

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**«МИСиС»**

**НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий и оборудования

**Е.В. Братковский,  
А.Н. Шаповалов**

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Методические указания  
для выполнения контрольной работы/домашнего задания  
по дисциплине «Металлургические технологии»  
для студентов направления 22.03.02 «Металлургия»,  
всех форм обучения

Новотроицк,  
2016

УДК 669.162

ББК 34.327

Б

Рецензенты:

*Директор ФГАОУ ВО НФ НИТУ «МИСиС»,  
к.т.н., доцент А.В. Заводяный*

*Доцент кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВО «Магнитогорский  
государственный технический университет  
им. Г.Н. Носова», к.т.н., доцент И.В. Макарова*

Братковский Е.В., Шаповалов А.Н. Анализ эффективности работы доменной печи: Методические указания для выполнения контрольной работы/домашнего задания. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2016. – 34с.

Методические указания призваны обучить студентов, обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия», навыкам анализа эффективности работы доменной печи по производственным данным, при выполнении ими контрольной работы/домашнего задания по дисциплине «Металлургические технологии».

Изложены основные направления по улучшению технико-экономических показателей доменной плавки, позволяющие оценить уровень техники и технологии производства, провести сравнительную оценку результатов работы печи и выработать на этой основе необходимые в дальнейшей деятельности меры. Приведена методика и пример выполнения анализа эффективности работы доменной печи по производственным данным.

Указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров направления 22.03.02 «Металлургия», обучающихся по профилям, реализуемым в НФ НИТУ «МИСиС».

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС», 2016

## Содержание

Введение .....	4
1 Зависимость удельного расхода кокса и производительности доменной печи от различных факторов .....	6
1.1 Показатели качества шихты .....	6
1.2 Параметры дутья .....	9
1.3 Состав чугуна .....	11
2 Алгоритм расчета .....	12
2.1 Алгоритм расчета перерасхода кокса в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым» .....	13
2.2 Алгоритм расчета роста производительности доменной печи в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым» .....	18
3 Пример проведения анализа эффективности работы доменной печи по производственным данным .....	23
3.1 Определение перерасхода кокса в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым» .....	23
3.2 Расчет роста производительности доменной печи в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым» .....	25
4 Оформление контрольной работы/домашнего задания .....	29
Список использованных источников .....	29
Приложение А. Варианты индивидуальных заданий .....	30
Приложение Б. Влияние качества шихты и технологических факторов на производительность доменной печи и удельный расход кокса .....	33

## Введение

Наиболее важными показателями работы доменной печи, характеризующими эффективность производства, являются производительность и удельный расход кокса.

Технико-экономические показатели (ТЭП) работы печи зависят от совокупности конструктивных, технологических и организационных параметров, и, в значительной степени, определяются качеством шихтовых материалов, режимами загрузки, дутья и выпусков и др.

Производительность оценивают количеством выплавленного чугуна в тоннах за сутки, величиной полезного объема, приходящегося при этом на 1 т чугуна (КИПО), или чугуна, приходящегося на 1 м<sup>3</sup> объема (удельная производительность). Современные доменные печи выплавляют до 10-12 тыс. тонн чугуна в сутки и работают с удельной производительностью до 2,2-2,6 т/м<sup>3</sup> в сутки при КИПО не более 0,5 м<sup>3</sup>/т в сутки.

Удельный расход кокса при выплавке передельного чугуна при применении качественной шихты и работе на комбинированном дутье с топливными добавками достигает 350 кг/т чугуна и даже менее. При этом кокс является главной статьей себестоимости чугуна (более 50 %).

Таким образом, производительность и расход кокса, в большой мере определяют себестоимость чугуна, и являются конечными результатами доменной плавки, характеризующими уровень техники, технологии и организации производства чугуна. В связи с важностью этих показателей в практике доменного производства уделяется большое внимание анализу причин их изменения.

Поэтому программой дисциплины «Металлургические технологии» предусмотрено выполнение контрольной работы (студентами заочной формы обучения) / домашнего задания (студентами очной формы обучения), в котором студентам необходимо выполнить анализ эффективности работы доменной печи по производственным данным.

Все необходимые для выполнения контрольной работы/домашнего задания данные выбираются согласно варианту из приложения А. Вариант задания соответствует порядковому номеру в алфавитном списке учебной группы.

При проведении анализа студенты определяют действие на расход кокса и производительность печи различных изменяющихся факторов, используя данные приложения Б. Такой анализ помогает вскрыть причины успешной или неудовлетворительной работы и выработать на этой основе необходимые в дальнейшей деятельности меры.

При проведении анализа в качестве эталона оценки выступают расчетные ТЭП или наилучшие за все время эксплуатации печи показатели. К эталонным, с учетом известного влияния качества шихты и технологических факторов, «приводятся» фактические значения производительности и расхода кокса за анализируемый период.

При выполнении контрольной работы/домашнего задания формируются компетенции, предусмотренные учебным планом подготовки бакалавров направления 22.03.02 «Металлургия» по дисциплине «Металлургические технологии».

Для успешного выполнения контрольной работы/домашнего задания необходима предварительная подготовка по химии, физике, физической химии и теплотехнике. Успешное выполнение контрольной работы/домашнего задания является составной частью допуска к экзамену по дисциплине «Металлургические технологии» и необходимым условием качественного освоения таких специальных дисциплин как «Теория и технология окускования сырья и доменного производства», «Экстракция черных металлов из природного сырья», а также написания и защиты выпускной квалификационной работы.

## **1 Зависимость удельного расхода кокса и производительности доменной печи от различных факторов**

Влияние действующих факторов на результаты доменной плавки устанавливается проведением экспериментов и расчетами по математическим моделям. В производственных условиях для анализа работы доменных печей используются данные, приведенные в приложении Б.

Снижение удельного расхода кокса и повышение производительности печи происходят за счет:

- снижения потребностей в тепле;
- введения дополнительных восстановителей и повышения их концентрации;
- введения дополнительного тепла или топлива в высокотемпературную зону;
- улучшения использования в печи тепловой и химической энергии газа;
- уменьшения взаимосопротивления шихты и газов их движению в противотоке.

Для положительного эффекта от некоторых мероприятий требуется одновременно использовать другие. Например, для снижения расхода кокса увеличением расхода природного газа необходимо повышать содержание кислорода в дутье или его температуру, снизив влажность дутья. Для реализации преимуществ повышенного давления газов на колошнике необходимо изменением режима загрузки повышать равномерность распределения шихтовых материалов по сечению и увеличивать интенсивность подачи дутья.

На результаты доменной плавки влияют качество шихты, параметры дутья, состав и свойства продуктов плавки, режим загрузки и выпуска и др.

### **1.1 Показатели качества шихты**

Основными показателями качества шихты, влияющими на результаты доменной плавки являются:

- содержание железа;
- прочность, гранулометрический состав и содержание мелочи;
- основность (отношение основных оксидов к кислотным);
- кремниевый модуль (отношение  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ );
- содержание вредных и полезных примесей;
- колебания состава и свойств.

Основными направлениями снижения удельного расхода кокса и повышения производительности печей в современных условиях служат снижение содержания мелочи в компонентах шихты и повышение в них содержания железа.

### **1.1.1 Содержание мелочи в шихте**

Мелочью в компонентах доменной шихты принято считать класс 0-5 мм. Содержание ее в агломерате, производимом аглофабриками России, составляет 14-18 %, а в окатышах в среднем 3,5 %. Практика показывает, что достижимо снижение содержания мелочи в агломерате до 3-5 % за счет улучшения его прочностных свойств, и отсева мелочи после спекания и перед загрузкой агломерата в печь. Согласно данным приложения Б, уменьшение содержания мелочи на 1 % позволяет снизить расход кокса на 0,5 % (2-3 кг/т чугуна) и повысить производительность печи на 1%. Для более полной реализации преимуществ шихты с пониженным содержанием мелочи корректировкой режима загрузки повышают равномерность распределения материалов по сечению колошника и увеличивают интенсивность подачи дутья. При этом добиваются ровного схода шихты при более высоком общем перепаде давления газов в печи (разность между давлением дутья и давлением на колошнике). Снижение расхода кокса обеспечивается за счет более полного использования химической и тепловой энергий газового потока, повышение производительности – кроме того, ввиду увеличения количества газавосстановителя и газа-теплоносителя в единицу времени за счет повышения интенсивности подачи дутья.

### **1.1.2 Содержание железа**

Производимый на аглофабриках России и стран СНГ агломерат, в среднем содержит 53-55 % железа, а окатыши до 66 %. Использование в агломерационной шихте концентратов глубокого обогащения руд позволяет повышать содержание железа вплоть до уровня его в окатышах. Согласно данным приложения Б, увеличение содержания железа в шихте на 1 % дает снижение расхода кокса на 1-1,4% и прирост производства чугуна на 1,7-2,4%. Такие результаты обеспечиваются за счет снижения выхода шлака, улучшения условий восстановления и теплообмена. Уменьшаются затраты тепла на нагрев шлакообразующих и их расплавление, а также на проведение реакции прямого восстановления Fe из FeO ( $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ ). Облегчается доступ газавосстановителя и газа-теплоносителя к поверхности восстанавливаемого

оксида, что ускоряет процесс получения металла, повышает степень использования химической и тепловой энергии газа. Агломерат с повышенным содержанием железа обычно прочнее и содержит меньше мелочи. Для полной реализации преимуществ богатого сырья целесообразно обеспечивать более равномерное распределение материалов по сечению колошника и повышенную интенсивность дутья при сохранении ровного схода шихты.

### 1.1.3 Показатели качества кокса

Для достижения высоких показателей доменной плавки необходим прочный малоистирающийся кокс крупностью в пределах 40-60 мм с низким содержанием мелочи (класса 0-25 мм), золы и серы. Применяемый в России и странах СНГ кокс обычно содержит 10-12 % золы, 0,4-1,8 % серы, 2-4 % мелочи, имеет прочность по показателю M25 в пределах 80-90 %, истираемость по показателю M10 – 5-10 %. Содержание золы и серы влияет на результаты доменной плавки как непосредственно, так и через изменение количества шлака и сырого флюса. Поскольку, при анализе причин изменения расхода кокса и производительности, действие выхода шлака (содержание железа в шихте отражает выход шлака) и сырого флюса учитывается отдельно, то данные приложения Б включают только эффект непосредственного влияния содержания золы и серы в коксе. При необходимости оценки их комплексного влияния, когда суммарное изменение количества шлака (с учетом снижения содержания железа в шихте) и сырого флюса отдельно не учитывают, следует пользоваться данными, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 – Комплексное влияние содержания золы и серы в коксе на показатели доменной плавки

Наименование параметров		Изменение, %	
		расход кокса	производительность
Уменьшение содержания золы в коксе на 1 %	а)* <sup>1</sup>	-1,4	+1,4
	б)* <sup>2</sup>	-1,8	+1,8
Уменьшение содержания серы в коксе на 1 %	а)* <sup>1</sup>	-0,3	+0,3
	б)* <sup>2</sup>	-0,8	+0,8
<p>*<sup>1</sup> при отсутствии в шихте сырого флюса или постоянном его расходе;  *<sup>2</sup> при корректировке количества СаО в шихте изменением расхода сырого флюса.</p>			



## 1.2 Параметры дутья

Основными характеристиками дутьевого режима доменной плавки являются:

- расход, давление, температура и влажность дутья;
- расход топливных добавок (природного газа, коксового газа, жидкого топлива, пылеугольного топлива и др.);
- содержание кислорода в дутье.

Основным направлением улучшения результатов доменной плавки в современных условиях служит увеличение температуры дутья, расхода природного газа и концентрации кислорода в дутье. Данные по влиянию этих факторов на показатели доменной плавки приведены в приложении Б.

### 1.2.1 Температура дутья

В настоящее время современные высокопроизводительные доменные печи России работают на дутье с температурой 1100-1200 °С. Совершенствование конструкций воздухонагревателей и системы подачи дутья в печь позволяет повысить нагрев дутья до 1300-1500 °С. Согласно данным приложения Б, увеличение температуры дутья на 100 °С дает снижение расхода кокса и повышение производительности на 1,4-5,0 %. Эффект достигается за счет ввода дополнительного тепла в высокотемпературную зону печи. В условиях работы печи с низким нагревом дутья при малом обогащении его кислородом увеличение температуры сильнее улучшает результаты плавки.

В связи с существованием оптимального температурного поля в доменной печи после достижения некоторой температуры дутья (1000-1100 °С, в зависимости от условий) дальнейшее наращивание ее необходимо производить совместно с увеличением расхода природного газа или других добавок.

### 1.2.2 Расход природного газа

Удельный расход природного газа на доменных печах России составляет от 70 до 130 м<sup>3</sup>/т чугуна. Возможно дальнейшее его увеличение до 130-150 м<sup>3</sup>/т чугуна. Эквивалент замены кокса природным газом, согласно приложения Б, составляет 0,6-0,8 кг/м<sup>3</sup>, при сохранении производительности печи на постоянном уровне. Для каждой доменной печи в определенных условиях существует оптимальный расход природного газа, превышение которого приводит к ухудшению результатов плавки (возможен рост расхода кокса с повышением расхода природного газа).

Экономия кокса при использовании природного газа обеспечивается, главным образом, за счет участия поступающего водорода в реакциях косвенного восстановления (например по реакции  $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ ). При этом уменьшается степень прямого восстановления по реакции  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$ , что обеспечивает сокращение потребностей в тепле на проведение процесса восстановления. Роль природного газа в качестве топлива незначительна и составляет по влиянию на расход кокса примерно 1/10 его роли в качестве восстановителя.

Вдувание природного газа в доменную печь через фурмы приводит к снижению температур в высокотемпературной зоне печи, повышению подъемной силы газового потока в верхней части печи, что допустимо лишь до определенного предела. Поэтому дальнейшее повышение расхода природного газа необходимо производить совместно с увеличением температуры дутья и концентрации в нем кислорода.

### **1.2.3 Содержание кислорода в дутье**

Содержание кислорода на доменных печах России обычно не превышает 26-27 %, при этом расход технологического кислорода составляет до 110 м<sup>3</sup>/т чугуна. Возможно дальнейшее повышение концентрации кислорода до 35-40 %. Согласно приложения Б, увеличение содержания кислорода на 1 % дает прирост производства чугуна на 1,6-2,4 % при небольшом повышении расхода кокса (на 0,2-0,5 %). Действие кислорода на производительность сильнее, а на расход кокса слабее при работе печи с низкой концентрацией кислорода в дутье. В условиях ведения плавки на холодном или слабонагретом дутье добавка кислорода способствует экономии кокса, что связано с оптимизацией тепловых условий в печи.

Рост производительности печи при увеличении концентрации кислорода обеспечивается повышением температур в зоне интенсивного восстановления Fe из FeO, увеличением концентрации восстановителей в газе (CO) по всей высоте и снижением подъемной силы газового потока в верхней части печи.

Происходящее при обогащении дутья кислородом увеличение температур в высокотемпературной зоне и повышение там сопротивления шихты прохождению газа допустимо до определенного предела. Поэтому дальнейшее наращивание кислорода в дутье необходимо производить совместно с увеличением расхода природного газа или введением других добавок. Обычно рекомендуют соотношение добавочных расходов природного газа и кислорода в пределах 0,6-0,8 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

### 1.3 Состав чугуна

Выплавляемый в доменных печах металл представляет собой в основном переделный чугун. Доля его в целом по металлургической отрасли России составляет около 95 %, доля литейного чугуна близка к 5 %, а ферросплавов – к 0,5 %.

Состав чугуна влияет на результаты плавки как непосредственно, так и через изменение количества шлака и сырого флюса. Непосредственное влияние включает изменение потребностей в тепле и углерода на восстановление примесей, температурного режима процесса, содержания углерода в чугуне, взаимосопротивления шихты и газов.

При анализе причин изменения расхода кокса и производительности печи по производственным данным суммарное изменение выход шлака (содержания железа) и сырого флюса учитывается отдельно. Поэтому данные приложения Б по влиянию содержаний Si, Mn и S в чугуне на результаты плавки представляют только непосредственный эффект. При необходимости полного учета рекомендуют пользоваться данными, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 – Полное влияние содержаний Si, Mn и S в чугуне на показатели доменной плавки

Наименование параметров		Изменение, %	
		расход кокса	производительность
Уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1 %	а)* <sup>1</sup>	-1,1	+1,1
	б)* <sup>2</sup>	-1,0	+1,0
Уменьшение содержания марганца в чугуне на 0,1 % выводом из шихты марганцевой руды	а)* <sup>1</sup>	-0,3	+0,3
	б)* <sup>2</sup>	-0,5	+0,5
Уменьшение серы в чугуне на 0,01 %	а)* <sup>1</sup>	-2,0	+2,0
	б)* <sup>2</sup>	-4,0	+4,0
* <sup>1</sup> при отсутствии в шихте сырого флюса или постоянном его расходе; * <sup>2</sup> при корректировке количества СаО в шихте изменением расхода сырого флюса.			

## 2 Алгоритм расчета

Все необходимые для выполнения контрольной работы исходные данные выбираются согласно варианту из приложения А. Вариант задания соответствует номеру по алфавитному списку учебной группы.

Алгоритм расчета предусматривает установление влияния различных факторов на расход кокса и производительность доменной печи по информации о ее работе в «базовом» (I) и «сравнительном» (II) периодах. Необходимые для расчета исходные данные представляют в соответствии с вариантом индивидуального задания (см. приложение Б) в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Показатели работы доменной печи в «базовый» и «сравнительный» периоды

Наименование показателя	"базовый" период (I)		"сравнительный" период (II)	
	Усл. обозн.	Значение	Усл. обозн.	Значение
Производительность, т/сутки	П <sub>1</sub>	3207	П <sub>2</sub>	3143
Расход кокса, кг/т чугуна	К <sub>1</sub>	433	К <sub>2</sub>	454
Простои % к номинальному времени	Пр <sub>1</sub>	1,88	Пр <sub>2</sub>	1,49
Выход шлака, кг/т чугуна	Ш <sub>1</sub>	320	Ш <sub>2</sub>	385
Содержание железа в шихте, %	Fe <sub>1</sub>	57,6	Fe <sub>2</sub>	54,7
Содержание мелочи в скиповом сырье, %	М <sub>1</sub>	13,3	М <sub>2</sub>	13,1
Расход известняка, кг/т чугуна	И <sub>1</sub>	0	И <sub>2</sub>	4
Параметры дутья: расход, м <sup>3</sup> /мин	Q <sub>д1</sub>	2886	Q <sub>д2</sub>	3095
температура, °С	t <sub>д1</sub>	1068	t <sub>д2</sub>	1090
содержание кислорода, %	O <sub>2д1</sub>	25,2	O <sub>2д2</sub>	22,5
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	ПГ <sub>1</sub>	94	ПГ <sub>2</sub>	64
Давление газа на колошнике, ати	РкГ <sub>1</sub>	0,74	РкГ <sub>2</sub>	0,88
Содержание в чугуне, %:	Si	[Si] <sub>1</sub>	[Si] <sub>2</sub>	0,52
	Mn	[Mn] <sub>1</sub>	[Mn] <sub>2</sub>	0,14
	S	[S] <sub>1</sub>	[S] <sub>2</sub>	0,01
	P	[P] <sub>1</sub>	[P] <sub>2</sub>	0,04
Содержание серы в коксе, %	A <sub>1</sub> <sup>c</sup>	0,52	A <sub>2</sub> <sup>c</sup>	0,56
Содержание золы в коксе, %	S <sub>1</sub> <sup>c</sup>	12,4	S <sub>2</sub> <sup>c</sup>	12,7

При проведении анализа в качестве «эталона» оценки выступают «базовые» ТЭП. К «базовым», с учетом известного влияния качества шихты и технологических факторов (см. приложение А), «приводятся» фактические

значения производительности и расхода кокса за анализируемый («сравнительный») период.

Расчет выполняют, используя нижеприведенные зависимости.

## 2.1 Алгоритм расчета перерасхода кокса в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым»

Перерасход кокса в «сравнительном» (период II) периоде по сравнению с «базовым» (период I) определяют в соответствии с вариантом индивидуального задания (см. приложение А, таблица 3) и данными приложения Б по пунктам:

1) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за пониженного содержания железа в шихте

$$\Delta K_{Fe} = (Fe_1 - Fe_2) \cdot \mathcal{E}_{Fe} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{Fe}$  – перерасход кокса (%) при снижении содержания железа на 1 % в зависимости от Fe, %:

при  $Fe_1 \leq 50$  %       $\mathcal{E}_{Fe} = 1,4$  % (см. приложение Б);

при  $Fe_1$  от 50 до 55 %       $\mathcal{E}_{Fe} = 1,2$  % (см. приложение Б);

при  $Fe_1 \geq 55$  %       $\mathcal{E}_{Fe} = 1,0$  % (см. приложение Б);

2) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного расхода известняка

$$\Delta K_{И} = 0,1 \cdot (И_2 - И_1) \cdot \mathcal{E}_{И} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{И}$  – перерасход кокса (%) при повышении расхода известняка на 10 кг/т чугуна (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{И} = 0,5$  %);

3) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания мелочи в скиповом сырье

$$\Delta K_{M} = (M_2 - M_1) \cdot \mathcal{E}_{M} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_{M}$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания мелочи в скиповом сырье на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{M} = 0,5$  %);

- 4) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания золы в коксе

$$\Delta K_A = (A_2^c - A_1^c) \cdot \mathcal{E}_A \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (4)$$

где  $\mathcal{E}_A$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания золы в коксе на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_A = 1,3$  %);

- 5) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания серы в коксе

$$\Delta K_S = (S_2^c - S_1^c) \cdot \mathcal{E}_S \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_S$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания серы в коксе на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_S = 3$  %);

- 6) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания кремния в чугуне

$$\Delta K_{[Si]} = 10 \cdot ([Si]_2 - [Si]_1) \cdot \mathcal{E}_{[Si]} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (6)$$

где  $\mathcal{E}_{[Si]}$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания кремния в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{[Si]} = 1,2$  %);

- 7) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания марганца в чугуне

$$\Delta K_{[Mn]} = 10 \cdot ([Mn]_2 - [Mn]_1) \cdot \mathcal{E}_{[Mn]} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (7)$$

где  $\mathcal{E}_{[Mn]}$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания марганца в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{[Mn]} = 0,2$  %);

- 8) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания фосфора в чугуне

$$\Delta K_{[P]} = 10 \cdot ([P]_2 - [P]_1) \cdot \mathcal{E}_{[P]} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{E}_{[P]}$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания фосфора в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{[P]} = 1,2$  %);

9) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за получения чугуна с пониженным содержанием серы

$$\Delta K_{[S]} = 100 \cdot ([S]_1 - [S]_2) \cdot \mathcal{E}_{[S]} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (9)$$

где  $\mathcal{E}_{[S]}$  – перерасход кокса (%) при снижении содержания серы в чугуне на 0,01 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{[S]} = 1,0$  %);

10) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за пониженной температуры дутья

$$\Delta K_{t_{д}} = (t_{д1} - t_{д2}) \cdot \mathcal{E}_{t_{д}} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (10)$$

где  $\mathcal{E}_{t_{д}}$  – перерасход кокса (%) при снижении температуры дутья на 1 °С в зависимости от  $O_{2д}$ , %:

при  $O_{2д1} < 25$  %  $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,05\%$  при  $t_{д1} < 900$  °С (см. приложение Б);  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,04\%$  при  $t_{д1} = 901-1000$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,03\%$  при  $t_{д1} = 1001-1100$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,028\%$  при  $t_{д1} = 1101-1200$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,025\%$  при  $t_{д1} = 1201-1300$  °С;  
 при  $O_{2д1} \geq 25$  %  $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,04\%$  при  $t_{д1} < 900$  °С (см. приложение Б);  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,03\%$  при  $t_{д1} = 901-1000$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,025\%$  при  $t_{д1} = 1001-1100$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,022\%$  при  $t_{д1} = 1101-1200$  °С;  
 $\mathcal{E}_{t_{д}} = 0,020\%$  при  $t_{д1} = 1201-1300$  °С;

11) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за повышенного содержания кислорода в дутье

$$\Delta K_{O_{2д}} = (O_{2д2} - O_{2д1}) \cdot \mathcal{E}_{O_{2д}} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (11)$$

где  $\mathcal{E}_{O_{2д}}$  – перерасход кокса (%) при повышении содержания кислорода в дутье на 1 % абс. в зависимости от  $O_{2д}$ , %:

при  $O_{2д1} < 25$  %  $\mathcal{E}_{O_{2д}} = 0,2$  % (см. приложение Б);

при  $O_{2д1}$  от 25 до 30 %  $\mathcal{E}_{O_{2д}} = 0,3$  %;

при  $O_{2д1}$  от 30 до 35 %  $\mathcal{E}_{O_{2д}} = 0,4$  %;

при  $O_{2д1}$  от 35 до 40 %  $\mathcal{E}_{O_{2д}} = 0,5$  %;

- 12) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за пониженного расхода природного газа

$$\Delta K_{\text{ПГ}} = (\text{ПГ}_1 - \text{ПГ}_2) \cdot \mathcal{E}_{\text{ПГ}}, \quad (12)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ПГ}}$  – перерасход кокса (%) при снижении расхода природного газа на 1 м<sup>3</sup>/т чугуна в зависимости от ПГ, м<sup>3</sup>/т:

при  $\text{ПГ} < 100$  м<sup>3</sup>/т  $\mathcal{E}_{\text{ПГ}} = 0,8$  кг/м<sup>3</sup> (см. приложение Б);

при  $\text{ПГ} = 100-150$  м<sup>3</sup>/т  $\mathcal{E}_{\text{ПГ}} = 0,7$  кг/м<sup>3</sup>;

при  $\text{ПГ} > 150$  м<sup>3</sup>/т  $\mathcal{E}_{\text{ПГ}} = 0,6$  кг/м<sup>3</sup>;

- 13) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за пониженного давления газа на колошнике

$$\Delta K_{\text{Р}_{\text{КГ}}} = 100 \cdot (\text{Р}_{\text{КГ1}} - \text{Р}_{\text{КГ2}}) \cdot \mathcal{E}_{\text{Р}_{\text{КГ}}} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (13)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{Р}_{\text{КГ}}}$  – перерасход кокса (%) при понижении давления газа на колошнике на 1 кПа (0,01 ати) – в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{\text{Р}_{\text{КГ}}} = 0,02$  %;

- 14) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) из-за увеличения количества текущих простоев

$$\Delta K_{\text{ПР}} = (\text{ПР}_2 - \text{ПР}_1) \cdot \mathcal{E}_{\text{ПР}} \cdot \frac{K_1}{100}, \quad (14)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ПР}}$  – перерасход кокса (%) при повышении количества простоев на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\mathcal{E}_{\text{ПР}} = 0,5$  %);

- 15) общий перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) по всем факторам

$$\Delta K = (K_2 - K_1); \quad (15)$$



16) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна), обусловленный объективными техническими и технологическими причинами

$$\Delta K_{\Sigma} = \sum (\Delta K_{Fe} + \Delta K_{И} + \Delta K_{M} + \Delta K_{A} + \Delta K_{S} + \Delta K_{[Si]} + \Delta K_{[Mn]} + \Delta K_{[P]} + \Delta K_{[S]} + \Delta K_{\text{уд}} + \Delta K_{O_2\text{д}} + \Delta K_{\text{ПГ}} + \Delta K_{\text{РКГ}} + \Delta K_{\text{ИР}}); \quad (16)$$

17) «приведенный» расход кокса в «сравнительный» период

$$K_2^{\text{пр}} = K_2 - \Delta K_{\Sigma}; \quad (17)$$

18) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) по организационным причинам

$$\Delta K_2^{\text{орг}} = \Delta K - \Delta K_{\Sigma}. \quad (18)$$

## 2.2 Алгоритм расчета роста производительности доменной печи в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым»

Рост производительности печи в «сравнительном» (период II) периоде по сравнению с «базовым» (период I) определяют в соответствии с вариантом индивидуального задания (приложение А, таблица 3) и данными приложения Б по пунктам:

- 1) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за повышенного содержания железа в шихте

$$\Delta\Pi_{\text{Fe}} = (\text{Fe}_2 - \text{Fe}_1) \cdot \delta_{\text{Fe}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (19)$$

где  $\delta_{\text{Fe}}$  – повышение производительности (%) при увеличении содержания железа на 1 % в зависимости от Fe, %:

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| при $\text{Fe}_1 \leq 50 \%$    | $\delta_{\text{Fe}} = 2,4 \%$ (см. приложение Б); |
| при $\text{Fe}_1$ от 50 до 55 % | $\delta_{\text{Fe}} = 2,0 \%$ ;                   |
| при $\text{Fe}_1 \geq 55 \%$    | $\delta_{\text{Fe}} = 1,7 \%$ ;                   |

- 2) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за пониженного расхода известняка

$$\Delta\Pi_{\text{И}} = 0,1 \cdot (\text{И}_1 - \text{И}_2) \cdot \delta_{\text{И}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (20)$$

где  $\delta_{\text{И}}$  – повышение производительности (%) при снижении расхода известняка на 10 кг/т чугуна (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{\text{И}} = 0,5 \%$ );

- 3) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за пониженного содержания мелочи в скиповом сырье

$$\Delta\Pi_{\text{М}} = (\text{М}_1 - \text{М}_2) \cdot \delta_{\text{М}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (21)$$

где  $\delta_{\text{М}}$  – повышение производительности (%) при снижении содержания мелочи в скиповом сырье на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{\text{М}} = 1,0 \%$ );

- 4) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за пониженного содержания золы в коксе

$$\Delta\Pi_A = (A_1^c - A_2^c) \cdot \delta_A \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (22)$$

где  $\delta_A$  – повышение производительности (%) при снижении содержания золы в коксе на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_A = 1,3$  %);

5) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за пониженного содержания серы в коксе

$$\Delta\Pi_S = (S_1^c - S_2^c) \cdot \delta_S \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (23)$$

где  $\delta_S$  – повышение производительности (%) при снижении содержания серы в коксе на 1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_S = 3$  %);

6) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за снижения содержания кремния в чугуне

$$\Delta\Pi_{[Si]} = 10 \cdot ([Si]_1 - [Si]_2) \cdot \delta_{[Si]} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (24)$$

где  $\delta_{[Si]}$  – повышение производительности (%) при снижении содержания кремния в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{[Si]} = 1,2$  %);

7) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за снижения содержания марганца в чугуне

$$\Delta\Pi_{[Mn]} = 10 \cdot ([Mn]_1 - [Mn]_2) \cdot \delta_{[Mn]} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (25)$$

где  $\delta_{[Mn]}$  – повышение производительности (%) при снижении содержания марганца в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{[Mn]} = 0,2$  %);

8) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за снижения содержания фосфора в чугуне

$$\Delta\Pi_{[P]} = 10 \cdot ([P]_1 - [P]_2) \cdot \delta_{[P]} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (26)$$

где  $\delta_{[P]}$  – повышение производительности (%) при снижении содержания фосфора в чугуне на 0,1 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{[P]} = 1,2$  %);

- 9) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за получения чугуна с повышенным содержанием серы

$$\Delta\Pi_{[S]} = 100 \cdot ([S]_2 - [S]_1) \cdot \delta_{[S]} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (27)$$

где  $\delta_{[S]}$  – повышение производительности (%) при повышении содержания серы в чугуне на 0,01 % (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{[S]} = 1,0$  %);

- 10) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за повышенной температуры дутья

$$\Delta\Pi_{t_{д}} = (t_{д2} - t_{д1}) \cdot \delta_{t_{д}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (28)$$

где  $\delta_{t_{д}}$  – повышение производительности (%) при увеличении температуры дутья на 1 °С в зависимости от  $O_{2д}$ , %:

при $O_{2д1} < 25\%$	$\delta_{t_{д}} = 0,05$ % при $t_{д1} < 900$ °С (см. приложение Б);
	$\delta_{t_{д}} = 0,04$ % при $t_{д1} = 901-1000$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,03$ % при $t_{д1} = 1001-1100$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,028$ % при $t_{д1} = 1101-1200$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,025$ % при $t_{д1} = 1201-1300$ °С;
при $O_{2д1} \geq 25\%$	$\delta_{t_{д}} = 0,04$ % при $t_{д1} < 900$ °С (см. приложение Б);
	$\delta_{t_{д}} = 0,03$ % при $t_{д1} = 901-1000$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,025$ % при $t_{д1} = 1001-1100$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,022$ % при $t_{д1} = 1101-1200$ °С;
	$\delta_{t_{д}} = 0,020$ % при $t_{д1} = 1201-1300$ °С;

- 11) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за повышенного содержания кислорода в дутье

$$\Delta\Pi_{O_{2д}} = (O_{2д2} - O_{2д1}) \cdot \delta_{O_{2д}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (29)$$

где  $\delta_{O_{2д}}$  – повышение производительности (%) при повышении содержания кислорода в дутье на 1 % абс. в зависимости от  $O_{2д}$ , %:

при $O_{2д1} < 25$ %	$\delta_{O_{2д}} = 2,4$ %;
при $O_{2д1}$ от 25 до 30 %	$\delta_{O_{2д}} = 2,1$ %;
при $O_{2д1}$ от 30 до 35 %	$\delta_{O_{2д}} = 1,8$ %;
при $O_{2д1}$ от 35 до 40 %	$\delta_{O_{2д}} = 1,6$ %;

12) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за повышенного давления газа на колошнике

$$\Delta\Pi_{P_{\text{кг}}} = 100 \cdot (P_{\text{кг}2} - P_{\text{кг}1}) \cdot \delta_{P_{\text{кг}}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (30)$$

где  $\delta_{P_{\text{кг}}}$  – повышение производительности (%) при увеличении давления газа на колошнике на 1 кПа (0,01 ати) –  $\delta_{P_{\text{кг}}} = 0,1 \%$  (Приложение Б);

13) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) из-за снижения количества текущих простоев

$$\Delta\Pi_{\text{ПР}} = (\text{ПР}_1 - \text{ПР}_2) \cdot \delta_{\text{ПР}} \cdot \frac{\Pi_1}{100}, \quad (31)$$

где  $\delta_{\text{ПР}}$  – перерасход кокса (%) при повышении количества простоев на 1% (в соответствии с приложением Б –  $\delta_{\text{ПР}} = 1,5\%$ );

14) общее повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) по всем факторам

$$\Delta\Pi = (\Pi_2 - \Pi_1); \quad (32)$$

15) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут), обусловленное объективными техническими и технологическими причинами

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_{\Sigma} = \sum (\Delta\Pi_{\text{Fe}} + \Delta\Pi_{\text{И}} + \Delta\Pi_{\text{М}} + \Delta\Pi_{\text{А}} + \Delta\Pi_{\text{S}} + \Delta\Pi_{[\text{Si}]} + \Delta\Pi_{[\text{Mn}]} + \\ + \Delta\Pi_{[\text{P}]} + \Delta\Pi_{[\text{S}]} + \Delta\Pi_{t_{\text{д}}} + \Delta\Pi_{\text{O}_{2\text{д}}} + \Delta\Pi_{P_{\text{кг}}} + \Delta\Pi_{\text{ПР}}); \end{aligned} \quad (33)$$

16) «приведенная» производительность в «сравнительный» период

$$\Pi_2^{\text{пр}} = \Pi_2 - \Delta\Pi_{\Sigma}; \quad (34)$$

17) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) по причинам организационного характера

$$\Delta\Pi_2^{\text{орг}} = \Delta\Pi - \Delta\Pi_{\Sigma}. \quad (35)$$

Результаты расчетов представляют в виде таблицы 4.

Таблица 4 – Анализ влияния различных факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи в «сравнительном» (период II) периоде относительно показателей, достигнутых в «базовом» (период I) периоде

Наименование показателя	Уровень факторов		Изменение показателей	
	Величина по периодам		Расход кокса, кг/т	Производительность, т/сут
	I	II		
Производительность, т/сутки	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub>	-	-
Расход кокса, кг/т чугуна	К <sub>1</sub>	К <sub>2</sub>	-	-
Простои % к номинальному времени	Пр <sub>1</sub>	Пр <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{пр}}$	$\Delta П_{\text{пр}}$
Выход шлака, кг/т чугуна	Ш <sub>1</sub>	Ш <sub>2</sub>	-	-
Содержание железа в шихте, %	Fe <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{Fe}}$	$\Delta П_{\text{Fe}}$
Содержание мелочи в скиповом сырье, %	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{M}}$	$\Delta П_{\text{M}}$
Расход известняка, кг/т чугуна	И <sub>1</sub>	И <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{И}}$	$\Delta П_{\text{И}}$
Параметры дутья: расход, м <sup>3</sup> /мин	Qд <sub>1</sub>	Qд <sub>2</sub>	-	-
температура, °C	tд <sub>1</sub>	tд <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{тд}}$	$\Delta П_{\text{тд}}$
содержание кислорода, %	O <sub>2д1</sub>	O <sub>2д2</sub>	$\Delta K_{\text{O}_{2д}}$	$\Delta П_{\text{O}_{2д}}$
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	ПГ <sub>1</sub>	ПГ <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{ПГ}}$	-
Давление газа на колошнике, ати	Pкг <sub>1</sub>	Pкг <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{Pкг}}$	$\Delta П_{\text{Pкг}}$
Содержание в чугуне, %: Si	[Si] <sub>1</sub>	[Si] <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{[Si]}}$	$\Delta П_{\text{[Si]}}$
Mn	[Mn] <sub>1</sub>	[Mn] <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{[Mn]}}$	$\Delta П_{\text{[Mn]}}$
S	[S] <sub>1</sub>	[S] <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{[S]}}$	$\Delta П_{\text{[S]}}$
P	[P] <sub>1</sub>	[P] <sub>2</sub>	$\Delta K_{\text{[P]}}$	$\Delta П_{\text{[P]}}$
Содержание серы в коксе, %	A <sub>1</sub> <sup>c</sup>	A <sub>2</sub> <sup>c</sup>	$\Delta K_{\text{A}}$	$\Delta П_{\text{A}}$
Содержание золы в коксе, %	S <sub>1</sub> <sup>c</sup>	S <sub>2</sub> <sup>c</sup>	$\Delta K_{\text{S}}$	$\Delta П_{\text{S}}$
Изм-е показателей по всем факторам	-	-	$\Delta K$	$\Delta П$
Изменение показателей по техническими и технологическими причинами	-	-	$\Delta K_{\Sigma}$	$\Delta П_{\Sigma}$
Изменение показателей по организационным причинам	-	-	$\Delta K_2^{\text{орг}}$	$\Delta П_2^{\text{орг}}$
«Приведенный» расход кокса, кг/т	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub> <sup>пр</sup>	-	-
«Приведенная» произв., т/сут	П <sub>1</sub>	П <sub>2</sub> <sup>пр</sup>	-	-

### 3 Пример проведения анализа эффективности работы доменной печи по производственным данным

Для выполнения расчета необходимо располагать определенным минимумом исходных данных, которые студент получает из приложений А и Б в соответствии с номером своего варианта. Вариант задания соответствует номеру по алфавитному списку учебной группы.

В приложении А приведены результаты работы доменной печи №4 АО «Уральская Сталь» в «базовом» и «сравнительных» периодах по вариантам. В приложении Б представлены данные по влиянию качества шихты и технологических факторов на производительность доменной печи и удельный расход кокса.

Остальные, необходимые для расчета, данные выбираются самостоятельно, руководствуясь справочной литературой или практикой работы современных доменных печей.

В качестве примера ниже приведен расчет влияния параметров доменной плавки на удельный расход кокса и производительность доменной печи № 4 АО «Уральская Сталь» в «сравнительный» период по отношению к «базовому» периоду работы доменной печи. Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.

Как следует из таблицы 3, «сравнительный» период работы доменной печи №4 характеризовался, по отношению к «базовому», более высоким расходом кокса и пониженной производительностью. Цель настоящего расчета проанализировать причины этого и установить «приведенные» показатели работы доменной печи в «сравнительном» периоде, позволяющие адекватно сопоставлять производственные данные.

Расчет проводится по алгоритму, приведенному в п. 2 настоящих указаний.

#### 3.1 Определение перерасхода кокса в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым»

Перерасход кокса в «сравнительном» (период II) периоде по сравнению с «базовым» (период I) по различным причинам составил, кг/т чугуна:

1) из-за пониженного содержания железа в шихте

$$\Delta K_{Fe} = (57,6 - 55,0) \cdot 1,0 \cdot \frac{433}{100} + (55,0 - 54,7) \cdot 1,2 \cdot \frac{433}{100} = 12,82 \text{ кг / т};$$

2) из-за повышенного расхода известняка

$$\Delta K_{И} = 0,1 \cdot (4 - 0) \cdot 0,5 \cdot \frac{433}{100} = 0,87 \text{ кг / т};$$

3) из-за повышенного содержания мелочи в скиповом сырье

$$\Delta K_M = (13,1 - 13,3) \cdot 0,5 \cdot \frac{433}{100} = -0,43 \text{ кг / т};$$

4) из-за повышенного содержания золы в коксе

$$\Delta K_A = (12,7 - 12,4) \cdot 1,3 \cdot \frac{433}{100} = 1,69 \text{ кг / т};$$

5) из-за повышенного содержания серы в коксе

$$\Delta K_S = (0,56 - 0,52) \cdot 3,0 \cdot \frac{433}{100} = 0,52 \text{ кг / т};$$

6) из-за повышенного содержания кремния в чугуне

$$\Delta K_{[Si]} = 10 \cdot (0,52 - 0,54) \cdot 1,2 \cdot \frac{433}{100} = -1,04 \text{ кг / т};$$

7) из-за повышенного содержания марганца в чугуне

$$\Delta K_{[Mn]} = 10 \cdot (0,14 - 0,20) \cdot 0,2 \cdot \frac{433}{100} = -0,52 \text{ кг / т};$$

8) из-за повышенного содержания фосфора в чугуне

$$\Delta K_{[P]} = 10 \cdot (0,04 - 0,05) \cdot 1,2 \cdot \frac{433}{100} = -0,52 \text{ кг / т};$$

9) из-за получения чугуна с пониженным содержанием серы

$$\Delta K_{[S]} = 100 \cdot (0,013 - 0,010) \cdot 1,0 \cdot \frac{433}{100} = 1,30 \text{ кг / т};$$

10) из-за пониженной температуры дутья

$$\Delta K_{\text{тд}} = (1068 - 1090) \cdot 0,025 \cdot \frac{433}{100} = -2,38 \text{ кг / т};$$

11) из-за повышенного содержания кислорода в дутье

$$\Delta K_{O_{2д}} = (25 - 25,2) \cdot 0,3 \cdot \frac{433}{100} + (22,5 - 25,0) \cdot 0,2 \cdot \frac{433}{100} = -2,42 \text{ кг / т};$$

12) из-за пониженного расхода природного газа

$$\Delta K_{\text{ПГ}} = (94 - 64) \cdot 0,8 = 24,0 \text{ кг / т};$$

13) из-за пониженного давления газа на колошнике

$$\Delta K_{P_{\text{кг}}} = 100 \cdot (0,74 - 0,88) \cdot 0,02 \cdot \frac{433}{100} = -1,21 \text{ кг / т};$$

14) из-за увеличения количества текущих простоев

$$\Delta K_{\text{ПР}} = (1,49 - 1,88) \cdot 0,5 \cdot \frac{433}{100} = -0,84 \text{ кг / т};$$

15) общий перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) по всем факторам

$$\Delta K = (454 - 433) = 21,0;$$



16) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна), обусловленный объективными техническими и технологическими причинами

$$\Delta K_{\Sigma} = \sum (12,82 + 0,87 - 0,43 + 1,69 + 0,52 - 1,04 - 0,52 - 0,52 + 1,3 - 2,38 - 2,42 + 24 - 1,21 - 0,84) = 31,82 \text{ кг / т};$$

17) «приведенный» расход кокса в «сравнительный» период

$$K_2^{\text{пр}} = 454 - 31,82; = 422,18 \text{ кг / т};$$

18) перерасход кокса в периоде II по сравнению с периодом I (кг/т чугуна) по организационным причинам

$$\Delta K_2^{\text{орг}} = 21 - 31,82 = -10,82 \text{ кг / т}.$$

### 3.2 Расчет роста производительности доменной печи в «сравнительном» периоде по сравнению с «базовым»

Рост производительности печи в «сравнительном» (период II) периоде по сравнению с «базовым» (период I) по различным причинам составил, т/сут:

1) из-за повышенного содержания железа в шихте

$$\Delta \Pi_{\text{Fe}} = (55,0 - 57,6) \cdot 1,7 \cdot \frac{3207}{100} + (54,7 - 55,0) \cdot 2,0 \cdot \frac{3207}{100} = -160,99 \text{ т / сут};$$

2) из-за пониженного расхода известняка

$$\Delta \Pi_{\text{И}} = 0,1 \cdot (0 - 4) \cdot 0,5 \cdot \frac{3207}{100} = -6,41 \text{ т / сут};$$

3) из-за пониженного содержания мелочи в скиповом сырье

$$\Delta \Pi_{\text{М}} = (13,3 - 13,1) \cdot 1,0 \cdot \frac{3207}{100} = 6,41 \text{ т / сут};$$

4) из-за пониженного содержания золы в коксе

$$\Delta \Pi_{\text{А}} = (12,4 - 12,7) \cdot 1,3 \cdot \frac{3207}{100} = -12,51 \text{ т / сут};$$

5) из-за пониженного содержания серы в коксе

$$\Delta \Pi_{\text{S}} = (0,52 - 0,56) \cdot 3,0 \cdot \frac{3207}{100} = -3,85 \text{ т / сут};$$

6) из-за снижения содержания кремния в чугуне

$$\Delta \Pi_{[\text{Si}]} = 10 \cdot (0,54 - 0,52) \cdot 1,2 \cdot \frac{3207}{100} = 7,7 \text{ т / сут};$$

7) из-за снижения содержания марганца в чугуне

$$\Delta \Pi_{[\text{Mn}]} = 10 \cdot (0,20 - 0,14) \cdot 0,2 \cdot \frac{3207}{100} = 3,85 \text{ т / сут};$$

8) из-за снижения содержания фосфора в чугуне

$$\Delta\Pi_{[P]} = 10 \cdot (0,05 - 0,04) \cdot 1,2 \cdot \frac{3207}{100} = 3,85 \text{ т / сут};$$

9) из-за получения чугуна с повышенным содержанием серы

$$\Delta\Pi_{[S]} = 100 \cdot (0,010 - 0,013) \cdot 1,0 \cdot \frac{3207}{100} = -9,62 \text{ т / сут};$$

10) из-за повышенной температуры дутья

$$\Delta\Pi_{t_d} = (1090 - 1068) \cdot 0,025 \cdot \frac{3207}{100} = 17,64 \text{ т / сут};$$

11) из-за повышенного содержания кислорода в дутье

$$\Delta\Pi_{O_{2d}} = (25 - 25,2) \cdot 2,1 \cdot \frac{3207}{100} + (22,5 - 25) \cdot 2,4 \cdot \frac{3207}{100} = 205,89 \text{ т / сут};$$

12) из-за повышенного давления газа на колошнике

$$\Delta\Pi_{P_{кг}} = 100 \cdot (0,88 - 0,74) \cdot 0,1 \cdot \frac{3207}{100} = 44,9 \text{ т / сут};$$

13) из-за снижения количества текущих простоев

$$\Delta\Pi_{ПР} = (1,88 - 1,49) \cdot 1,5 \cdot \frac{3207}{100} = 18,76 \text{ т / сут};$$

14) общее повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) по всем факторам

$$\Delta\Pi = (3143 - 3207) = -64 \text{ т / сут};$$

15) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут), обусловленное объективными техническими и технологическими причинами

$$\Delta\Pi_{\Sigma} = \sum(-160,99 - 6,41 + 6,41 - 12,51 - 3,85 + 7,7 + 3,85 + 3,85 - 9,62 + 17,64 - 205,89 + 44,9 + 18,76) = -296,17 \text{ т / сут};$$

16) «приведенная» производительность в «сравнительный» период

$$\Pi_2^{пр} = 3143 - (-296,17) = 3439,17 \text{ т / сут};$$

17) повышение производительности печи в периоде II по сравнению с периодом I (т/сут) по причинам организационного характера

$$\Delta\Pi_2^{орг} = -64 - (-296,17) = 232,17 \text{ т / сут}.$$

Результаты расчетов по анализу эффективности работы доменной печи (по данным таблицы 3), представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Анализ влияния различных факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи в «сравнительном» (период II) периоде относительно показателей, достигнутых в «базовом» (период I) периоде

Наименование показателя	Уровень факторов		Изменение показателей в периоде II*	
	по периодам		Расход кокса, кг/т	Произв., т/сут
	I	II		
Производительность, т/сутки	3207	3143	-	-
Расход кокса, кг/т чугуна	433	454	-	-
Простои % к номинальному времени	1,88	1,49	-0,84	+18,76
Выход шлака, кг/т чугуна	320	385	-	-
Содержание железа в шихте, %	57,6	54,7	+12,82	-160,99
Содержание мелочи в скиповом сырье, %	13,3	13,1	-0,43	+6,41
Расход известняка, кг/т чугуна	0	4	+0,87	-6,41
Параметры дутья: расход, м <sup>3</sup> /мин	2886	3095	-	-
температура, °С	1068	1090	-2,38	+17,64
содержание кислорода, %	25,2	22,5	-2,42	-205,89
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	94	64	+24,00	-
Давление газа на колошнике, ати	0,74	0,88	-1,21	+44,9
Содержание в чугуне, %:				
Si	0,54	0,52	-1,04	+7,7
Mn	0,2	0,14	-0,52	+3,85
S	0,013	0,01	+1,30	-9,62
P	0,05	0,04	-0,52	+3,85
Содержание серы в коксе, %	0,52	0,56	+0,52	-3,85
Содержание золы в коксе, %	12,4	12,7	+1,69	-12,51
Изменение показателей по всем факторам	-	-	+21,00	-64,00
Изменение показателей по техническими и технологическими причинами	-	-	+31,82	-296,17
Изменение показателей по организационным причинам	-	-	-10,82	+232,17
«Приведенный» расход кокса, кг/т	433	422,18	-	-
«Приведенная» производительность, т/сут	3207	3439,17	-	-
* знак «+» показывает увеличение показателя, знак «-» - уменьшение				

Из таблицы 5 следует, что в «сравнительном» периоде расход кокса возрос по отношению к «базовому» в основном из-за пониженного расхода природного газа и содержания железа в шихте. При этом за счет улучшения организации работы печи удалось существенно уменьшить неблагоприятное изменение влияющих на удельный расход кокса факторов. Благодаря этому

«приведенный» расход кокса «сравнительного» периода составил 422,18 кг/т чугуна, что на 10,82 кг/т меньше, чем в базовом периоде.

Организация работы печи включает: выбор режима загрузки в зависимости от условий, выбор интенсивности дутья (расхода дутья), соответствие параметров дутья и загрузки друг другу, адекватность, качество и периодичность контроля (сырья, топлива, продуктов плавки, технологических параметров), стабильность химического состава и свойств сырья и топлива, соблюдение режима отработки продуктов плавки, стабильность технологических параметров, степень заполнения бункеров, качество заправочных материалов, уровень проведения ремонтных и профилактических работ и др.

Производительность доменной печи в «сравнительном» периоде была ниже на 64 т/сут, чем в «базовом» главным образом из-за понижения концентрации кислорода в дутья и снижения содержания железа в шихте (см. таблицу 5). Суммарное влияние указанных факторов привело к потере более чем 300 т чугуна в сутки. За счет грамотной организации работы печи, а также повышения давления газов под колошником и уменьшения времени текущих простоев, удалось практически полностью компенсировать потери производительности печи. В результате «приведенная» производительность доменной печи в «сравнительный» период составила 3439,17 т/сут, что на 232,17 т/сут больше производительности «базового» периода.

На основании проведенного анализа, можно сделать вывод о грамотной организации работы персонала доменной печи №4 в «сравнительном» периоде по отношению к «базовому».

#### **4 Оформление контрольной работы/домашнего задания**

Контрольная работа/домашнее задание оформляется в соответствии с действующими в НФ НИТУ «МИСиС» правилами оформления пояснительной записки выпускной квалификационной работы, находящимися в свободном доступе по адресу: [http://nf.misis.ru/download/gisen/Oformlenie\\_VKR.pdf](http://nf.misis.ru/download/gisen/Oformlenie_VKR.pdf). Оформление заголовков, списка использованных источников и таблиц показано в тексте данных методических указаний. Контрольная работа/домашнее задание должна состоять из следующих частей: титульный лист, задание (исходные данные), содержание, введение, анализ эффективности работы доменной печи по производственным данным, заключение, список использованных источников.

В разделе «Введение» формулируются основные задачи, решаемые при выполнении работы. Здесь следует указать основные технологические параметры, которые необходимо определить, а также их влияние на показатели доменной плавки.

Раздел «Анализ эффективности работы доменной печи по производственным данным» выполняется в соответствии с пунктами 1-3 данных методических указаний.

В разделе «Заключение» излагаются основные причины успешной или неудовлетворительной работы доменной печи в анализируемый период и приводятся рекомендации по улучшению показателей доменной плавки.

#### **Список использованных источников**

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 768 с.
2. Логинов В.И., Глущенко И.М., Бехтер Е.И. Повышение эффективности использования кокса в народном хозяйстве. – М.: Металлургия, 1986. – 160с.
3. Товаровский И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Металлургия, 1987. – 387с.
4. Волков Ю.П., Шпарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог-доменщик. – М.: Металлургия, 1986. – 282с.
5. Федулов Ю.В. Оптимизация хода доменной плавки. – М.: Металлургия, 1989. – 153с.
6. Сibaгатуллин С.К. Анализ причин изменения расхода кокса и производительности доменной печи по производственным данным: Методические указания к курсовой работе. – Магнитогорск: МГМИ. 1991. – 30с.

**Приложение А**  
**Варианты индивидуальных заданий**

Показатели работы доменной печи №4 АО «Уральская Сталь» в «базовый» и «сравнительные» периоды															
«базовый» период	«сравнительные» периоды по вариантам														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3207	3211	3348	3008	3323	3421	3450	3447	3528	3451	2984	3008	3455	3162	3183	3529
433	478	466	447	458	452	449	439	463	468	479	464	443	443	470	446
1,88	0,4	0,28	2,72	1,3	3,88	0,94	1,08	1,03	1,22	1,19	1,75	1,14	1,95	3,15	3,75
320	394	376	424	435	431	427	431	416	416	391	384	373	375	383	391
57,6	54,7	57,3	56,5	56,0	55,9	56,5	56	56,2	55,9	54,4	55,2	53,9	54,9	56,1	56,2
13,3	12,2	11,4	11,4	11,1	11,2	12,5	12,2	11,6	11,7	11,1	11,2	11,7	10,5	10,4	10,3
0	15	13	28	0	8	8	0	0	0	22	0	0	16	12	0
2886	3204	3334	3242	3189	3346	3417	3313	3300	3254	3163	2958	2930	2697	2822	2705
1068	1112	1131	1109	1120	1115	1121	1123	1134	1116	1113	1073	1093	1138	1094	1132
25,2	25,9	25,5	24,8	26,0	25,3	25,7	27,3	27,5	27,8	29,3	24	24,9	24,6	25,2	26,3
94	108	106	117	101	102	101	108	98	93	112	105	107	79	87	93
0,74	0,98	1,02	0,94	0,93	0,97	1,00	1,00	1,04	1,05	1,01	0,99	0,95	0,67	0,91	1,08
0,54	0,54	0,53	0,66	0,48	0,5	0,47	0,45	0,39	0,45	0,46	0,46	0,48	0,52	0,66	0,52
0,2	0,1	0,1	0,1	0,14	0,12	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,15	0,2	0,18
0,013	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05
0,52	0,60	0,64	0,60	0,52	0,64	0,56	0,56	0,60	0,56	0,52	0,56	0,52	0,48	0,60	0,52
12,4	13,7	13,4	12,8	13,1	13,0	12,9	12,6	13,3	13,4	13,7	13,3	12,7	12,7	13,5	12,8

Наименование показателя
Производительность, т/сутки
Расход кокса, кг/т чугуна
Простои % к номинальному времени
Выход шлака, кг/т чугуна
Содержание железа в шихте, %
Содержание мелочи в скиповом сырье, %
Расход известняка, кг/т чугуна
Параметры дутья: расход, м <sup>3</sup> /мин
температура, °С
содержание кислорода, %
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т
Давление газа на колошнике, ати
Содержание в чугуне, %:
Si
Mn
S
P
Содержание серы в коксе, %
Содержание золы в коксе, %

**продолжение приложения А**

Наименование показателя	Показатели работы доменной печи №4 АО «Уральская Сталь» в «базовый» и «сравнительные» периоды															
	«базовый» период	«сравнительные» периоды по вариантам														
		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Производительность, т/сутки	3207	3415	3874	3654	3668	3541	3420	3341	3288	3362	3291	3544	3185	3412	3543	
Расход кокса, кг/т чугуна	433	469	489	447	446	455	460	444	453	435	445	452	435	459	444	
Простой % к номинальному времени	1,88	0,53	0	2,13	0,67	0,56	0,6	0,86	0,63	0,4	1,91	0,2	1,49	1,19	1,19	
Выход шлака, кг/т чугуна	320	391	393	373	380	399	403	386	414	386	374	376	383	381	375	
Содержание железа в шихте, %	57,6	57,6	58,7	58,8	58,0	55,9	54,8	53,8	54,2	54,3	54	55,7	55,8	56,6	56,7	
Содержание мелочи в скиповом сырье, %	13,3	10,7	10,3	11,7	12,3	12,7	13,6	13,4	13,7	12,7	12,5	12,3	12,7	13,1	13,1	
Расход известняка, кг/т чугуна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Параметры дутья: расход, м <sup>3</sup> /мин	2886	3258	3380	3254	3159	3182	3068	2958	2671	3057	3139	3211	3054	3191	3295	
температура, °С	1068	1111	1103	1095	1093	1099	1103	1106	1108	1108	1097	1093	1092	1091	1090	
содержание кислорода, %	25,2	25,1	27,4	23,1	24,5	24,5	24,3	24,8	24,1	23,9	24,1	23,2	22,7	22,4	22,5	
расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	94	87	77	72	79	78	80	88	92	93	90	82	79	71	64	
Давление газа на колошнике, ати	0,74	1,07	1,14	1,14	1,06	1,02	1,06	0,99	1	1,06	1,1	1,09	1,01	1,04	1,08	
Содержание в чугуне, %:	0,54	0,48	0,44	0,46	0,46	0,43	0,43	0,43	0,46	0,53	0,55	0,5	0,54	0,54	0,52	
Si	0,2	0,15	0,15	0,12	0,15	0,12	0,11	0,12	0,14	0,15	0,15	0,13	0,16	0,15	0,14	
Mn	0,013	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	
S	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,046	0,05	0,04	
P	0,52	0,56	0,56	0,60	0,56	0,56	0,52	0,52	0,56	0,52	0,44	0,56	1,04	0,52	0,56	
Содержание серы в коксе, %	12,4	12,5	13,5	12,8	12,8	13,0	13,2	12,7	13,0	12,5	12,8	13,0	12,5	13,2	12,7	
Содержание золы в коксе, %																



**Приложение Б**  
**Влияние качества шихты и технологических факторов на**  
**производительность доменной печи и удельный расход кокса**

Наименование параметров	Изменение, %*	
	расход кокса	производительность
1	2	3
Повышение содержания Fe на 1 % в железорудной части в пределах:		
до 50 %	-1,4	+2,4
50-55 %	-1,2	+2
55-60 %	-1,0	+1,7
Повышение расхода металлодобавок на 10 кг/т	-0,3	+0,5
Уменьшение расхода сырого известняка на 10 кг/т	-0,5	+0,5
Уменьшение содержания мелочи в скиповом сырье на 1 %	-0,5	+1
Уменьшение содержания золы в коксе на 1 %	-1,3	+1,3
Уменьшение содержания серы в коксе на 1 %	-3,0	+3,0
Повышение прочности кокса по M25 на 1 %	-0,6	+0,6
Уменьшение истираемости кокса по M10 на 1 %	-2,8	+2,8
Уменьшение содержания Si в чугуне на 0,1 %	-1,2	+1,2
Уменьшение содержания Mn в чугуне на 0,1 %	-0,2	+0,2
Уменьшение содержания S в чугуне на 0,01 %	-1,0	+1,0
Уменьшение содержания P в чугуне на 0,1 %	-1,2	+1,2
Повышение температуры дутья на каждые 1 °С при O <sub>2</sub> в дутье до 25 %		
800-900	-0,05	+0,05
901-1000	-0,04	+0,04
1001-1100	-0,03	+0,03
1101-1200	-0,028	+0,028
1201-1300	-0,025	+0,025
при O <sub>2</sub> в дутье >25%		
800-900	-0,04	+0,04
900-1000	-0,03	+0,03
1000-1100	-0,025	+0,025
1101-1200	-0,022	+0,022
1201-1300	-0,02	+0,02

**продолжение приложения Б**

1	2	3
Обогащение дутья кислородом на 1% абс. при концентрации O <sub>2</sub> :		
до 25 %	+0,2	+2,4
25-30 %	+0,3	+2,1
30-35 %	+0,4	+1,8
35-40 %	+0,5	+1,6
Коэффициент замены кокса природным газом при расходе газа:		
до 100 м <sup>3</sup> /т	+0,8	0
100-150 м <sup>3</sup> /т	+0,7	0
более 150 м <sup>3</sup> /т	+0,6	0
Повышение давления под колошником на 1 кПа	-0,02	+0,1
Уменьшение времени простоев на 1%	-0,5	+1,5
Уменьшение времени тихого хода на 1%	-0,5	+1,0
Уменьшение задержки выпусков на 1%	-0,05	+0,1
Уменьшение влажности дутья на 1 г/м <sup>3</sup> при расходе дутья, м <sup>3</sup> /т:		
1500-1600	-0,2	+0,1
1000-1100	-0,15	+0,07
* - знак «-» перед численным значением влияния параметров доменного процесса на его ТЭП означает уменьшение последних, знак «+» - повышение.		

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ  
ШАПОВАЛОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Методические указания  
для выполнения контрольной работы/домашнего задания  
по дисциплине «Металлургические технологии»  
для студентов направления 22.03.02 «Металлургия»,  
всех форм обучения

---

Подписано в печать  
22.06.2016 г.

Формат 60x90  $\frac{1}{16}$   
Рег. № 84

Печать цифровая  
Тираж 50 экз

Уч.-изд.л. 2,2

---

ФГАОУ ВО  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Новотроицкий филиал  
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.  
E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)  
Контактный тел. 8 (3537) 679729.