Данный метод подходит для оценки прочности литейного кокса на этапе хранения стадии «Производство».

Также на данном этапе изменяется дренажная способность за счет разрушения литейного кокса. Методика определения гранулометрического состава литейного кокса установлена в ГОСТ 5954.1-91 [14] и предусматривает проведение ситового анализа и вычисление выхода отдельных классов крупности. Отбираемая проба кокса зависит от номинального верхнего размера кусков и должна находиться в диапазоне от 40 до 500 кг. Пробу пропускают через комплект сит с круглыми или квадратными

отверстиями. Выход класса крупности определяют по массе кокса, оставшегося на соответствующих ситах, выражают в процентах от общей массы пробы.

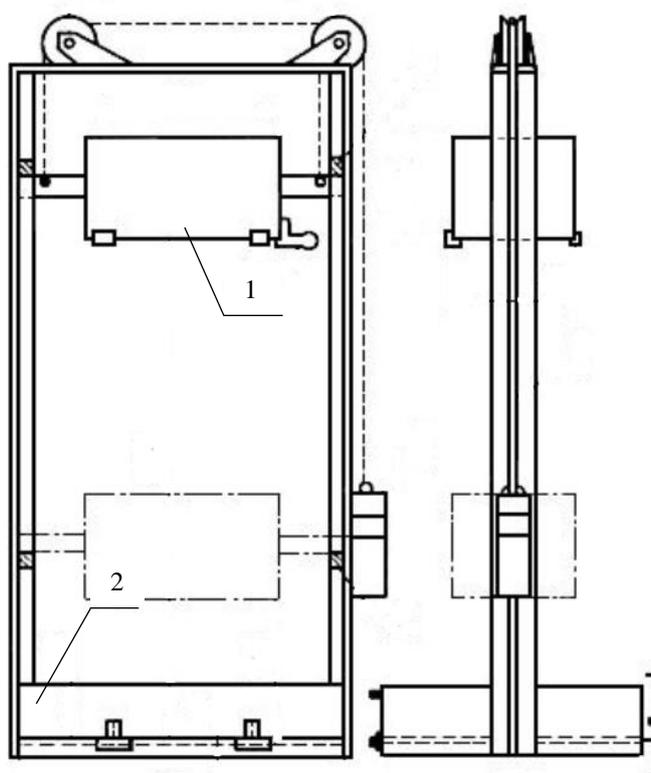


Рисунок 10 – Аппарат для испытания прочности кокса на сбрасывание  
По результатам испытаний вычисляют средний размер куска по формуле

$$d_{\text{ср}} = \frac{B(a-c) + C(b-d) + \dots + J(h-k) + 100j}{200}, \quad (6)$$

где,  $a, b, c, \dots, j, k$  – размер отверстий сита, мм;  $A, B, C, \dots, J, K$  – кумулятивные проценты, характеризующие надрешетный продукт.

Данный метод испытаний не предусматривает воспроизведение специфических условий, поэтому подходит для оценки гранулометрического состава на любом этапе жизненного цикла литейного кокса [160].

На этапе загрузки вагонов стадии «Поставка потребителю» изменяется дренажная способность и прочность при комплексном нагружении (рис. 7).

Стандартный метод определения прочности при комплексном нагружении установлен в ГОСТ 5953–93. Для испытаний отбирают объединенную пробу кокса массой не менее 200 кг и размером кусков 20 мм и более. Объединенную пробу

делят на четыре части массой  $50 \pm 0,5$  кг. Соотношение классов крупности содержащихся в каждой из четырех проб должен соответствовать соотношению классов крупности в объединенной пробе. Содержание влаги в пробе не должно превышать 3 %.

Проба массой 50 кг помещается в цилиндрический стальной барабан длиной 1 м и диаметром 1 м. На внутренней поверхности барабана параллельно его продольной оси установлены четыре угловых профиля (или ребра)  $100 \times 50 \times 10$  мм, которые делят стенку на четыре равные части. Затем барабан вращается со скоростью 25 оборотов в минуту до достижения 100 полных оборотов. После этого пробу выгружают, рассеивают (методом ручной сортировки или механического просеивания) и определяют гранулометрический состав.

Показатель  $M_{40}$  представляет собой процентное содержание испытуемой пробы, оставшейся на (или над) контрольном сите с размером отверстий 40 мм, а показатель  $M_{10}$  - процентное содержание испытуемой пробы, прошедшее через контрольное сито с размером отверстий 20 мм. Оно состоит из массы фракций менее 10 мм и присоединенной к ней массы потерь в том случае, если они не больше, чем допускается. Эта величина служит дополнением до 100 % испытуемой пробы, оставшейся на (или над) контрольном сите с размером отверстий 10 мм.

Исходя из условий испытаний, литейный кокс подвергается большому количеству соударений, падению с высоты не более 1 метра (диаметр барабана), а также истиранию при соприкосновении с другими кусками кокса, а также со стенками и ребрами барабана. Т.е. данные испытания имитируют пересыпания кокса из одной емкости в другую и подходит для определения прочности при загрузке вагонов [161].

На этапе транспортирования изменяется дренажная способность, прочность при комплексном нагружении и влажность. Транспортирование литейного кокса от предприятия-изготовителя до предприятия-потребителя осуществляют железнодорожными вагонами по ГОСТ 22235-2010 [162].

В соответствии с данными исследований, проведенных для железнодорожных систем США и Западной Европы [163], при перевозках железнодорожным

транспортом существуют три типа воздействий на перевозимый груз: удары, имеющие место при маневрировании состава; удары при движении состава вследствие межвагонных столкновений; вибрация, возникающая при движении транспортного средства по рельсовому пути. При этом на груз воздействуют как стационарные вибрации, возникающие после достижения транспортным средством установившейся скорости движения, так и нестационарные вибрации при низких скоростях движения. Наиболее жесткие условия транспортирования характерны для вагонов с простыми пружинными амортизаторами, используемых для перевозки минерального сырья.

Таким образом при транспортировании литейного кокса в вагонах происходит его разрушение, сопровождающееся также изменением гранулометрического состава [82]. При этом необходимо учитывать, что предприятия литейного производства располагаются, как правило, за пределами коксохимических заводов, и на различном расстоянии.

Условия испытаний для определения показателей прочности в соответствии с требованиями ГОСТ 5953–93 не соответствуют условиям транспортирования литейного кокса, т.к. не воспроизводят вибрационных воздействий и не учитывают расстояние транспортирования. По этой причине показатели  $M_{40}$  и  $M_{10}$  не подходят для оценки прочности литейного кокса на этапе транспортирования. При этом значения показателей  $M_{40}$  и  $M_{10}$  могут изменяться в процессе транспортирования [82], однако это не значит, что значение этих показателей характеризует качество литейного кокса на этапе транспортирования [164].

Метод определения общей влаги литейного кокса установлен в ГОСТ 27588-91 (ИСО 579-81). Определение массовой доли общей влаги проводится по лабораторной пробе, подготовленной по ГОСТ 23083-78. Пробу литейного кокса отбирают из потока или из железнодорожного вагона методом конверта. Отобранный кокс всех классов крупности измельчают до размера частиц 0-13 мм. Измельчённую пробу высыпают на противень, помещают в предварительно нагретый до 200 °С сушильный шкаф и выдерживают в нем до постоянной массы. Массовую долю общей влаги

вычисляют как отношение разницы масс навески кокса до высушивания и после к массе навески кокса до высушивания.

Данная методика определения содержания влаги в литейном коксе не учитывает его крупность, однако влажность литейного кокса различных классов крупности не одинакова [32].

В коксохимической промышленности не применяют специальные технологии для производства литейного кокса. Из одного коксового пирога выделяется в зависимости от крупности металлургический (классы 25-40 мм, 40-60 мм) и литейный кокс (классы 40-60 мм, 60-80 мм, 80 мм и более). По длине коксового пирога наблюдается некоторая неоднородность свойств, например, при продвижении от пристеночной к осевой части увеличивается пористость, средний диаметр пор, электросопротивление, реакционная способность, в то время как структурная прочность, предел прочности при механических испытаниях и кажущаяся плотность снижаются [32]. Подобная неоднородность вызвана особенностями процесса коксования, вследствие которых снижается скорость нагрева угольной шихты по мере удаления от стен коксовой камеры. Специфика процесса коксования обуславливает развитие трещиноватости, предопределяющей формирование гранулометрического состава кокса. В кусках классов 60-80 мм и 80 мм и более, как правило, преобладает приосевая часть кокса, а в классах 25-40 мм и 40-60 мм преобладают обломки пристеночных частей кусков [32].

Т.к. в литейном производстве предпочтительным является кокс классов крупности 60-80 мм и 80 мм и более [34], методика оценки влажности литейного кокса на этапе транспортирования должна учитывать отличия крупных классов, обусловленными технологией коксования.

На этапе разгрузки вагонов изменяется дренажная способность и прочность при комплексном нагружении. Условия, в которых находится литейный кокс аналогичны условиям на этапе загрузки вагонов стадии «Поставка потребителю» и этапе хранения стадии «Производство» рисунок 7.

На этапе хранения стадии «Применение» изменяется влажность литейного кокса. Аналогично с условиями на этапе транспортирования методика оценки

влажности должна учитывать крупность литейного кокса, в отличии от методики, установленной в ГОСТ 27588-91 (ИСО 579-81).

На этапе транспортирования внутри предприятия изменяется дренажная способность и прочность при комплексном нагружении. При транспортировании внутри предприятия кокс пересыпается: из места хранения на ленту транспортёра или в бадью. На степень разрушения литейного кокса влияет сложность системы коксоподачи, количество перепадов ленточного транспортёра [29]. Для определения прочности литейного кокса в данных условиях можно использовать метод, описанный в ГОСТ 5953–93.

В процессе загрузки вагранки литейный кокс испытывает ударные нагрузки, что приводит к изменению его дренажной способности. Можно выделить два вида ударных нагрузок. В первом случае нагрузки возникают при падении литейного кокса в шахту вагранки. В установившемся режиме работы уровень рабочей колоши стараются поддерживать на расстоянии 1,5-2 м от загрузочного окна. Соответственно, метод определения прочности на сбрасывание, установленный в ГОСТ 28946-91, подходит для оценки прочности при загрузке литейного кокса в вагранку.

Второй вид ударных воздействий обусловлен загрузкой металлической части шихты. В металлическую шихту может входить чушки чугуна, стальной и чугунный лом, вторичные металлы. Размеры лома не должны превышать 250x200x100 мм, а вес не более 35 кг. Вторичные материалы рекомендуется делить на части, не превышающие одной трети диаметра вагранки, при этом максимально допустимый вес – 50 кг. При подготовке шихты рекомендуется чушки чугуна делить на 2-3 части, лом разбивать на куски, не превышающие 10-15 кг [19].

Анализ наличия показателей, для оценки характеристик качества литейного кокса, а также методик их оценки представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Характеристики качества, показатели и методы их оценки на этапах жизненного цикла литейного кокса

Стадия ЖЦ	Этап ЖЦ	Характеристика качества/свойство	Показатель качества/параметр	НТД на метод оценки
Производство	Хранение	Прочность при динамических нагрузках	Показатель прочности на сбрасывание, ИС <sub>80</sub> , ИС <sub>40</sub> (табл. 9)	ГОСТ 25471-82
		Дренажная способность	Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91
Поставка потребителю	Загрузка вагонов	Прочность при комплексном нагружении	Показатель прочности М <sub>40</sub> , % (табл. 9)	ГОСТ 5953-93
		Дренажная способность	Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91
	Транспортирование	Прочность при комплексном нагружении	Отсутствует	Отсутствует
		Дренажная способность	Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91
		Влажность	Отсутствует	Отсутствует
	Разгрузка вагонов	Прочность при комплексном нагружении	Показатель прочности М <sub>40</sub> , % (табл. 9)	ГОСТ 5953-93
Дренажная способность		Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91	

Таблица 25 (окончание)

Стадия ЖЦ	Этап ЖЦ	Характеристика качества/свойство	Показатель качества/параметр	НТД на метод оценки
Применение	Хранение	Влажность	Отсутствует	Отсутствует
	Транспортирование внутри предприятия	Прочность при комплексном нагружении	Показатель прочности $M_{40}$ , % (табл. 9)	ГОСТ 5953-93
		Дренажная способность	Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91
	Загрузка вагранки	Прочность при динамических нагрузках	Показатель прочности на сбрасывание, $IS_{80}$ , $IS_{40}$ (табл. 9)	ГОСТ 25471
		Прочность при динамических нагрузках	Отсутствует	Отсутствует
		Дренажная способность	Выход классов крупности, 40 мм и более, 60 мм и более, 80 мм и более (табл. 8)	ГОСТ 5954.1-91

Таким образом на основе анализа нормативно-технической документации, регламентирующей требования к испытаниям литейного кокса установлено, что отсутствуют методы оценки:

- 1) прочности при комплексном нагружении на этапе транспортирования стадии «Поставка потребителю»;
- 2) влажности на этапе транспортирования стадии «Поставка потребителю»;
- 3) влажности на этапе хранения стадии «Применение»;
- 4) прочности при динамических нагрузках на этапе загрузки вагранки стадии «Применение».

### Выводы

1. Установлен перечень свойств литейного кокса, определяющих требования к его качеству, а именно: способность к поддержанию температуры плавки, реакционная способность, влажность, тепловые свойства, дренажная способность, прочность при комплексном нагружении, прочность при динамических нагрузках, прочность при высоких температурах, трещиноватость, способность к изменению химического состава чугуна.

2. Разработана информационная модель динамики характеристик качества литейного кокса на стадиях и этапах жизненного цикла, основанная на информации о влиянии процессов, протекающих на стадиях жизненного цикла, на формирование и изменение свойств литейного кокса.

3. Установлено, что формирование свойств литейного кокса начинается на стадии закупок и заканчивается на этапе сортировки стадии «Производство». Последними формируемыми свойствами является влажность, дренажная способность, прочность при динамических нагрузках и комплексном нагружении.

4. Начиная с этапа хранения стадии «Производство», свойства литейного кокса начинают изменяться. После прохождения этапа «Сортировка» стадии «Производство» изменяются только влажность, влажность, дренажная способность, прочность при динамических нагрузках и комплексном нагружении. Данных по изменению тепловых свойств не обнаружено.

5. Разработан подход к оценке уровня качества литейного кокса учитывающий влияние процессов, протекающих на этапах жизненного цикла на изменение характеристик качества.

6. Установлено, что отсутствуют методы оценки:

- прочности при комплексном нагружении на этапе транспортирования стадии «Поставка потребителю»;
- влажности на этапе транспортирования стадии «Поставка потребителю»;
- влажности на этапе хранения стадии «Применение»;
- прочности при динамических нагрузках на этапе загрузки вагранки стадии «Применение».

## ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА СТАДИИ «ПОСТАВКА ПОТРЕБИТЕЛЮ»

### 4.1 Разработка методики оценки прочности литейного кокса на этапе транспортирования

Как было установлено в главе 3, на стадии поставки потребителю изменяется прочность литейного кокса при комплексном нагружении, характеризующая параметрами  $M_{40}$  и  $M_{10}$  (глава 3, табл. 22). Помимо этого, показатель прочности  $M_{40}$  является характеристикой качества литейного кокса в соответствии с ГОСТ 3340-88 и указывается в сертификате качества, выдаваемом производителем на литейный кокс при поставке потребителю.

Для оценки качества литейного кокса на этапе поставки потребителю необходимо использовать методы оценки, отражающие условия, соответствующие стадии поставки потребителю. Проанализируем методику испытаний для определения показателей прочности  $M_{40}$  и  $M_{10}$  на предмет соответствия условий испытаний реальным условиям, в которых находится литейный кокс.

Метод определения прочности литейного кокса по показателям  $M_{40}$  и  $M_{10}$  установлен в ГОСТ 8929-75. Для испытаний отбирается объединенная проба кокса массой не менее 200 кг и размером кусков 20 мм и более. Объединенная проба делится на четыре части массой  $50 \pm 0,5$  кг. Соотношение классов крупности содержащихся в каждой из четырех проб должен соответствовать соотношению классов крупности в объединенной пробе. Содержание влаги в пробе не должно превышать 3 % (7 % для доменного кокса).

Проба массой 50 кг помещается в цилиндрический стальной барабан длиной 1 м и диаметром 1 м. На внутренней поверхности барабана параллельно его продольной оси установлены четыре угловых профиля (или ребра)  $100 \times 50 \times 10$  мм, которые делят стенку на четыре равные части. Затем барабан вращается со скоростью 25 оборотов в минуту до достижения 100 полных оборотов. После этого

пробу выгружают, рассеивают (методом ручной сортировки или механического просеивания) и определяют гранулометрический состав.

Показатель  $M_{40}$  представляет собой процентное содержание испытуемой пробы, оставшейся на (или над) контрольном сите с размером отверстий 40 мм, а показатель  $M_{10}$  - процентное содержание испытуемой пробы, прошедшее через контрольное сито с размером отверстий 20 мм. Оно состоит из массы фракций менее 10 мм и присоединенной к ней массы потерь в том случае, если они не больше, чем допускается. Эта величина служит дополнением до 100% испытуемой пробы, оставшейся на (или над) контрольном сите с размером отверстий 10 мм.

Исходя из условий испытаний, литейный кокс подвергают большому количеству соударений, падению с высоты не более 1 метра (диаметр барабана), а также истиранию при соприкосновении с другими кусками кокса, а также со стенками и ребрами барабана. Т.е. данные испытания имитируют пересыпания кокса из одной емкости в другую.

На стадии «Поставка потребителю» происходит загрузка в вагоны, транспортирование, разгрузка вагонов. На этапах загрузки и разгрузки железнодорожного вагона действительно происходит пересыпание кокса.

Транспортирование литейного кокса от предприятия-изготовителя до предприятия-потребителя осуществляют железнодорожными вагонами по ГОСТ 22235-2010 [162].

В соответствии с данными исследований, проведенных для железнодорожных систем США и Западной Европы [163], при перевозках железнодорожным транспортом существуют три типа воздействий на перевозимый груз: удары, имеющие место при маневрировании состава; удары при движении состава вследствие межвагонных столкновений; вибрация, возникающая при движении транспортного средства по рельсовому пути. При этом на груз воздействуют как стационарные вибрации, возникающие после достижения транспортным средством установившейся скорости движения, так и нестационарные вибрации при низких скоростях движения. Наиболее жесткие условия транспортирования характерны

для вагонов с простыми пружинными амортизаторами, используемых для перевозки минерального сырья.

Таким образом при транспортировании литейного кокса в вагонах происходит его разрушение, сопровождающееся также изменением гранулометрического состава [32]. Предприятия литейного производства располагаются, как правило, за пределами коксохимических заводов, и на различном расстоянии.

Условия испытаний для определения показателей прочности  $M_{40}$  и  $M_{10}$  не соответствуют условиям транспортирования литейного кокса, т.к. не воспроизводят вибрационных воздействий и не учитывают расстояние транспортирования. По этой причине показатели  $M_{40}$  и  $M_{10}$  не подходят для оценки прочности литейного кокса на этапе транспортирования. При этом значения показателей  $M_{40}$  и  $M_{10}$  могут изменяться в процессе транспортирования, как это было показано в работах [32, 82], однако это не значит, что значение этих показателей характеризует качество литейного кокса на этапе транспортирования.

Для объективной оценки разрушения литейного кокса при транспортировании был разработан метод оценки, воспроизводящий условия, в которых находится литейный кокс.

Сущность метода заключается в испытаниях образцов литейного кокса различной крупности на вибрационном стенде и последующей оценке изменения их массы и гранулометрического состава. До и после проведения испытания измеряют массу образца, по полученным данным рассчитывают показатель разрушения литейного кокса при транспортировании по формуле

$$P_T = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (7)$$

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

Отбор проб осуществляют из вагона в соответствии с требованиями ГОСТ 23083-78 [165].

Транспортирование железнодорожным транспортом относится к классу особо легких (ОЛ) в соответствии с ГОСТ Р 51908-2002 [166]. В соответствии с ГОСТ Р

51909-2002 [167], ГОСТ Р 51908-2002 [166], ГОСТ РВ 20.57.305-98 [168] был осуществлен выбор режимов испытаний с учетом особо легких условий транспортирования. В качестве испытательного оборудования был выбран вибрационный электродинамический стенд УВЭ-100/5-300, максимальная амплитуда виброускорения составляла  $29,4 \text{ м/с}^2$  (3g) и частота вибрации 30 Гц. Для определения массы были выбраны лабораторные весы с погрешностью 0,01 г. Гранулометрический состав определялся в соответствии с требованиями ГОСТ 5954.1-91 [14].

Гранулометрический состав, наряду с показателями прочности  $M_{40}$  и  $M_{10}$  также изменяется в процессе транспортирования (глава 3, табл. 22). Методика оценки гранулометрического состава, указанная в ГОСТ 5954.1-91 [14], предполагает рассев литейного кокса на ситах с соответствующим диаметром отверстий и последующим взвешиванием каждой фракции. Данная методика не предполагает каких-либо специфических условий испытаний, поэтому полностью подходит для определения гранулометрического состава на стадии поставки потребителю.

В качестве апробации разработанного метода были проведены исследования степени разрушения при транспортировании. Для них было отобрано 45-ть образцов литейного кокса различной крупности из 3-х партий от двух поставщиков (партия 1/1 – поставщик 1, партии 1/2 и 1/3 – поставщик 2): 40-60 мм, 60-80 мм, 80 мм и более (табл. 21). Образцы партий № 1/1 и № 1/2 по данным сертификатов качества, выданных коксохимическими предприятиями, соответствовали требованиям ГОСТ 3340-88 [1], а партии № 1/3 – ТУ 0761-032-00187852-2015 (табл. 26).

Образцы литейного кокса каждой партии испытывались отдельно в течении 1 часа 10 минут что соответствует транспортированию по железной дороге на расстояние приблизительно в 2100 км.

Значения показателя  $P_T$  (%) определяли при проведении испытаний, соответствующих расстояниям транспортирования 300, 900, 1500 и 2100 км.

Таблица 26 – Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния транспортирования на его разрушение

Обозначение партии	Массовая доля влаги, $W_t^r$ , %	Зольность, $A^d$ , %	Массовая доля серы, $S_t^d$ , %	Прочность, $M_{40}$ , %	Доля кусков менее 40 мм, %	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

Погрешность косвенных измерений показателя разрушения литейного кокса при транспортировании  $P_T$  рассчитывалась в соответствии с МИ 2083-90 [169]. Полученные значения погрешности косвенных измерений показателя разрушения литейного кокса при транспортировании  $P_T$  не превышает 0,014.

В результате испытаний 20 % образцов партии № 1/1 и 40 % 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.

Исследования гранулометрического состава [170] показали, что при транспортировании литейного кокса партий 1/1 и 1/2 происходит снижение содержания класса крупности 80 мм и более: для партии № 1, обладающей меньшей зольностью на 9.2 %, для партии № 2, максимальной зольности, на 9.7 % (табл. 27). Литейный кокс партии № 3 с наибольшим значением показателя прочности  $M_{40}$  характеризуется также более стабильным гранулометрическим составом.

Таблица 27 – Изменение гранулометрического состава литейного кокса в зависимости от расстояния при транспортировании

Партия кокса	Класс крупности, мм	Расстояние транспортирования, км				
		0	300	900	1500	2100
		Гранулометрический состав, %				
1/1	менее 40	0	0	0	1,44	1,41
	40-60	8,11	8,20	8,20	8,12	8,14
	60-80	31,32	40,70	40,71	39,20	39,07
	80 и более	60,57	51,10	51,09	51,24	51,38
1/2	менее 40	0	0,42	0,42	0,43	0,43
	40-60	7,59	7,54	7,52	7,56	7,55
	60-80	29,36	29,41	38,4	38,69	38,70
	80 и более	63,05	62,63	53,66	53,32	53,32
1/3	менее 40	0	0,25	0,25	0,25	0,25
	40-60	11,90	11,87	11,87	11,81	11,78
	60-80	22,59	22,30	22,24	22,18	22,16
	80 и более	65,51	65,58	65,64	65,76	65,81

При транспортировании литейного кокса на расстояние 900 км содержание класса крупности менее 40 мм возрастает на 0,25-1,41 % в зависимости от партии (табл. 27). При этом наибольшее увеличение содержания класса крупности характерно для литейного кокса партии 1/1 с минимальным значением показателя прочности  $M_{40}$  (табл. 26).

При транспортировании литейного кокса на расстояние свыше 900 км содержание класса крупности 60-80 мм для партий 1/1 и 1/2 возрастает на 9,39 % и 9,04 % соответственно. Для партии 1/3 характеризующейся максимальным значением показанием прочности  $M_{40}$  (табл. 26) содержание класса крупности 60-80 мм снизилось всего на 0,35 % (табл. 27).

При транспортировании литейного кокса на расстояния свыше 900 км содержание класса крупности 80 мм и более уменьшается для партий 1 и 2 на 9,48 % и 9,39 % соответственно. Для партии 3 характеризующейся максимальным значением показателя прочности  $M_{40}$  содержание класса крупности 80 мм и более не снизилось.

В среднем по партиям содержание класса крупности 80 мм и более при транспортировании на расстояние 2100 км снизилось на 6,2 %, в то время как содержание классов крупности 60-80 мм и менее 40 мм в среднем выросло на 5,55 % и 0,7 % соответственно (табл. 28).

Таблица 28 – Изменение гранулометрического состава литейного кокса в зависимости от расстояния при транспортировании

Класс крупности, мм	Расстояние транспортирования, км				
	0	300	900	1500	2100
	Гранулометрический состав, %				
менее 40	0	0,22	0,22	0,70	0,70
40-60	9,20	9,20	9,20	9,16	9,16
60-80	27,76	30,80	33,78	33,36	33,31
80 и более	63,04	59,77	56,80	56,77	56,84

Можно говорить о том, что изменение гранулометрического состава литейного кокса в процессе транспортирования связано с показателем прочности  $M_{40}$  литейного кокса: с повышением прочности снижается содержание класса 80 мм и более, а содержание классов 60-80 мм и менее 40 мм наоборот возрастает. При этом изменение гранулометрического состава тем больше, чем меньше значение показателя прочности  $M_{40}$ . Также исследования показали, что для литейного кокса со значением показателя  $M_{40}$  равным 82,6 класс крупности 80 мм и более сохранился полностью.

В свою очередь появление класса крупности 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. 26).

Влияние расстояния транспортирования литейного кокса на величину показателя разрушения  $P_T$  (%) представлены на рисунке 12.

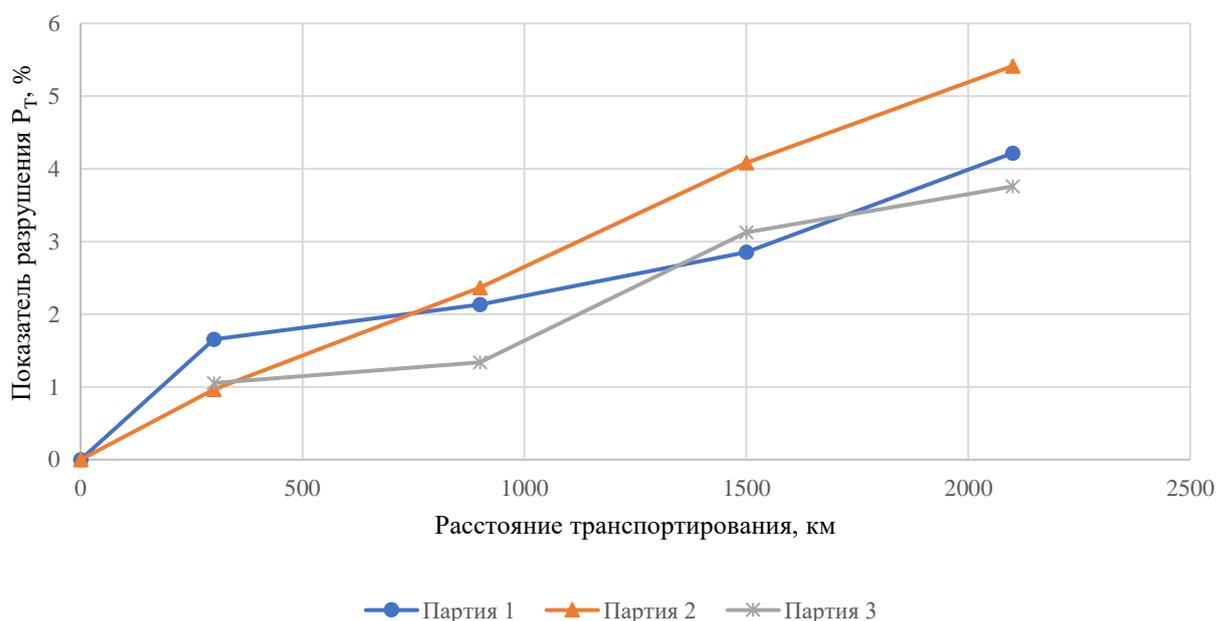


Рисунок 12 – Влияние расстояния транспортирования литейного кокса на показатель разрушения литейного кокса различных партий

Результаты испытаний [171] свидетельствуют о том, что литейный кокс разрушается неодинаково на различных расстояниях транспортирования. Можно говорить о том, что при транспортировании на расстояния свыше 2000 км литейный кокс прочностью 82,6 (партия № 1/3, табл. 26) разрушился меньше всего (рис. 12), о чем также свидетельствуют данные исследования гранулометрического состава (табл. 27).

При транспортировании на расстояния до 300 км наибольшему разрушению подвергся кокс партии № 1/1 с минимальным значением показателя прочности  $M_{40}$

(рис. 12, табл. 26). При увеличении расстояния транспортирования с 900 км до 2500 км показатель разрушения увеличивается для всех партий на 2,08-3,02 %. При транспортировании на расстояния свыше 900 км значение показателя разрушения партии № 1/2, характеризующейся максимальной зольностью (табл. 26), 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, приводящие к разрушению литейного кокса.

Результаты проведенных исследований (рис. 12) [172] свидетельствуют о том, что литейный кокс наибольшей прочности по показателю  $M_{40}$  (партия 1/3, табл. 26) менее устойчив к разрушению при транспортировании на расстояния от 900 до 1500 км. Наименьшей устойчивостью к разрушению при транспортировании отличается кокс партии 1/2, характеризующийся большей влажностью и зольностью. Вероятно, это связано с тем, что включения золы в коксе являются концентраторами внутренних напряжений. Известно ее отрицательное влияние на показатель прочности после реакции с  $CO_2$  [25, 173]. Исследования [96] показали, что на каждый процент снижения зольности кокса показатель CSR возрастает приблизительно на 3,6 %. Также необходимо отметить, что образцы литейного кокса партии 1/2 в процессе испытаний имели большую склонность к раскалыванию, чем образцы других партий (рис. 12).

При транспортировании литейного кокса на расстояния более 900 км и до 1500 км (табл. 29) происходит наиболее интенсивное разрушение образцов партий 1/2 и 1/3 партии (поставщик 2). По сравнению с транспортированием на расстояния от 300 до 900 км для партии 1/2 разрушение увеличилось в 1,2 раза, а для партии 1/3 – в 6,1 раза.

Для партии 1/1 литейного кокса, характеризующегося минимальным значением показателя прочности  $M_{40}$  (табл. 26), наибольшее разрушение наблюдается в первые 300 км (табл. 29). На участке 1500-2100 км интенсивность разрушения для этой партии возрастает с 0,66 % до 1,29 %. В то время как для партии 1/3 с максимальным значением показателя прочности  $M_{40}$  (табл. 26) при

транспортировании на расстояния от 1500 до 2100 км интенсивность разрушения снизилась в 2,8 раза, а для партии 1/2 – в 1,3 раза по сравнению с расстоянием от 900 до 1500 км [174].

Таблица 29 – Разрушение образцов литейного кокса в зависимости от расстояния при транспортировании

Партия кокса	Диапазон расстояний при транспортировании, км			
	0-300	300-900	900-1500	1500-2100
	Значение показателя разрушения образцов, $P_T$ , %			
1/1	1,66	0,45	0,66	1,29
1/2	0,96	1,40	1,72	1,33
1/3	1,05	0,29	1,78	0,64

Для литейного кокса со значением показателя прочности  $M_{40}$  равным 78,40 % и зольностью равной 10,60 % (табл. 26, партия 1/1, поставщик 1) интенсивность разрушения прямо пропорциональна пройденному расстоянию. Кокс с большим значением зольности (11,50 % и 11,10 %, табл. 26, партии 1/2 и 1/3, поставщик 2) характеризуется наибольшим разрушением на участке 900-1500 км. Кокс партии 1/3 с большим значением показателя прочности  $M_{40}$  (82,6 %) разрушается в 1,6 раза меньше по сравнению с коксом партии 1/1 и в 4,8 раза меньше по сравнению с коксом партии 1/2 при транспортировании на расстояние от 300 до 900 км и в 2 раза меньше по сравнению с коксом партий 1/1 и 1/2 при транспортировании на расстояние от 1500 до 2100 км.

Неоднозначность результатов может объясняться различиями свойств кокса, на которые влияет исходная угольная шихта и технология коксования [47, 50] различных коксохимических предприятий. В этой связи на основании данных только сертификатов качества, которые содержат значения показателей качества в соответствии с требованиями ГОСТ 3340-88 невозможно дать точную оценку причин

подобного разрушения литейного кокса при транспортировании, в особенности опираясь на значение показателя прочности  $M_{40}$ .

Следовательно, необходимо учитывать, что при примерно одинаковых значениях показателей качества литейного кокса в сопроводительной документации, характер разрушения литейного кокса в процессе транспортирования изменяется при смене поставщика.

Данная методика внедрена в ПАО «Автодизель» и используется в процессе выбора поставщика литейного кокса (Приложения Б).

#### 4.2 Разработка методики оценки влажности литейного кокса при транспортировании

На стадии поставки потребителю изменяется также содержание влаги в литейном коксе (глава 3, табл. 22) характеризующееся массовой долей общей влаги в рабочем состоянии топлива ( $W_t$ , %). Также показатель массовой доли общей влаги в рабочем состоянии топлива является характеристикой качества литейного кокса в соответствии с ГОСТ 3340-88 и указывается в сертификате качества, выдаваемом производителем на литейный кокс при поставке потребителю.

Метод определения общей влаги литейного кокса установлен в ГОСТ 27588-91 (ИСО 579-81) [21]. Определение массовой доли общей влаги проводят по лабораторной пробе, подготовленной в соответствии с ГОСТ 23083-78 [165]. Пробу литейного кокса отбирают из потока или из железнодорожного вагона методом конверта. Отобранный кокс всех классов крупности измельчают до размера частиц 0-13 мм. Измельчённую пробу высыпают на противень, помещают в предварительно нагретый до 200 °С сушильный шкаф и выдерживают в нем до постоянной массы. Массовую долю общей влаги вычисляют как отношение разницы масс навески кокса до высушивания и после к массе навески кокса до высушивания.

Данная методика определения содержания влаги в литейном коксе не учитывает его крупность, однако влажность литейного кокса различных классов крупности не одинакова [32].

Поскольку в коксохимической промышленности не применяют специальные технологии для производства литейного кокса. Из одного коксового пирога выделяется в зависимости от крупности металлургический (классы 25-40 мм, 40-60 мм) и литейный кокс (классы 40-60 мм, 60-80 мм, 80 мм и более). По длине коксового пирога наблюдается некоторая неоднородность свойств, например, при продвижении от пристеночной к осевой части увеличивается пористость, средний диаметр пор, электросопротивление, реакционная способность, в то время как структурная прочность, предел прочности при механических испытаниях и кажущаяся плотность снижаются [32]. Подобная неоднородность вызвана особенностями процесса коксования, вследствие которых снижается скорость нагрева угольной шихты по мере удаления от стен коксовой камеры. Специфика процесса коксования обуславливает развитие трещиноватости, предопределяющей формирование гранулометрического состава кокса. В кусках классов 60-80 мм и 80 мм и более, как правило, преобладает приосевая часть кокса, а в классах 25-40 мм и 40-60 мм преобладают обломки пристеночных частей кусков [23].

Т.к. в литейном производстве предпочтительным является кокс классов крупности 60-80 мм и 80 мм и более [175], методика оценки влажности литейного кокса на этапе транспортирования должна учитывать отличия крупных классов, обусловленными технологией коксования. В связи с этим разработана новая методика оценки влажности литейного кокса, применяемая для образцов товарной крупности [155].

Сущность метода заключается в просушивании образца литейного кокса при температуре 200 °С до постоянной массы и определении массовой доли общей влаги образцов товарной крупности по формуле

$$W_{\text{т.к.}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $W_{\text{т.к.}}$  – массовая доля влаги образца литейного кокса товарной крупности, %;  $m_1$  – масса образца до высушивания, г;  $m_2$  – масса образца после высушивания, г.

Учитывая, что производительность вагранки выражается через расход кокса на тонну выплавляемого чугуна (кг/т чугуна), важно понимать, какова масса влаги,

загружаемой вместе с коксом. Определение содержания влаги на грамм кокса рассчитывали по формуле:

$$B = \frac{12 \times m_3}{m_1}, \quad (9)$$

где  $B$  – расчетное содержание влаги в грамме топлива, г;  $m_3$  – масса влаги в образце, г;  $m_1$  – масса образца после высушивания, г.

В качестве апробации метода были проведены исследования по определению влияния условий окружающей среды при транспортировании на влажность литейного кокса. Для исследований были отобраны образцы классов крупности 40-60 мм, 60-80 мм, 80 мм и более пяти различных партий (табл. 30).

Таблица 30 – Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния условий окружающей среды на его влажность

Обозначение партии	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

Для имитации условий транспортирования в открытых вагонах в процессе исследования образцы литейного кокса, хранившиеся длительное время в помещении и имевшие минимальную влажность, помещали на открытый воздух под воздействие изменяющейся влажности воздуха, а также осадков. Затем осуществляли измерение массы образцов и влажности воздуха на момент измерения массы, а также фиксировали динамику изменения влажности воздуха за день с использованием данных метеорологической службы. После образцы просушивали в муфельных

печах при температуре 200°C до постоянной массы и рассчитывали массовую долю общей влаги образцов товарной крупности  $W_{т.к.}$  (%) и содержание влаги в грамме топлива В (г).

Таблица 31 – Динамика изменения массовой доли общей влаги литейного кокса

День исследования	Среднее значение массовой доли общей влаги в зависимости от класса крупности, %			Средняя влажность за день, %	День исследования	Среднее значение массовой доли общей влаги в зависимости от класса крупности, %			Средняя влажность за день, %
	40-60 мм	60-80 мм	80 мм и более			40-60 мм	60-80 мм	80 мм и более	
1	0,28	0,31	0,46	56,75	14	4,8	5,15	3,73	68,00
2	0,25	0,34	0,49	53,25	15	2,81	4,23	2,48	60,25
3	0,28	0,37	0,52	49,00	16	3,47	4,59	2,37	75,00
4	0,28	0,37	0,52	53,00	17	5,94	5,26	2,72	74,25
5	0,33	0,45	0,61	55,50	18	9,04	9,06	6,64	92,50
6	1,67	1,56	2,03	58,00	19	8	10,92	8,9	78,25
7	0,42	0,57	0,77	61,50	20	8,16	10,78	8,46	76,00
8	6,01	3,53	4,06	81,25	21	8,57	11,61	9,05	77,25
9	6,68	6,38	5,39	93,25	22	8,85	11,6	8,82	74,50
10	6,95	6,51	5,26	95,25	23	4,53	7,19	4,58	58,25
11	7,42	7,22	6,06	79,50	24	6,85	9,41	8,03	71,00
12	7,09	7,71	6,57	80,75	25	4,1	5,15	4,59	69,00
13	5,84	6,79	5,24	77,00					

Результаты проведенных исследований (табл. 31) свидетельствуют том, что высокая влажность воздуха и выпадение осадков (8-11, 17-20 день исследования)

приводят к повышению массовой доли общей влаги образцов литейного кокса коварной крупности до 10 % и более. Наибольшее влияние влажности окружающего воздуха на влажность литейного кокса наблюдается на образцах класса крупности 60-80 мм (рис. 13-15, табл. 32) [156].

Результаты исследований свидетельствуют о том, что при увеличении влажности воздуха на 40 % (4-9 день исследования, табл. 31, рис. 16), содержание влаги на грамм топлива увеличивается в 11-22 раз в зависимости от класса крупности. Образцы класса 40-60 мм накапливают влагу более значительно. При этом снижение влажности воздуха на 34 % (18-23 день исследования, табл. 31, рис. 16) способствовало уменьшению влаги в коксе лишь в 1,3-2,5 раза. Таким образом, влажность литейного кокса резко возрастает при увеличении влажности окружающей среды, при этом уменьшение содержания влаги в связи со снижением влажности воздуха в литейном коксе происходит значительно медленнее. Наибольшее повышение влажности кокса наблюдались в дни выпадения осадков (8-11 и 17-20 дни исследования) (табл. 31, рис. 16). Наибольшее содержание влаги в грамме топлива в среднем наблюдалось для образцов класса крупности 60-80 мм (табл. 32). Среднее содержание влаги на грамм литейного кокса представлено в таблице 33.

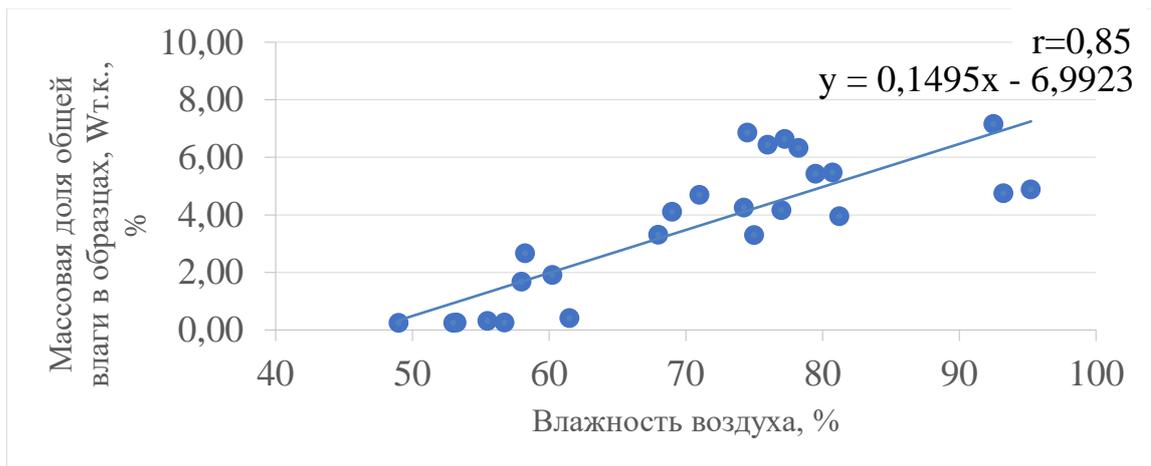


Рисунок 13 – Влияние влажности окружающего воздуха на массовую долю общей влаги в образцах литейного кокса класса крупности 40-60 мм

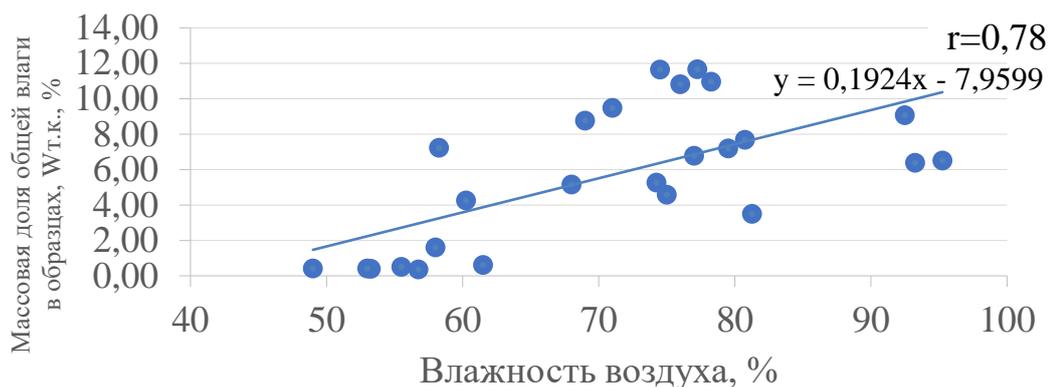


Рисунок 14 – Влияние влажности окружающего воздуха на массовую долю общей влаги в образцах литейного кокса класса крупности 60-80 мм

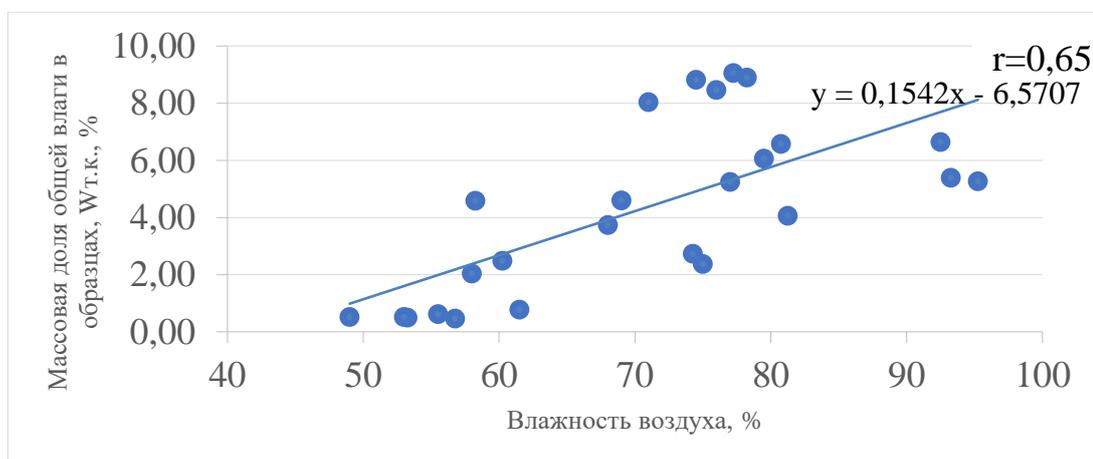


Рисунок 15 – Влияние влажности окружающего воздуха на массовую долю общей влаги в образцах литейного кокса класса крупности 80 мм и более

Таблица 32 – Значение коэффициентов корреляции между показателями влажности образцов кокса ( $W_{т.к.}$ , %;  $B$ , г) и классом крупности

Анализируемые параметры	Класс крупности		
	40-60 мм	60-80 мм	80 мм и более
Массовая доля общей влаги образцов ( $W_{т.к.}$ , %) и средняя влажность за день (%)	0,840	0,655	0,681
Содержание влаги в образцах ( $B$ , г) и средняя влажность за день (%)	0,873	0,639	0,661

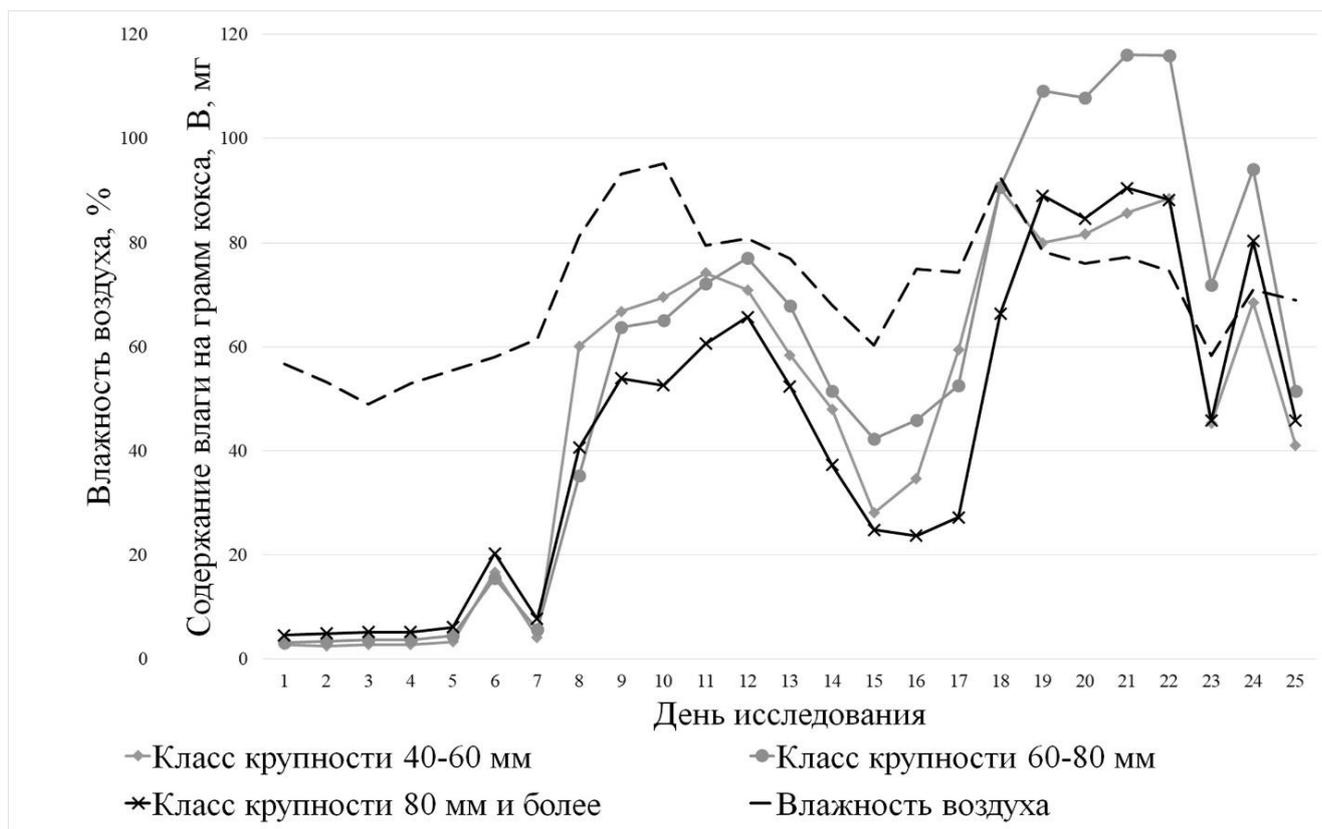


Рисунок 16 – Динамика изменения содержания влаги на грамм топлива в зависимости от влажности воздуха

Таблица 33 – Содержание влаги на грамм литейного кокса в зависимости от класса крупности

Наименование показателя	Расчетное содержание влаги на грамм топлива, г		
	40-60 мм	60-80 мм	80 мм и более
Минимальное значение за период исследования	0,003	0,003	0,005
Максимальное значение за период исследования	0,090	0,116	0,090
Среднее значение за период исследования	0,043±0,012	0,053±0,015	0,043±0,012

## Выводы

1. Показатели прочности  $M_{40}$  (%) и  $M_{10}$  (%) не могут применяться для оценки разрушения литейного кокса в процессе транспортирования, т.к. условия испытаний не соответствуют условиям, в которых находится кокс при поставках по железной дороге.
2. Показатель прочности  $M_{40}$  может применяться для прогноза гранулометрического состава литейного кокса при транспортировании без учета расстояния транспортирования.
3. Предложен метод оценки прочности литейного кокса при его транспортировании на различные расстояния, имитирующий вибрационные воздействия, оказываемые на литейный кокс при перевозке в железнодорожных вагонах.
4. Введен показатель оценки разрушения литейного кокса при транспортировании  $P_T$  (%).
5. Установлено, что разрушение литейного кокса на различных расстояниях не одинаково и зависит в большей степени от исходной угольной шихты и технологии коксования. Так, для партии 1/1 первого поставщика наибольшее разрушение (1,66 %) наблюдалось на этапе транспортирования 0-300 км, а для партий 1/2 и 1/3 второго поставщика наибольшее разрушение (1,71 % и 1,78 % соответственно) наблюдалось на этапе транспортирования 900-1500 км.
6. Показатель массовой доли общей влаги ( $W_t^r$ , %) не позволяет оценить реальную влажность кокса поскольку стандартные испытания определения влажности проводят на лабораторных пробах размером от 0 до 13 мм, что отличается от реальных размеров литейного кокса.
7. Предложен новый метод оценки влажности литейного кокса товарной крупности.
8. Введен показатель массовой доли общей влаги образцов литейного кокса ( $W_{т.к.}$ , %) товарной крупности, отражающий влажность литейного кокса в условиях транспортирования.

9. Установлено, что при транспортировании в открытых вагонах в условиях повышенной влажности окружающей среды фактическая влажность литейного кокса товарной крупности значительно превышает допустимые требованиями ГОСТ 3340-88 значения.
10. Установлено изменение содержание влаги в литейном коксе в зависимости от крупности литейного кокса и погодных условий (влажности окружающего воздуха и наличия осадков).

## ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЛИТЕЙНОГО КОКСА НА СТАДИИ «ПРИМЕНЕНИЕ»

### 5.1 Применение разработанного метода оценки влажности литейного кокса на этапе хранения

После разгрузки на предприятии-потребителе литейный кокс хранится на шихтовом дворе или в бункере. В случае хранения на открытом шихтовом дворе находясь под воздействием внешних факторов, литейный кокс неизбежно изменяет свою влажность, что отражается на процессах розжига вагранки и плавки чугуна.

При оценке влажности литейного кокса на этапе хранения также важно учитывать его крупность, поскольку при хранении и загрузке в вагранку литейный кокс в соответствии с требованиями ГОСТ 3340-88 [1] имеет различную крупность: менее 40 мм, 40-60 мм, 60-80 мм, 80 мм и более.

Представленная в главе 4 методика оценки влажности литейного кокса так же применима на этапе хранения, поскольку условия испытаний соответствуют условиям, в которых находится литейный кокс, а также в методике учитывается крупность литейного кокса.

Разработанный метод оценки влажности литейного кокса позволяет также оценить дополнительные затраты энергии в процессе плавки чугуна в вагранке. Высокая влажность литейного кокса негативно проявляет себя именно на стадии применения, поскольку при высокой влажности окружающего воздуха дополнительно в вагранку при загрузке попадает на каждые 100 кг литейного кокса крупностью 40-60 мм – 8,7 кг влаги; для кокса для крупности 60-80 мм – 12,5 кг, для крупности 80 мм и более – 9,9 кг (глава 4, табл. 32) [157]. Приблизительные энергозатраты ( $Q$ , МДж) на нагрев и испарение такого количества воды, рассчитанные по формуле

$$Q = m \cdot (c \cdot (t_2 - t_1) + r), \text{ Дж} \quad (10)$$

где  $m$  – масса воды, загружаемой с литейным коксом, кг;  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $c=4220$  Дж/кг·°С;  $t_1$  – условная начальная температура воды в литейном коксе,

$t_1=18$  °С;  $t_2$  – требуемая температура воды,  $t_2=100$  °С;  $r$  – удельная теплота парообразования и конденсации воды,  $r=2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг, составят 23,45; 30,23 и 25,80 МДж соответственно для кокса классов крупности 40-60 мм; 60-80 мм и 80 мм и более.

В этой связи необходимо особое внимание уделять условиям хранения литейного кокса. Использование закрытых складов и бункеров позволит сохранить качество литейного кокса по показателям влажности.

## 5.2 Разработка методики оценки прочности литейного кокса на этапе загрузки в вагранку

Как уже говорилось в главе 3, при загрузке в вагранку литейный кокс испытывает различные ударные воздействия. Первый вид ударных воздействий – это воздействия, вызванные падением литейного кокса в шахту вагранки.

Шахта вагранки может иметь цилиндрический, конический и доменный профиль. Двумя ее основными характеристиками являются диаметр и полезная высота. Диаметр вагранки  $D$  влияет на производительность вагранки и его значения находятся в пределах 500-1300 мм.

Расстояние от нижнего ряда фурм до порога загрузочного окна называется полезной высотой вагранки и обозначается буквой  $H$ . Это та часть вагранки, которая будет заполнена шихтой. С одной стороны, увеличение полезной высоты вагранки способствует более эффективному использованию тепла, снижению расхода кокса, необходимого для прогрева столба шихты, и повышению энергоэффективности работы вагранки в целом. Однако, с увеличением параметра  $H$  возрастает также и давление на куски литейного кокса, расположенные в нижней части вагранки, за счет увеличения общей высоты столба шихты, что может привести к их разрушению и, как следствие, снижению дренажной способности [18, 19]. Как правило на практике используется соотношение полезной высоты вагранки  $H$  к ее диаметру  $D$ , которое должно находиться в пределах от 4 до 6. По данным Гипромеца при

диаметре вагранки от 500 до 1300 мм нижний предел полезной высоты составляет от 2,5 до 4 м, а верхний от 3,5 до 6 м. При этом нормальные размеры полезной высоты вагранок лежат в диапазоне от 3 до 5 м [19].

Розжиг вагранки начинается с розжига холостой коксовой колоши. Для этого применяется газ или дрова [18, 19]. При загрузке холостая колоша падает с высоты равной высоте шахты вагранки, что превышает ее полезную высоту. Для холостой колоши отбирают крупный кокс с размером кусков 100-150 мм. Высота холостой колоши – высота столба кокса над уровнем нижнего ряда фурм – имеет определяющее значение для хода процесса плавки, зависит от количества вдуваемого воздуха, его давления и качества кокса. Для крупного кокса нормального качества эта высота находится в пределах 750-1350 мм, что приблизительно составляет от 20 до 35 % от полезной высоты вагранки [19]. По другим данным, эта высота должна быть не менее 1200-1500 мм независимо от высоты вагранки [18].

После розжига кокса холостой колоши приступают к загрузке рабочих колош. В шихту помимо литейного кокса, как правило входят чушковый чугун, чугунный и стальной лом, возврат собственного производства, брикеты стружки, ферросплавы и флюсы. Дальнейшая загрузка шихты рабочей колоши осуществляется слоями с чередованием кокса, металлической части шихты и флюса.

Учитывая, что нормальная рабочая высота вагранки находится в диапазоне от 3 до 5 м, при высоте холостой колоши 1500 мм, первая порция литейного кокса рабочей коксовой колоши падает с высоты 1,5-3,5 м. Таким образом, при загрузке вагранки в зависимости от ее размера максимальная высота падения кокса включает расстояние от фурм до загрузочного окна 1,5—3,5 м, а минимальное – определяется технологией загрузки и составляет не более 1,5 м.

Определение прочности литейного кокса на сбрасывание регламентировано ГОСТ 28946-91 (ИСО 616-77) [159]. Для испытаний отбирают пробу весом не менее 110 кг, крупность кусков кокса должна составлять 50 мм и более, гранулометрический состав определяют аналогично определению

гранулометрического состава всей валовой пробы. Если влажность кокса превышает 5 % его просушивают, поскольку есть различия в дроблении мокрого и сухого кокса. В ящик помещают 25 кг кокса и затем сбрасывают его с высоты 1830 мм на стальную плиту. Операция повторяется 4 раза. После этого кокс просеивают и определяют индексы сбрасывания по выраженной в процентах массе кокса, оставшегося на ситах с определенным размером отверстий, а также средний размер куска. В данном методе испытаний, высота падения кокса вполне соотносится с высотой падения литейного кокса в вагранке.

После загрузки кокса приступают к загрузке металлической части шихты. Рекомендуют следующую последовательность ее загрузки: стальной лом, чушковый чугун, чугунный лом, отходы собственного производства. Чушковый чугун поставляется в виде слитков с одним или двумя пережимами. Их толщина не должна превышать 30 мм, а масса – 20 кг. Размеры стального и чугунного лома не должны превышать 300x200x150 мм, при массе от 0,5 до 40 кг. Брикетты стружки могут доходить по массе до 20 кг [18].

При подготовке шихты чушки чугуна делят таким образом, чтобы размер каждой части не превышал  $1/3$  от диаметра вагранки. Такие же требования относятся к стальному и чугунному лому [18, 19]. Размеры кусков шихты, надежно сходящих с питателя, не должны превышать 300-350 мм при массе не более 40 кг [37]. Особое внимание должно обращать на то, чтобы масса отдельных частей не превышала 10-15 кг. Ферросплавы дробятся до кусков массой от 3 до 5 кг. Флюсы делят на небольшие куски размером около 50 мм [18, 19].

На протяжении всей плавки шахта вагранки должна быть заполнена до уровня загрузочного окна, однако на практике это условие соблюдается не всегда.

Зона, расположенная под завалочным окном на расстоянии 0,8-1,2 метра (так называемая загрузочная воронка) подвергается разрушению под действием загружаемой шихты. По этой причине ее выкладывают чугунными пустотелыми кирпичами и ее диаметр как правило немного меньше диаметра шахты вагранки [18, 19]. Это, а также данные, полученные с предприятий литейного производства, свидетельствуют, что при стабильной работе вагранки высота столба шихты

находится на некотором расстоянии от загрузочного окна. И это расстояние может достигать до 1,2 м.

Соответственно при загрузке металлической части шихты в вагранку на литейный кокс оказываются ударные воздействия, вызванные падением отдельных кусков, масса которых находится в диапазоне от 3 до 40 кг, с высоты до 1,2 м. Данные воздействия могут приводить к разрушению литейного кокса, изменению его гранулометрического состава и, как следствие, к ухудшению дренажной способности. Однако, на данный момент не существует метода испытаний, воспроизводящего подобные ударные воздействия.

С целью имитации условий, в которых находится литейный кокс в процессе загрузки металлической части шихты в вагранку, а также исследования его разрушения и изменения гранулометрического состава при падении на него отдельных частей металлической шихты, была разработана экспериментальная установка и метод испытаний.

Разработанная установка состоит из 3 узлов (рис. 17): узла крепления образца кокса, узла перемещения груза и узла закрепления груза.

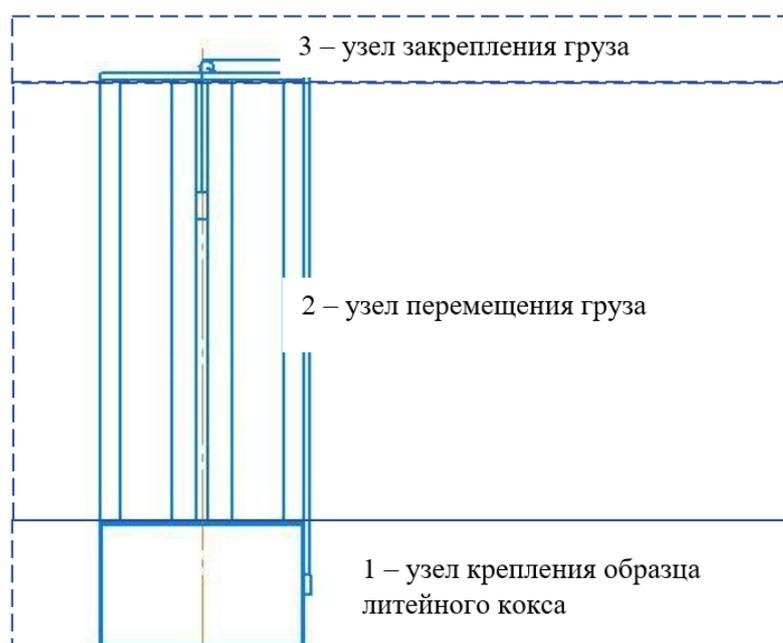


Рисунок 17 – Устройство испытательной установки для оценки прочности литейного кокса в процессе загрузки в вагранку металлической части шихты

Узел 1 состоит из прямоугольной рамы, размерами 300x500x500 мм. С трех сторон рама закрыта экранами в целях безопасности, что так же препятствует вылету мелких кусков литейного кокса, образовавшихся в результате удара. Внутри рамы помещается стальной ящик с размерами 300x300x300 мм. Размеры ящика выбраны таким образом, чтобы внутри было возможно закрепить как небольшие куски литейного кокса (40-60 мм), так и крупные, размер которых может превышать 150 мм. Внутри ящика предусмотрен крепежный механизм, с четырех сторон жестко закрепляющий образец литейного кокса (рис. 18). Данное крепление имитирует неподвижное положение одного куска в насыпной массе литейного кокса.

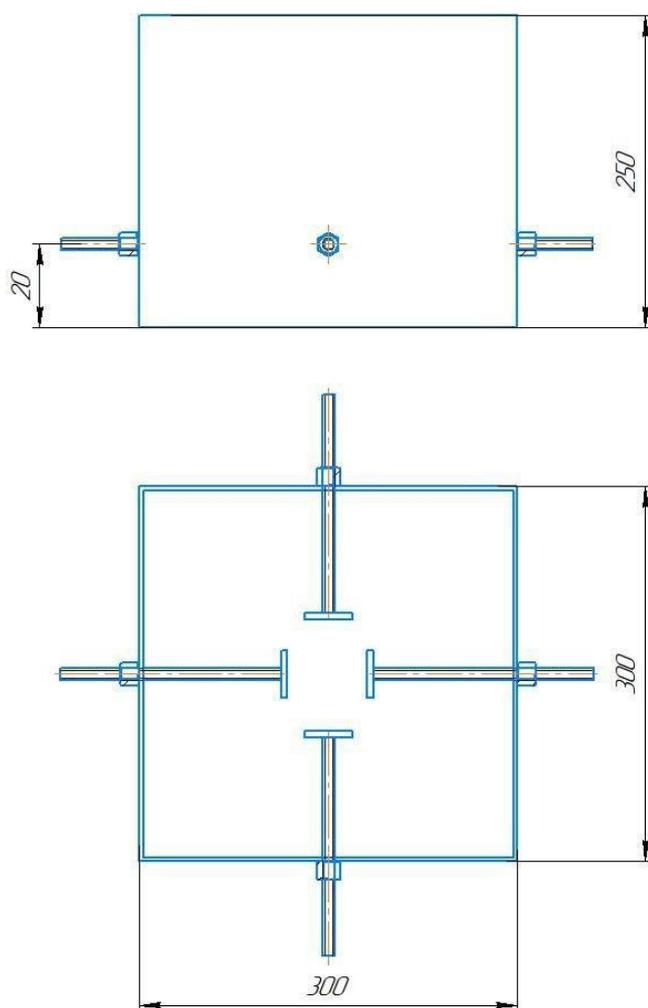


Рисунок 18 – Эскиз ящика с системой крепления литейного кокса

Узел 2 представляет собой стальную трубу с внутренним диаметром 150 мм, закреплённую на раме с помощью двух стальных листов. Высота трубы составляет 2 м, выбрана она таким образом, чтобы иметь возможность регулировать высоту

падения груза, поскольку при загрузке в вагранку возможно отличие высоты падения металлической части шихты от установленных технологией значений. По всей длине трубы сделан вырез шириной 30 мм, позволяющий устанавливать высоту падения груза. Листы, соединяющие трубу в верхней и нижней части имеют отверстия, совпадающие с диаметром трубы, что позволяет грузу беспрепятственно перемещаться при входе и выходе из трубы.

Узел 3 представляет собой шестеренчатую лебедку с металлическим тросом длиной 5 м и диаметром 3 мм. Лебедка закрепляется на высоте 1,4 м от уровня пола, так, чтобы при использовании не вызывать затруднений у оператора. Трос лебедки через систему блоков подведен к отверстию трубы в верхней ее части. На конце троса располагается крепежный механизм, предназначенный для удержания грузов (рис. 19). Грузы представляют собой стальные цилиндры диаметром 145 мм, высотой 40 см. Шесть грузов, каждый из них массой по 5 кг, набираются на стальной стержень, что позволяет изменять суммарную массу падающего груза в диапазоне от 5 до 30 кг. Система открывания крепежного механизма подведена к лебедке для удобства сбрасывания груза.

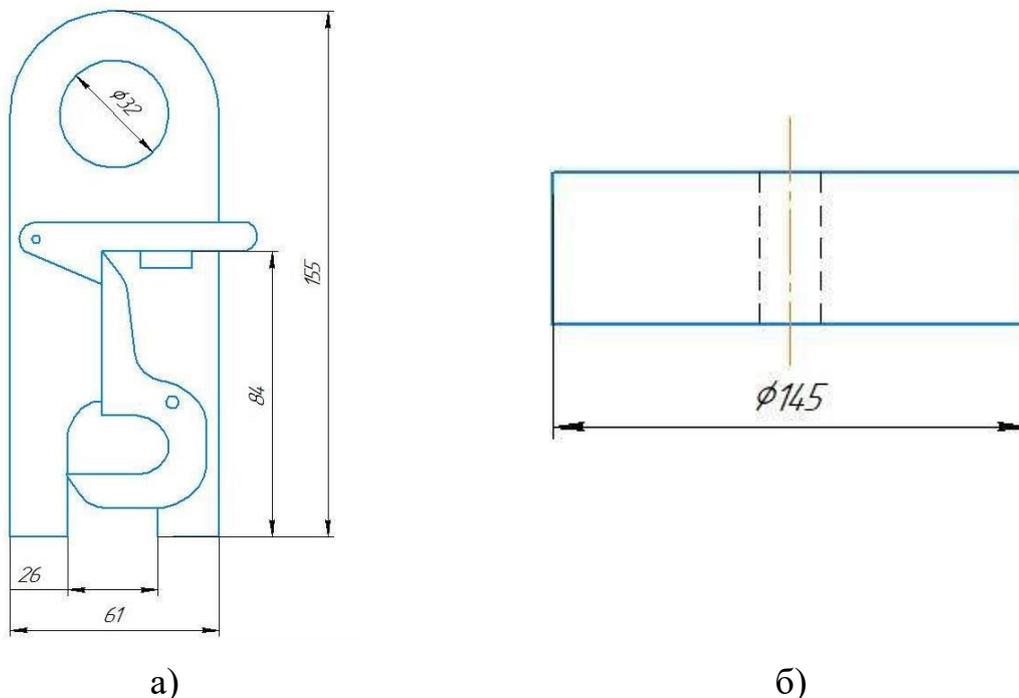


Рисунок 19 – Эскизы элементов установки а) крепежный механизм; б) груз.

Габаритные размеры установки показаны на рисунке 20.

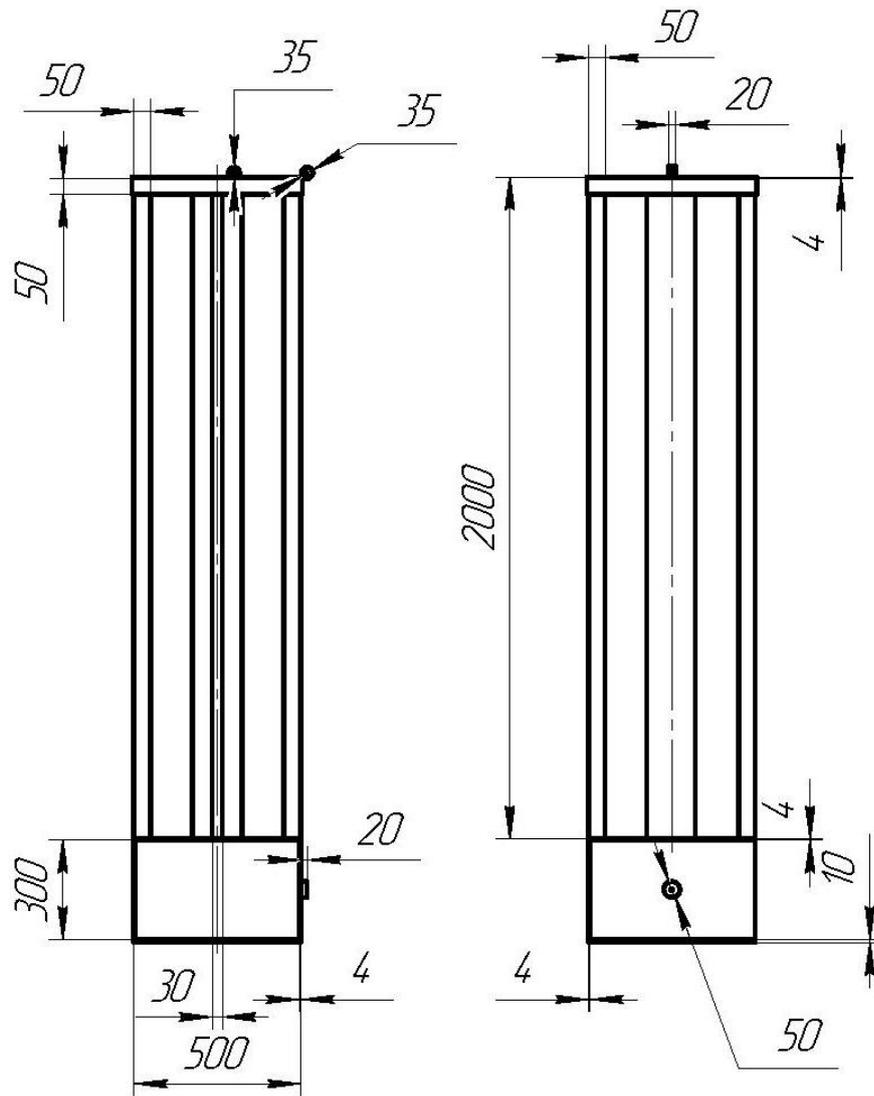


Рисунок 20 – Габаритные размеры установки

В качестве материала для изготовления установки была выбрана сталь марки 20.

Среди достоинств данного материала нужно выделить: легкость механической обработки; высокая износостойкость по сравнению с другими конструкционными материалами; хорошая свариваемость; доступность и приемлемая цена.

Перечисленные достоинства, а особенно высокая свариваемость, что позволит достаточно быстро осуществить монтаж, существенно перекрывают недостатки данного материала, в числе которых низкая стойкость к коррозии и достаточно большой вес итоговой конструкции.

Разработанная экспериментальная установка монтировалась на специально подготовленном фундаменте, задачей которого была амортизация ударных воздействий.

Для монтажа конструкции использовалась ручная электродуговая сварка. Технология ручной электродуговой сварки позволяет получать качественные сварные соединения при возможности работы в любом пространственном положении. Поскольку свариваемость различных марок стали различается, при конструировании установки были выбраны стали I группы свариваемости. Технология сварки сталей I группы не требует дополнительного подогрева, предусматривает широкий диапазон режимов сварки независимо от толщины металла, жёсткости конструкций, температуры окружающей среды. Одной из самых доступных сталей I группы является Сталь 10.

Изготовление конструкций в данном случае может проводиться ручной электродуговой сваркой с использованием электродов с различными покрытиями (основным, рутиловым) в качестве электродов могут использоваться такие как: УОНИ13\55 МР\ЗМ. Учитывая сварочно-технологические свойства электродов и предполагаемые эксплуатационные свойства конструкции наиболее целесообразно использовать электроды марки УОНИ13\55.

Для определения прочности литейного кокса и изменения его гранулометрического состава при загрузке в вагранку металлической части шихты был разработан метод испытаний, заключающийся в сбрасывании на неподвижно закрепленный образец литейного кокса груза массой от 5 до 30 кг с высоты от 400 до 1600 мм. Массу образца определяют до и после испытаний, а также гранулометрический состав. Для оценки прочности литейного кокса при загрузке в вагранку был введен показатель  $P_p$ , который определяется по формуле (%)

$$P_p = \frac{(m_1 - m_2) - m_3}{m_1 - m_3} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $P_p$  – показатель разрушения литейного кокса при загрузке вагранки, %;

$m_1$  – контейнера с образцом до испытаний, г;

$m_2$  – контейнера с образцом испытаний, г;

$m_3$  – масса контейнера, г.

Гранулометрический состав определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 5954.1-91, для отсева используются шаблоны (рис. 21).

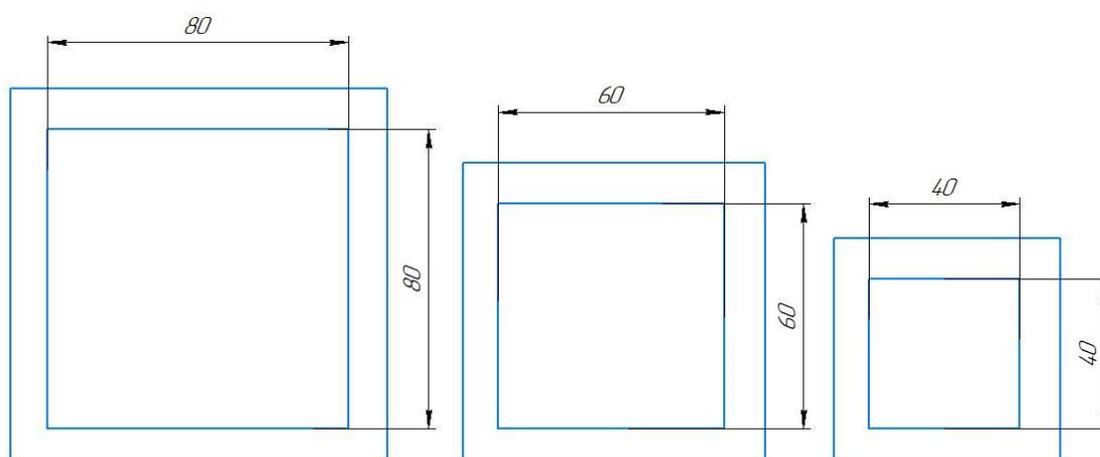


Рисунок 21 – Шаблоны для определения гранулометрического состава литейного кокса

Погрешность измерения показателя прочности  $P_p$  рассчитывается в соответствии с МИ 2083-90 [169]. Точность определения гранулометрического состава обеспечивается соблюдением методики, установленной в ГОСТ 5954.1-91 [14].

При выполнении испытаний применяют средства измерений и вспомогательные устройства, приведенные в таблице 34.

Таблица 34 – Средства измерений, испытаний и вспомогательные устройства

Наименование средств измерений и вспомогательных устройств	Обозначение нормативных документов	Метрологические, технические характеристики
Разработанная экспериментальная установка		Высота падения груза от 0,4 до 1,6 м Масса груза от 5 до 30 кг Габаритные размеры (рисунок 18)

Таблица 34 (окончание)

Наименование средств измерений и вспомогательных устройств	Обозначение нормативных документов	Метрологические, технические характеристики
Весы	ГОСТ 24104-2001 [176]	Цена деления 0,01г Предел измерений 0,2-62 кг
Шаблоны с отверстиями квадратного сечения 40x40, 60x60, 80x80	-	Рисунок 19
Рулетка	ГОСТ 7502-98 [177]	Цена деления 1 мм Предел измерений 3 м
Контейнер	-	-

Для обеспечения безопасности при проведении испытаний необходимо:

- руководителю работ ознакомить персонал, участвующий в испытаниях, с порядком проведения работ и с мероприятиями по безопасному их проведению;
- оградить и обозначить соответствующими знаками зону испытаний;
- проверить отсутствие внутри и снаружи оборудования посторонних предметов;
- определить места и условия безопасного пребывания лиц, занятых испытанием;
- обеспечить персонал, участвующий в испытаниях, средствами индивидуальной защиты (каска, защитные очки)
- обеспечить освещенность рабочих мест не менее 50 лк;
- определить лиц, ответственных за выполнение мероприятий по обеспечению безопасности.

При выполнении необходимо обеспечить следующие условия окружающей среды:

- 1) температура окружающего воздуха от 15 °С до 30 °С;
- 2) максимальная относительная влажность 80 % для температур до 30 °С;
- 3) степень загрязнения минимальная.

При подготовке к выполнению измерений проводят отбор проб. Методика отбора проб представлена в ГОСТ 23083-78 [165]. От каждой партии отбирали по

пять образцов классов крупности: 40-60 мм, 60-80 мм и 80 мм и более. Данные сертификатов качества заносятся в таблицу 35.

Таблица 35 – Данные сертификатов качества литейного кокса

Обозначение партии	Массовая доля влаги, $W_t^r$ , %	Зольность, $A^d$ , %	Массовая доля серы, $S_t^d$ , %	Прочность, $M_{40}$ , %	Доля кусков менее 40 мм, %	в том числе менее 40 мм, %

Образец литейного кокса помещается в контейнер и взвешивается. Затем образец переносят в ящик 4 и жестко закрепляется. Ящик помещают внутрь установки. В трубе 3 с помощью лебедки 2 подвешивают груз 1 требуемой массы на установленной высоте (рис. 22). Требуемую массу груза и высоту подвеса устанавливают в соответствии таблицей 36. С помощью крепежного механизма груз отсоединяется и падает на образец литейного кокса.

С помощью лебедки 2 груз поднимают из ящика 4 и ящик вынимается. Содержимое ящика извлекают в контейнер и взвешивают, после чего сортируют с помощью шаблонов по классам крупности: менее 40 мм, 40-60 мм, 60-80 мм и 80 мм и более.

Результаты испытаний заносят в таблицу 36. Гранулометрический состав определяют по ГОСТ 5954.1-91 [14]. Результаты заносят в таблицу 37.

Далее рассчитывают показатель прочности  $P_r$  по формуле (11). Результаты заносят в таблицу 38.



Таблица 338

Высота падения груза $h =$ _____ мм						
Масса груза $m =$ _____ кг						
Класс крупности до испытаний, мм	№ Партии	Значение показателя прочности $P_p$ , %	Класс крупности, мм			
			Менее 40	40-60	60-80	80 и более
			Содержание класса крупности, %			

В качестве апробации разработанного метода была проведена серия предварительных испытаний при высоте падения груза 400 мм. Испытывались образцы 2 партий (табл. 39) классов крупности 60-80 мм и 80 мм и более. Результаты испытаний представлены в таблицах 35-36.

Таблица 39 – Данные сертификатов качества испытываемых образцов

Обозначение партии	Массовая доля влаги, $W_t^r$ , %	Зольность, $A^d$ , %	Массовая доля серы, $S_t^d$ , %	Прочность, $M_{40}$ , %	Доля кусков менее 40 мм, %	в том числе менее 40 мм, %	Выход летучих веществ $V^{daf}$ , %
1	0,6	10,5	0,47	75,0	4,5	8,5	-
2	5,0	10,3	0,65	76,6	5,3	-	0,3

Таблица 40 – Результаты пробной серии испытаний при массе груза 10 кг и высоте падения 400 мм

Класс крупности до испытаний, мм	№ Партии	Значение показателя прочности $P_p$ , %	Класс крупности, мм			
			Менее 40	40-60	60-80	80 и более
			Содержание класса крупности, %			
60-80	1	0,16	0	20,8	62,8	
	2	0,38	22,2	62,1	0	
80 и более	1	0,092	0	9,4	0	86,2
	2	0,13	0	7,8	29,8	49,5

Таблица 41 – Результаты пробной серии испытаний при массе груза 20 кг высоте падения 400 мм

Класс крупности до испытаний, мм	№ Партии	Значение показателя прочности $P_p$ , %	Класс крупности, мм			
			Менее 40	40-60	60-80	80 и более
			Содержание класса крупности, %			
60-80	1	0,32	14,7	67,6	0	
	2	0,32	18,5	0	68,0	
80 и более	1	0,02	0	0	21,8	76,3
	2	0,16	18,7	36,9	55,1	47,7

Полученные результаты свидетельствуют о том, что литейный кокс различных партий разрушается неодинаково. Степень разрушения литейного кокса партии 1 в среднем приблизительно в 3 раза меньше степени разрушения литейного кокса партии 2.

Для литейного кокса второй партии наблюдается более значительное изменение гранулометрического состава, более характерно образование класса крупности менее 40 мм (до 18,7 %). По сравнению с коксом партии 1 содержание класса крупности 80 мм и более меньше на 36,7 % при массе груза 10 кг, и на 28,6 % при массе груза 20 кг. Полученные данные необходимо учитывать при подготовке металлической шихты в случае смены поставщика и как следствие изменения прочностных свойств литейного кокса.

Разработанная испытательная установка и предлагаемый метод испытаний позволяет изучить механизмы разрушения крупного литейного кокса, прогнозировать изменение степени разрушения в зависимости от смены поставщика, а также прогнозировать возможное изменение гранулометрического состава в зависимости от массы отдельных частей загружаемой в вагранку металлической шихты.

## Выводы

1. Установлено, что в случае хранения литейного кокса на открытом воздухе на каждые 100 кг кокса класса крупности 40-60 мм, 60-80 мм и 80 мм и более в вагранку попадает до 8,7, 12,5 и 9,9 кг влаги соответственно, что значительно превышает нормированные значения.
2. При загрузке в вагранку хранившегося на открытом воздухе литейного кокса, требуются дополнительные затраты тепла на испарение влаги, которые составляют на каждые 100 кг кокса крупностью 40-60 мм, 60-80 мм и 80 мм 23,45; 30,23 и 25,80 МДж соответственно, что снижает энергоэффективность плавки.
3. Разработан метод испытаний для оценки прочности литейного кокса в процессе загрузки вагранки, имитирующий ударные воздействия, оказываемые на литейный кокс в процессе загрузки в вагранку металлической части шихты.
4. Разработана экспериментальная испытательная установка, позволяющая проводить испытания по оценке прочности литейного кокса в процессе загрузки в вагранку. Конструкция установки предусматривает изменение режимов испытаний, а именно изменение высоты падения груза в пределах от 0,4 до 1,6 м и массы груза в пределах от 5 до 30 кг.
5. Установлено, что степень разрушения литейного кокса в процессе загрузки в вагранку металлической части шихты не одинакова для кокса различных поставщиков и может отличаться от 1,5 до 8 раз.
6. Установлено неравномерное изменение гранулометрического состава кокса разных поставщиков при одинаковых условиях испытаний. Различия в содержании кокса класса крупности 80 мм и более могут достигать 36,7 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана система классификации и проведена работа по классификации свойств литейного кокса по признаку «Природа проявления свойств», на основе которой введены два новых свойства литейного кокса «Способность к изменению химического состава чугуна», «Способность к поддержанию температуры плавки», а также систематизированы параметры, характеризующие свойства литейного кокса.

2. На основе построенного ЖЦ литейного кокса разработана информационная модель изменения характеристик качества литейного кокса на стадиях ЖЦ. В результате установлено, что формирование свойств литейного кокса начинается на стадии «Закупки» и заканчивается на этапе «Сортировка» стадии «Производство», а с этапа «Хранение» стадии «Производство» свойства литейного кокса изменяются.

4. Разработан подход к оценке качества литейного кокса на этапах ЖЦ, результатом которого является методика оценки уровня качества, основанная на выборе показателей и методов испытаний для оценки характеристик качества с учетом условий процессов ЖЦ.

3. Разработан метод оценки изменения прочности литейного кокса при его транспортировании в зависимости от расстояния. Введен показатель оценки разрушения литейного кокса при транспортировании  $P_T$ , позволивший установить, что содержание класса крупности 80 мм и более при транспортировании на расстояние 2100 км снижается в среднем на 6,2 %, а классов крупности 60-80 мм и менее 40 мм в среднем увеличивается на 5,6 % и 0,7 % соответственно.

4. Разработан метод оценки изменения влажности литейного кокса товарной крупности на этапах «Транспортирование» и «Хранение». Введен показатель, оценивающий влажность литейного кокса товарной крупности при транспортировании и хранении  $W_{т.к.}$ . Установлено, что при транспортировании в железнодорожных вагонах и хранении на шихтовом дворе в условиях повышенной влажности окружающей среды фактическая влажность литейного кокса товарной крупности значительно превышает допустимые значения по ГОСТ 3340-88 и может достигать 10 % и более. При увеличении влажности воздуха на 40 % массовая доля

общей влаги образцов увеличивается в 11-22 раза в зависимости от класса крупности. Литейный кокс класса 60-80 мм накапливает влагу более значительно.

5. Разработана испытательная установка и метод оценки прочности литейного кокса в процессе загрузки вагранки и плавки чугуна. Сущность метода заключается в падении на образцы литейного кокса грузов массой от 5 до 30 кг с высоты от 0,4 до 1,6 м. Введен показатель «Разрушение литейного кокса при загрузке вагранки составляющими металлической части шихты  $P_3$ ».

Практическая ценность работы подтверждена актами внедрения и принятия к использованию результатов исследований в ПАО «Автодизель» (ЯМЗ) (Приложение Б), а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» при подготовке обучающихся по направлениям 27.03.01, 27.04.01 – Стандартизация и метрология, 22.03.01, 22.04.01 – Материаловедение и технология материалов (уровень бакалавриата и магистратуры) (Приложение А).

Перспективными направлениями развития исследований в области качества литейного кокса являются:

- 1) развитие теории жизненного цикла характеристик качества продукции;
- 2) исследование особенностей строения и свойств, а также разработка методов оценки литейного кокса класса крупности 80 мм и более.
- 3) разработка метрологического обеспечения испытаний литейного кокса в условиях, соответствующих условиям процессов жизненного цикла;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 3340-88. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 4 с. 1–4 с.
2. ТУ 0761-027-00187852-10. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. – 2010. – 13 с.
3. ТУ 0761-028-00187852-10. Кокс литейный каменноугольный производства ОАО «Москокс». Технические условия. – 2010. – 13 с.
4. ТУ 0761-250-00190437-2014» Кокс литейный каменноугольный класса крупности 80 мм и более ОАО «Кокс». Технические условия. – 2014. – 13 с.
5. Иванова, В.А. Установление требований к качеству литейного кокса с применением методов стандартизации / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Материалы III Международной научной конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2017». – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2017. – С. 97-103.
6. Иванова, В.А. Разработка методологических основ оценки качества литейного кокса: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.23 / Иванова Валерия Анатольевна. – Магнитогорск, 2018. – 300 с.
7. ГОСТ 32465-2013 (ISO 19579:2006) Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии (с Поправкой). – М.: Стандартинформ, 2019. – 6 с.
8. ГОСТ 8606-2015 (ISO 334:2013) Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка (с Поправкой). – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.
9. ГОСТ 2059-95 (ИСО 351-96) Топливо твердое минеральное. Метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре (с Изменением N 1). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 37 с.
10. ГОСТ 30404-2013 (ISO 157:1996) Топливо твердое минеральное. Определение форм серы. – М.: Стандартинформ, 2014. – 15 с.
11. ГОСТ 32248-2013. Кокс каменноугольный с размером кусков 20 мм и более. Определение прочности после реакции с двуокисью углерода. – М.: Стандартинформ, 2014. – 18 с.

12. ГОСТ Р 54250-2010 (ИСО 18894:2006). Кокс. Определение реакционной способности (CRI) и прочности кокса после реакции (CRS). – М.: Стандартинформ, 2019. – 14 с.
13. ГОСТ 10089-89 (СТ СЭВ 6161-88). Кокс каменноугольный. Метод определения реакционной способности. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 12 с.
14. ГОСТ 5954.1-91. Кокс. Ситовый анализ класса крупности 20 мм и более. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 11 с.
15. ГОСТ 9434-75 Кокс каменноугольный. Классификация по размеру кусков (с Изменениями N 1, 2). – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 1 с.
16. ГОСТ 5953-93 (ИСО 556-80) Кокс с размером кусков 20 мм и более. Определение механической прочности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 12 с.
17. ГОСТ 9521-74 Угли каменные. Метод определения коксующести (с Изменением N 1). – М.: Издательство стандартов, 1976. – 14 с.
18. Ваграночный процесс плавки чугуна: учебное пособие / В.И. Матюхин, В.В. Мадисон, В.Б. Польш, С.В. Брусницын, И.А. Вайс. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет-УПИ», 2003. – 158 с.
19. Липницкий, А.М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов / А.М. Липницкий. – Ленинград: Машиностроение. 1973. – 192 с. .
20. ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности (Издание с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2019. – 29 с.
21. ГОСТ 27588-91 (ИСО 579-81). Кокс каменноугольный. Метод определения общей влаги. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 6 с.
22. Иванова, В.А. Качество литейного кокса: монография / В.А. Иванова. – Ярославль: изд-во ЯГТУ, 2014. – С.147.
23. Иванова, В.А. О методах оценки качества литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Кокс и химия. – 2014. – № 6. – С. 28-33.
24. Иванова, В. А. Об актуализации межгосударственного стандарта ГОСТ 3340-88 «Кокс литейный. Технические условия» / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О.

Побегалова) // Труды Международной научно-практической конференции «Наука и образование - ведущие факторы Стратегии «Казахстан – 2050» (Сагиновские чтения № 5), 20-21 июня 2013 г. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2013. – Часть 1. – С. 208-210.

25. Пинчук, С.И. Системный анализ природы качества доменного кокса / С.И. Пинчук // Кокс и химия. – 2001. – № 8. – С. 12-18.

26. Дороганов, В. С. Методы статистического анализа и нейросетевые технологии для прогнозирования показателей качества металлургического кокса / В. С. Дороганов, А. Г. Пимонов // Вестник кемеровского государственного университета. – Кемерово: КГУ, 2014. – С. 123-129.

27. Оценка угольного сырья, его влияние на качество кокса и ход доменной плавки / Д.А. Завалишин, Л.Д. Никитин, Л.С. Белая, Г.Р. Гайниева // Черная металлургия: Бюл. НТ и ЭИ. – 2010. – №1. – С. 18-24.

28. Гагарин, С.Г. О формировании реактивности доменного кокса: новые аспекты / С.Г. Гагарин // Кокс и химия. – 2013. – №2. – С.16-24.

29. Щукин, П. А. Исследование свойств металлургического кокса / П. А. Щукин. – М.: Металлургия, 1971. - 184 с.

30. Лейбович, Р.Е. Технология коксохимического производства / Р. Е. Лейбович, Е.И. Яковлева, А.Б. Филатов. – М.: Металлургия, 1982. – 359 с.

31. Равич, М.Б. Металлургическое топливо: справочник / М.Б. Равич. – М.: Металлургия, 1965. – 653 с.

32. Мучник, Д.А. Возможности улучшения качества кокса вне печной камеры / Д.А. Мучник, В.И. Бабанин. – М.: Инфра-инженерия, 2014. – 368 с.

33. Сысков К.И. Теоретические основы оценки и улучшения качества доменного кокса / К.И. Сысков. – М.: Металлургия, 1984. – 184 с.

34. Выход кокса в зависимости от свойств шихты и конечной температуры коксования / В.Н. Рубчевский, Ю.А. Чернышов, А.В. Подлубный, Ю.С. Васильев, И.В. Шульга, А.Л. Фидчунов // Кокс и химия. – 2014. – №4. – С. 29-32.

35. Модель оптимизации привоза и потреблений угольного сырья в ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / А.Е. Степанова, А.В. Липатников, Е.Н. Степанов, Д.А. Шнайдер // Материалы III Международной научной

конференции «Научно-технический прогресс в черной металлургии», Череповец, 19-20 октября 2017 г. – Череповец: ЧГУ, 2017. – С. 240-247.

36. Проблемы оптимизации состава угольной шихты / В.П. Лялюк, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова, Е.О. Шмельцер // Кокс и химия. – 2014. – № 1. – С. 22-28.

37. Чернышов, Е.А. Плавились печи литейных цехов. Часть 1. Вагранка: учеб. пособие / Е.А. Чернышов. – Н.Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – 196 с.

38. Страхов, В.М. Совершенствование технологии производства литейного кокса и создание специальных видов углеродистых материалов в ОАО «Кокс» (Ретроспектива) / В.М. Страхов, В.С. Швед // Кокс и химия. – 2014. – №2. – С. 20-25. // Кокс и химия.

39. Иванова, В.А. Методы оценки качества литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Труды 10-й Международной научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра». – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – С. 93-103.

40. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2019. – 48 с.

41. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009. – 21 с. 21-undefined с.

42. Иванов, Е.Б. Технология производства кокса / Е. Б. Иванов, Д. А. Мучник. – Киев: Вища школа, 1976. – 232 с.

43. Улановский, М.Л. К упорядочению терминов в угле- и коксохимии / М.Л. Улановский // Кокс и химия. – 2014. – №8. – С. 17-20.

44. Глузман, Л.Д. Лабораторный контроль коксохимического производства / Л.Д. Глузман, И.И. Эдельман. – М.: Металлургия, 1968. – 472 с. .

45. Иванова, В.А. Оптимизация показателей качества литейного кокса на основе стандартизации / В.А. Иванова, К.Н. Вдовин, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Стандарты и качество. – 2017. – №2. – С. 40-46.

46. Выбор потребительских свойств металлургического кокса для обеспечения эффективности ваграночной плавки / В.И. Матюхин, В.Б. Бабанин, М.В. Зорин, С.Г. Стахеев, А.В. Матюхина // Кокс и химия. – 2015. – № 3. – С. 20-25.

47. Агроскин, А.А. Химия и технология угля / А.А. Агроскин. – М.: Изд-во «Недра», 1969. – 240 с.
48. Луазон, Р. Кокс / Луазон Р., Фош П., Буайе А. – М.: Metallurgia, 1975. – 520 с.
49. ГОСТ 27313-2015. Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. – М.: Стандартинформ, 2019. – 19 с.
50. Глущенко, И.М. Теоретические основы технологии горючих ископаемых: Учебник для вузов / И.М. Глущенко. – М.: Metallurgia, 1990. – 296 с.
51. Мирошниченко, Д.В. Влияние технологических факторов подготовки и коксования углей на реакционную способность кокса / Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. – 2009. – №2. – С. 37-42.
52. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 23 с.
53. ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2018. – 7 с.
54. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
55. Костенко, Н.А. Анализ требований к структуре жизненного цикла / Н.А. Костенко, Е.О. Побегалова // LXXII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2019. – Часть 2. – С. 473-475.
56. Корниенко, И.Л. Нейросетевая информационная система для определения состава угольного концентрата / И.Л. Корниенко, В.С. Дороганов, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 6. – С. 108-113.
57. Опыт ОАО «Москокс» по оптимизации состава угольных шихт / Н.С. Чеглакова, Е.Е. Соколовская, С.А. Эпштейн, Л.И. Савченко, О.С. Белякова // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 9. – С. 281-286.

58. Смирнов, А.Н. Анализ принципов построения математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса М25 и М10 с целью классификации и разработки концепции «гибридной модели» / А.Н. Смирнов, В.Н. Петухов, Д.И. Алексеев // Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 13–18. .

59. Прогнозирование «горячей» прочности кокса CSR на основе марочного состава шихты / А.В. Бондаренко, В.А. Ложкарева, К.С. Боровских, В.Н. Десятникова, А.В. Шиляков // V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16 сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 3-х томах. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2016. – С.131-133. .

60. ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 12 с.

61. Иванова, В.А. О жизненном цикле продукции и его влиянии на свойства литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Побегалова // Управление качеством в образовании и промышленности: сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. 16 – 17 мая 2019 г., г. Севастополь / ответственный редактор Белая М.Н. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2019. – С. 79-84.

62. Побегалова, Е.О. Разработка жизненного цикла литейного кокса / Е.О. Побегалова, В.А. Иванова, Н.А. Костенко // Литейщик России. – 2020. – № 12. – С. 13-17.

63. ГОСТ 1.1-2002. Межгосударственная система стандартизации (МГСС). Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 30 с. .

64. Таранов, В.А. Систематизация прочностных свойств руды для обоснования рациональных параметров процесса измельчения / В.А. Таранов, Н.В. Николаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №51-4. – С. 254-262. .

65. ПР 50.1.024-2005. Основные положения и порядок проведения работ по разработке, ведению и применению общероссийских классификаторов. – М.: Стандартиформ, 2006. – 35 с.

66. Иванова, В.А. О взаимосвязи свойств и структуры литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Научно-технический прогресс в черной металлургии. Материалы международной научно-практической конференции 7-9 октября 2015 года / отв. редактор А.Л. Кузьминов. – Череповец: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет», 2015. – С. 95-97.

67. Иванова, В.А. Классификация свойств литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Избранные научные труды Международной научно-практической конференции «Управление качеством», 10-11 марта 2016 г. – М.: ПРОБЕЛ-2000, МАИ, 2016. – С. 169-172.

68. Иванова, В.А. Зависимость влажности литейного кокса от его свойств и влажности окружающей среды / В.А. Иванова, Е.О. Шамина. // Черные металлы. – 2018. – №6 – С. 6-10. .

69. Гуляев, В.М. Групповой химический состав углей и шихт и реакционная способность кокса. 1. О методах определения реакционной способности кокса / В.М. Гуляев, В.Д. Барский, А.Г. Рудницкий, А.В. Кравченко // Кокс и химия. – 2013. – №1 – С. 23-26. .

70. Fractographic approach to metallurgical coke failure analysis. Part 1: Cokes of single coal origin / R. Roest, H. Lomas, K. Hockings, M.R. Mahoney [Текст] // Fuel. – 2016. – Vol. 180, 15 September. – P. 785-793. .

71. Use of rheometry and micro-CT analysis to understand pore structure development in coke / K.M. Steel, R.E. Dawson, D.R. Jenkins et al. // Fuel Processing Tehnol. – 2017. – Vol. 155, January. – P. 106-113. .

72. Шестоперова, А. В. Совершенствование схемы подготовки угольной шихты для производства кокса мокрого тушения на КХП АО «ЕВРАЗ НТМК» / А. В. Шестоперова, С. Н. Куприянова, В. Н. Круглов // Черные металлы. – 2018. – № 7 – С. 20-23. .

73. Influence of coke nut introduction in blast furnace charge on melting parameters / M. V. Chukin, S. K. Sibagatullin, A. S. Kharchenko, V. P. Chernov, G. N. Logachev // CIS Iron and Steel Review. – 2016. – Vol. 2 – P. 9-13.

74. Трегубов, Д.Г. Способы снижения сернистости кокса: теория и практика (Обзор) / Д.Г. Трегубов, Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. – 2005. – № 6. – С. 21-28.

75. ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009). Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. – М.: Стандартиформ, 2014. – 44 с.

76. Иванова, В. А. Систематизация свойств и параметров литейного кокса. Часть 1. Химические и физико-химические свойства / В. А. Иванова, Е. О. Побегалова // Черные металлы. – 2019. – № 8 (1052). – С. 4-9.

77. Иванова, В. А. Систематизация свойств и параметров литейного кокса. Часть 2. Физические свойства / В. А. Иванова, Е. О. Побегалова // Черные металлы. – 2019. – № 10 (1054). – С. 33-37.

78. Особенности окисления угля шахтоуправления «Покровское» в лабораторных и естественных условиях. Сообщение 2. Лабораторные коксования опытных шихт. / Д.В. Мирошниченко, И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Н.А. Десна, М.Б. Головки // Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 6-12.

79. Сысков, К.И. Теория поведения кокса в доменном процессе / К.И. Сысков. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 215 с.

80. Савелов, В.Д. Стандартные образцы влагосодержания и насыпной плотности доменного кокса для нейронных влагомеров и влагомеров-плотномеров: опыт разработки и применения / В.Д. Савелов, А.С. Запорожец // Стандартные образцы. – 2016. – № 1. – С. 31-39.

81. Остроухов, М.Я. Справочник мастера-доменщика / А.Я. Остроухов, Л.Я. Шнарбер. – М.: Metallurgy, 1977. – 304 с.

82. Нефедов, П. Я. Качество и эффективность использования литейного кокса в вагранках / П. Я. Нефедов В. М., Страхов // Кокс и химия. – 2003. – № 7. – С. 16-26.

83. Агроскин, А.А. Теплофизика твердого топлива / А.А. Агроскин, В.Б. Глейбман – М.: Недра, 1980. – 256 с.

84. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 8-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2008. – 648 с.

85. Баранова, П.С. Классификация механических свойств и параметров литейного кокса / П.С. Баранова, В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // LXIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 20 апреля 2016 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2016. – С. 679-682.

86. Мирошниченко, Д.В. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщение 3. Механическая прочность кокса / Д.В. Мирошниченко, Н.А. Десна, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. – 2015. – № 5. – С. 6-12.

87. Оценка качества кокса с использованием показателей динамики давления распираания угольных смесей / А.С. Коверя, А.Г. Старовойт, В.Д. Барский, А.Г. Рудницкий // Кокс и химия. – 2013. – № 2. – С. 8-15.

88. Мейерс, М.А. Физические свойства и реакционная способность кокса. В сб. Химия твердого топлива. Сборник II. Пер. с англ. / Под ред. Н.М. Караваева. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1951. – 436 с.

89. Вовк, Л.А. Метод определения электросопротивления литейного кокса / Л.А. Вовк, Е.О. Шамина, В.А. Иванова // LXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 22 апреля 2015 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2015. – С. 589-592.

90. Вовк, Л.А. Исследование влияния крупности на величину электросопротивления литейного кокса / Л.А. Вовк, В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // LXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием.

22 апреля 2015 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2015. – С. 465-468. .

91. Иванова, В.А. Об оценке качества литейного кокса величиной электросопротивления / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Современное состояние науки и практики в областях стандартизации, метрологии и управления качеством в Российской Федерации: материалы науч.-практ. конф. 29-30 апр. 2015 г., Владимир / под ред. проф. Ю.В. Баженова. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2015. – С. 105-108.

92. Совершенствование методики определения удельного электрического сопротивления порошка кокса / В.Н. Рубчевский, С.А. Овчинникова, Ю.А. Чернышов, И.В. Золотарев, Ю.А. Яценко, Э.И. Торяник, А.В. Грызлов, С.С. Кубрак // Кокс и химия. – 2014. – № 10. – С. 9-20.

93. Иванова, В.А. Влияние условий транспортировки на качество литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – № 4. – Т. 20. – С. 18-24.

94. Иванова, В.А. Об использовании чугуна ваграночной плавки для получения ЧВГ / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Литейное производство. – 2018. – № 2. – С. 6-8.

95. Влияние оптимизации состава угольной шихты на качество кокса / В.П. Лялюк, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова, В.П. Соколова // Кокс и химия. – 2012. – № 12. – С. 13-19.

96. Влияние оптимизации состава шихты и ее зольности на показатели качества кокса / Ю.В. Степанов, Р.Р. Гилязетдинов, Н.К. Попова, Л.А. Махортова // Кокс и химия. – 2005. – №7. – С.14-18.

97. Zhang, Q. Prediction of coke quality at Baosteel / Q. Zhang, X. Wu, A. Feng, M. Shi. // Fuel Processing Technology. – 2004. – Vol. 86. – P.1– 11.

98. Опыт производства кокса улучшенного качества / А.И. Коломийченко, И.В. Золотарев, О.Н. Мостовой, С.И. Касюн // Кокс и химия. – 2017. – № 11. – С. 31-36.

99. Золотухин, Ю.А. Влияние изменений сырьевой базы ЦОФ «Кузнецкая» и ОУОУ «ЕЗСМК» на качество кокса. 1. Лабораторные коксования / Ю.А. Золотухин, С.Н. Голубцов, К.П. Каракаш // Кокс и химия. – 2017. – № 7. – С. 8-19.

100. Kishore, G.S. Coal blend modeling and coke quality prediction studies - GIKIL's success story. / G.S. Kishore, G. Jagannadham, S. Alma // AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings. – 2011. Vol. 207– С. 16-17.

101. Прогноз горячей прочности (CSR) и реакционной способности (CRI) кокса / Е.А. Буланов, В.Н. Зайнутдинов, В.Я. Кузнецов, Л.А. Зиновьева // Кокс и химия. – 2005. – №5. – С. 23-26.

102. Модель прогноза показателей CSR и CRI кокса на основе химико-петрографических параметров угольных шихт и условий их коксования/ А.С. Станкевич, Р.Р. Гиллязетдинов, Н.К. Попова, Д.А. Кошмаров // Кокс и химия. – 2008. – № 9. – С. 37-44.

103. Мирошниченко, Д.В. Использование показателей физических свойств золы углей для предварительной оценки CRI та CSR кокса / Д.В. Мирошниченко // Кокс и химия. – 2008. – №11. – С. 29-33.

104. Золотухин, Ю.А. О взаимосвязи комплексного показателя коксующести угольных шихт с качеством кокса / Ю.А. Золотухин // Кокс и химия. – 2016. – № 11. – С. 6-10.

105. Киселев, Б.П. Сырьевая база коксования России. 1. Ретроспектива / Б.П. Киселев, В.А. Леушин // Кокс и химия. – 1999. – № 11. – С. 2-9.

106. Смирнов, А.Н. Сопоставление и анализ адекватности математических моделей для прогнозирования показателей качества кокса M25 и M10 / А.Н. Смирнов, Д.И. Алексеев // Вестник магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. – № 3. – Т.13. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, 2019. – С. 62-67.

107. Data mining – new perspectives on predicting coke quality in recovery stamp charged coke making process / Н.Р. Tiwari, S.K. Haldar, A. Roy, A. Bhattacharjee, P. Mishra //Metal Res Technol. – 2015. – Vol.112(6). – С.15-17.

108. Рудыка, В.И. Сталь, металлургический уголь, кокс: рынки, достижения, инновации (Аналитический обзор материалов саммита «Европейский кокс 2017») / В.И. Рудыка // Кокс и химия. – 2017. – №8. – С. 2-15.
109. Мирошниченко, Д.В. Механизм окисления углей / Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. – 2017. – № 5. – С. 2-10.
110. Мирошниченко, Д.В. Лабораторные и опытно-промышленные коксования угольных шихт с различным долевым участием окисленных углей / Д.В. Мирошниченко, И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. – 2012. – № 5. – С. 6-16.
111. Мирошниченко, Д.В. Оптимизация схемы подготовки окисленных углей / Д.В. Мирошниченко, Ю.С. Васильев, Ю.С. Кафтан // Кокс и химия. – 2017. – № 4. – С. 2-8.
112. Особенности окисления угля шахтоуправления «Покровское» в лабораторных и естественных условиях. Сообщение 1. Кинетика окисления и технологические свойства / Д.В. Мирошниченко, И.Д. Дроздник, Ю.С. Кафтан, Н.А. Десна // Кокс и химия. – 2015. – № 3. – С. 3-10.
113. Сухоруков, В.И. Проблемы и перспективы производства кокса в России / В.И. Сухоруков, А.Я. Еремин, // Кокс и химия. – 2016. – № 3. – С.38-48.
114. Васильева, Е. В. Прогнозирование выхода кокса из концентратов углей кузнецкого бассейна / Е. В. Васильева, Е. С. Злобина // Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – № 10 (169). – Т. 29. – С. 89-91.
115. Посохов, Ю.М. Входной контроль качества угольной продукции и претензионная работа. Метрологические аспекты. / Ю.М. Посохов // Кокс и химия. – 2016. – № 3. – С. 65-71.
116. Булаевский, Б.Х. Укрытый склад угля с перегружателем порталного типа. / Б.Х. Булаевский, А.В. Казанцев // Кокс и химия. – 2014. – № 2. – С. 12-16. .
117. Lorez, D. Effect to low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability / D. Lorez, Y. Sanada, F. Mondragon // Fuel. – 1998. – Vol. 77. – no 14. – P.1623.

118. Sanchez, J.E. Oxidation paths of a coking coal and comparison of its oxidized product with a non-coking coal / Sanchez J.E., Rincon J.M. // *Fuel*. – 1997. – Vol. 76. – no. 12. – P. 1137.

119. Smędowski, Ł. Impact of weathering on coal properties and evolution of coke quality described by optical and mechanical parameters / Ł. Smędowski, M. Piechaczek // *International Journal of Coal Geology*. – 2016. – №168. – Part.1. – P. 119-130. .

120. Семенова, С.А. Влияние выветривания на изменение состава и технологических свойств углей / С.А. Семенова, Ю.Ф. Патраков // *Кокс и химия*. – 2007. – № 3. – С. 8-14.

121. Фельдбрин, М.Г. К теории изменения коксуетости углей в связи с их окислением / М.Г. Фельдбрин // *Подготовка и коксование углей: сб. науч. ст.* – Свердловск: *Металлургиздат*, 1959. – С. 18-24.

122. Мирошниченко, Д.В. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщение 5. Обоснование предельных сроков хранения углей / Д.В. Мирошниченко, Н.А. Десна, Ю.С. Кафтан // *Кокс и химия*. – 2015. – №4. – С. 7-11.

123. Effect of Coal-Blend Crushing on Coke Quality / P.K. Pankaj, S.K. Kushwaha, K.K. Manjhi et. Al. // *Intern. J. of Coal Prep. And Utiliz.* – 2017. – Vol.37. – no 3. – P. 124-130.

124. Еремин, А.Я. Некоторые технологические и технические аспекты реализации технологии подсушки шихты перед коксованием с использованием вторичных энергоресурсов коксохимического производства / А.Я. Еремин, С.Г. Стахеев // *Кокс и химия*. – 2017. – №5. – С. 11-15.

125. Малый, Е.И. Снижение сернистости кокса за счет увеличения доли термически подготовленного газового угля в составе шихты для коксования / Е.И. Малый // *Кокс и химия*. – 2014. – №5.– С. 17-19.

126. Старовойт, А.Г. Влияние содержания в шихте термически подготовленного в микроволновом поле газового угля на качество кокса / А.Г. Старовойт, Е.И. Малый, М.С. Чемеринский // *Кокс и химия*. – 2012. – № 12. – С. 8-12.

127. Montiano, M.G. Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke / M.G. Montiano, E. Diaz-Faes, C. Barriocanal // *Fuel Process. Technol.* – 2016. – Vol.148, July. – P. 155-162.

128. Influence of biomass on metallurgical coke quality / M.G. Montiano, E. Diaz-Faes, C. Barriocanal, R. Alvarez // *Fuel.* – 2014. – Vol. 116. 15 January. – P. 175-182. .

129. Шелков, А.К. Справочник коксохимика. Том 1: Сырьевая база и подготовка углей к коксованию. – 1965. – 490 с. .

130. Nomura, S. Effect of coke contraction on mean coke size / S. Nomura, T. Arima // *Fuel.* – 2013. – Vol. 105, March. – P. 176-183. .

131. Тивари, Х.П. Производство кокса из трамбованной шихты в печах с утилизацией тепла: опыт успешной эксплуатации / Х.П. Тивари, С.К. Халдер, С. Дутта // *Кокс и химия.* – 2015. – № 11. – С. 27-37.

132. Иванова, В. А. Влияние состава исходной шихты и технологии коксования на качество кокса / В.А. Иванова // *Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов XII Международной научной конференции / отв. ред. А.В. Горбенко.* – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – С. 129-133.

133. Зублев, Д.Г. О способах оптимального подогрева коксового пирога в печи для коксования (Обзор) / Д.Г. Зублев, В.Д. Барский, А.В. Кравченко // *Кокс и химия.* – 2016. – №11. – С. 16-18.

134. Nyathi, M.S. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology / M.S. Nyathi, R. Kruse, M. Mastalerz, D.L. Bish // *Fuel.* – 2016. – Vol. 176, 15 July. – P. 11-19.

135. Шарма, Р. Новый способ тушения для повышения качества кокса на заводе компании «ТАТА STEEL» / Р. Шарма // *Кокс и химия.* – 2014. – № 7. – С. 40-47.

136. Данилин, Е.А. Разработка и внедрение передовых технических решений – основное направление совершенствования технологии сухого тушения кокса / Е.А. Данилин // *Кокс и химия.* – 2015. – №12. – С. 14-25.

137. Сухоруков, В.И. Научные основы совершенствования техники и технологии производства кокса / В.И. Сухоруков. – Екатеринбург: ВУХИН, 1999. – 376 с.

138. О закономерностях глубокого разрушения кокса / Д.А. Мучник, А.И. Шевченко, С.В. Щеголев и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1975. – №1. – С. 47-49.

139. Квецинска, А. Влияние параметров охлаждающей воды при тушении кокса на его качество / А. Квецинска, Я. Фига, С. Стельмах // *Кокс и химия*. – 2014. – № 11. – С. 15-18.

140. Способ повышения качества кокса сухого тушения / Р.Р. Гилязетдинов, К.В. Суворов, Д.А. Соколов, Н.К. Попова, С.И. Маланичева, Е.Р. Журавлева // *Кокс и химия*. – 2015. – № 6. – С. 15-17.

141. Мучник, Д.А. Преимущества методики аналитической обработки данных с целью определения и сопоставления свойств кокса / Д.А. Мучник // *Кокс и химия*. – 2012. – № 12. – С.20-27.

142. Особенности технологии сортировки кокса на ПАО «Запорожжкокс» / Э.И. Торяник, А.С. Гайдаенко, А.В. Подлубный, Г.М. Ткалич, Р.А. Вовк // *Кокс и химия*. – 2016. – № 1. – С. 17-26.

143. Гришаков, В.А. Опыт применения резиновых сит при рассеве кокса / В.А. Гришаков, Ю.В. Калимин // *Кокс и химия*. – 2014. – № 2. – С. 40-41.

144. Иванова, В. А. Качество Литейного кокса / В. А. Иванова // *Литейное производство сегодня и завтра: труды 9й научно-практической конференции, посвященной 20-летию образования РАЛ, 10-летию создания журнала «Литейщик России»*. – СПб.: Издательство Политехн. Ун-та, 2012 – с. 224-230.

145. Иванова, В.А. Исследование влияния условий хранения на качество литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // *Избранные научные труды XVI Международной научно-практической конференции «Управление качеством», 14-15 марта 2017 г.* – М.: МАИ, 2017. – С. 214-218.

146. Иванова, В.А. Исследования по определению характеристик качества литейного кокса / В.А. Иванова, О.П. Яблонский // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева*. – 2011. – № 3 (21). – С. 169-174. .

147. Иванова, В.А. Влияние качества литейного кокса на наследственные свойства чугуна ваграночной плавки / В.А. Иванова, Е.О. Побегалова // Наследственность в литейно-металлургических процессах: Материалы 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / отв. редактор проф. В.И. Никитин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – С.214-220.

148. Влияние нагрева на структуру литейного кокса / В.А. Иванова, О.П. Яблонский, Д.Э. Пухов, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2014. – № 4 (31). – С. 22-25.

149. Шамина, Е.О. (Е.О. Побегалова) О подходах к улучшению качества процесса плавки чугуна в вагранке / Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова), К.И. Порсев, В.А. Иванова // Избранные научные труды 15-й Международной научно-практ. конф. «Управление качеством», 10-11 марта 2016 г. – М.: ПРОБЕЛ-2000, МАИ, 2016. – С. 350–353.

150. Побегалова, Е.О. Разработка информационной модели динамики характеристик качества литейного кокса на стадиях жизненного цикла / Е.О. Побегалова, В.А. Иванова, С.А. Шустров // Техническое регулирование, метрологическое обеспечение и управление качеством в коксохимическом производстве»: сб. материалов I Всероссийской науч.-практ. конф., 24 ноября 2020 г. [Электронный ресурс] – Ярославль: Издательство ЯГТУ, 2020. – с. 45-48.

151. Иванова, В. А. Методика оценки качества литейного кокса / В.А. Иванова // Metallurgy машиностроения: международный научно-технический журнал. – 2011. – № 2. – С. 41-43. .

152. ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. – М.: Стандартиформ, 2005. – 7 с. .

153. ГОСТ 1412-85 Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 5 с.

154. Мучник, Д.А. Сортировка кокса / Д.А. Мучник, Е.Б. Иванов. – М.: Изд-во «Металлургия», 1968. – 296 с.

155. Иванова, В.А. Исследование влияния окружающей среды на влажность литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Литейщик России. – 2018. – № 1. – С. 18-21.

156. Иванова, В.А. Влияние класса крупности на изменение влажности образцов литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // Избранные научные труды XVII Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – М.: МАИ, 2018. – С. 404-408.

157. Ivanova V.A. Effects of Environmental Humidity on the Moisture Content of Casting Coke / V.A. Ivanova, E.O. Shamina (E.O. Pobegalova) // Solid Fuel Chemistry. – 2018. – Vol. 52. – No. 6. – PP. 387–391.

158. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

159. ГОСТ 28946-91 (ИСО 616-77). Кокс каменноугольный. Метод определения прочности на сбрасывание. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 9 с.

160. Побегалова, Е.О. Анализ метрологического обеспечения оценки качества литейного кокса на стадии жизненного цикла «Поставка потребителю» / Е.О. Побегалова // Избранные труды 18-й Международной научно-практической конференции «Управление качеством», 12-13 марта 2020. – М.: Пробел-2000, 2020. – С. 209-213.

161. Костенко, Н.А. Анализ испытательного оборудования для оценки прочности литейного кокса / Н.А. Костенко, О.Н. Кочурова, Е.О. Побегалова // LXXIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 20 апреля 2020 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2020. – Часть 2. – С. 262-265.

162. ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М.: Стандартинформ, 2019. – 91 с.

163. ГОСТ Р 57211.3-2016/IEC/TR 62131-3:2011. Внешние воздействия. Данные о воздействии на электротехническое оборудование вибрации и ударов. Часть 3. Оборудование, перевозимое железнодорожным транспортом. – М.: Стандартинформ, 2019. – 47 с.

164. Соснина, П.А. Анализ методов испытаний для определения механических свойств литейного кокса /П.А. Соснина, В.А. Иванова, Е.О. Шамина (Е.О. Побегалова) // LXIX всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 20 апреля 2016 г., Ярославль: сб. материалов конф. [Электронный ресурс]. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2016. – С. 761-764.

165. ГОСТ 23083-78. Кокс каменноугольный, пековый и термоантрацит. Методы отбора и подготовки проб для испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 9 с.

166. ГОСТ Р 51908-2002. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части условий хранения и транспортирования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 18 с.

167. ГОСТ Р 51909-2002. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на транспортирование и хранение. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 7 с.

168. ГОСТ РВ 20.57.305-98. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов. – М.: Госстандарт России, 2001. – 50 с. .

169. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 10 с.

170. Иванова, В.А. Влияние жизненного цикла на качество литейного кокса. Стадия «Поставка потребителю» / В.А. Иванова, Е.О. Побегалова // Черные металлы. – 2020. – № 4. – С. 9-12.

171. Pobegalova, E.O. Impact of transportation on foundry coke quality / E.O. Pobegalova, V.A. Ivanova // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2020. – Vol. 63. – No. 10. – PP. 823-828.

172. Иванова, В.А. Влияние свойств литейного кокса на его разрушение при транспортировании / В.А. Иванова, Е.О. Побегалова // *Химия твердого топлива*. – 2020. – № 2. – С. 66-70.

173. Улановский, М. Л. Прогноз качества кокса по показателям CSR и CRI (обзор) / М. Л. Улановский // *Кокс и химия*. – 2009. – № 10. – С. 17-23.

174. Pobegalova, E.O. Influence of transportation in railway cars of foundry coke on its quality / E.O. Pobegalova, V.A. Ivanova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 986. – No. 1. – Art. no. 0120033.

175. Иванова, В.А. Установление требований потребителей к качеству литейного кокса / В.А. Иванова, Е.О. Шамина // *Избранные научные труды пятнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством»*, 10-11 марта 2016 года. – М.: ПРОБЕЛ-2000, МАИ, 2016. – С. 173-176. .

176. ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.

177. ГОСТ 7502-98. Рулетки измерительные металлические. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с.

## Приложение А

Справка о внедрении результатов диссертационной работы  
в учебном процессе

УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора ФГБОУ ВО «Ярославский  
государственный технический университет»

Е.О. Степанова

13.07.2020

## Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Е.О. Побегаловой

Результаты диссертационной работы Побегаловой Екатерины Олеговны в области разработки методов оценки качества литейного кокса внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»:

- 1) направлений подготовки 27.03.01, 27.04.01 «Стандартизация и метрология» при изучении дисциплин «Методы и средства измерений и контроля», «Нормативно-методическая база стандартизации», «Организация и технология испытаний», «Информационная поддержка жизненного цикла продукции», «Методы и средства контроля качества»;
- 2) направлений подготовки 22.03.01, 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» при изучении дисциплин «Методы обеспечения качества в машиностроении», «Теория металлургических процессов», «Метрологическое обеспечение производства», «Нормативно-методическое обеспечение технологических процессов».

Проректор по ОДиВР ФГБОУ ВО «ЯГТУ» \_\_\_\_\_ В.А. Голкина

## Приложение Б

## АКТ о внедрении результатов диссертационного исследования в процесс выбора поставщика литейного кокса



Ф. 07-50340

**ПАО «Автодизель» (ЯМЗ)**  
150040, г. Ярославль,  
проспект Октября, д. 75.  
Тел.: +7 (4852) 58-81-20,  
факс: +7 (4852) 58-81-44  
Motor\_ymz@gaz.ru, www.gazgroup.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Гл. технолог ПАО «Автодизель» (ЯМЗ)

С.А. Шустров

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Побегаловой Екатерины Олеговны

в процесс выбора поставщика литейного кокса

Настоящим документом подтверждается, что результаты диссертационных исследований Побегаловой Е.О. в области оценки прочности литейного кокса при транспортировании используются в процессе выбора поставщиков для прогноза изменения гранулометрического состава при доставке литейного кокса на предприятие.

Главный технолог по подготовке  
литейного производства УГТ

И.В. Янчков

