

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ «В ЦЕЛОМ» КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ДУПЛЕКС-ПРОЦЕССОМ ПЛАВКИ «ВАГРАНКА – МИКСЕР»

Дёмин Д. А.

### 1. Введение

Металлургические процессы относятся к числу сложных объектов управления. Это связано с тем, что в оценивании их состояния существуют неопределенности. Причины этого: сложность, а часто и невозможность измерения переменных состояния, мультиальтернативность в выборе конечного состояния и критериев качества управления, зачастую конфликтность таких критериев. Значительные трудности вызывает математическое описание этих процессов, так как получение адекватного описания связано с необходимостью строить математические модели объекта управления по малой выборке данных. Причем такие данные должны быть получены непосредственно в ходе технологических процессов, так как проведение лабораторных экспериментов является малоприменимым, учитывая специфику металлургических процессов и оборудования.

Несмотря на все эти объективные трудности, требования по качеству получаемой продукции должны неизменно соблюдаться, причем с учетом их неизменного ужесточения. Все это обуславливает актуальность исследований, направленных на поиск методов математического описания и оптимального, по выбранным критериям, управления такими процессами. В область такого поиска попадает и задача оценивания качества управления, в соответствии с принятой на конкретном промышленном предприятии системой управления технологическими процессами. К числу таких процессов относится и дуплекс-процесс «вагранка – миксер». Несмотря на то, что этот процесс не относится к числу широко распространенных, его исследование представляет интерес именно с точки зрения решения ряда проблем управления. Это объясняется тем, что управление металлургическими процессами, протекающие в каждой из этих печей, требует корректной постановки и решения задач на каждом этапе поиска оптимального управления. Это касается и оценивания начального состояния, и построения математической модели, и этапа описания конечного состояния, и выбора управления в условиях, имеющих место в этих типах печей:

- неопределенность в оценивании параметров теплообмена, теплоэнергетических характеристик и физико-химических процессов, протекающих в печах;
- наличие дрейфа характеристик процессов;
- невозможность измерения некоторых переменных состояния в режиме реального времени;
- значительная инерционность металлургических печей как объектов управления.

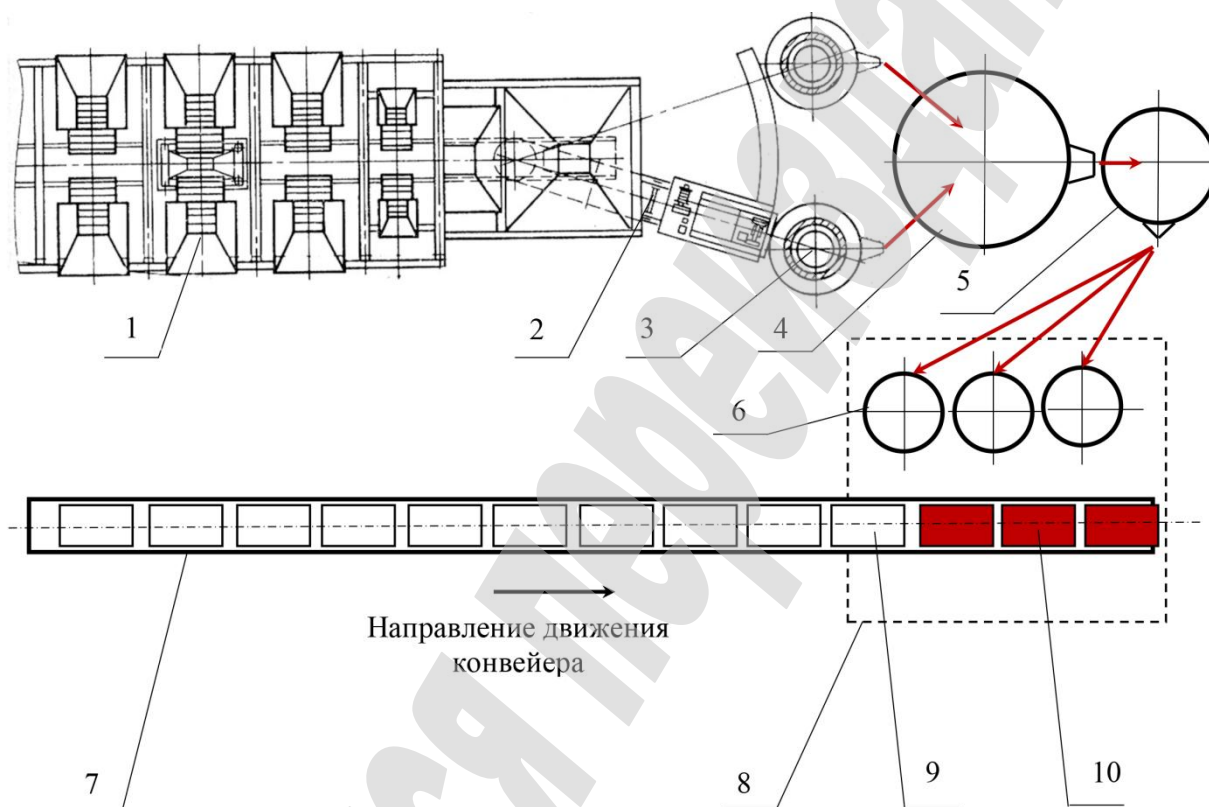
Поэтому проведение исследований, позволяющих преодолеть эти перечисленные трудности в любой их части, следует считать актуальными.

## 2. Объект исследования и его технологический аудит

### 2.1. Объект исследования и схема дуплекс-процесса плавки «вагранка – миксер»

Объектом исследования является управление дуплекс-процессом «вагранка – миксер», предметом исследования – качество системы управления плавкой «в целом». Под термином «в целом» далее будет пониматься, что оцениваются не отдельные операции управления, а возможность действующей в цехе системы управления обеспечивать заданные требования по качеству чугуна.

Схема дуплекс-процесса приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема дуплекс-процесса «вагранка – миксер»:

- 1 – раздаточная система загрузки шихты; 2 – скиповый подъемник;  
3 – вагранка; 4 – миксер; 5 – раздаточный ковш; 6 – разливочные ковши;  
7 – литейный конвейер; 8 – участок заливки; 9 – литейные формы, готовые под заливку; 10 – залитые формы

Принятая система управления включает в себя комплекс мероприятий по управлению ваграночной плавкой и термовременной обработкой, проводимой в миксере.

Участок оснащен двумя одинаковыми вагранками производительностью 5 т/ч каждая, работающих попеременно с учетом регламента проведения ремонтных работ.

### 2.2. Технологический аудит процесса управления ваграночной плавкой

Плавка ведется на участке, оборудованном двумя вагранками производительностью 5 т/ч каждая, работающих попеременно.

Техническая характеристика вагранки приведена в табл. 1.

Таблица 1

## Техническая характеристика вагранки

№ п/п	Наименование	Размерность	Характеристика
1	Производительность	т/ч	5
2	Способ загрузки	–	скиповый подъемник
3	Диаметр в свету	мм	900
4	Площадь сечения	мм <sup>2</sup>	0.636
5	Полезная высота (от оси нижнего ряда фурм до уровня завалочного окна)	мм	4234
6	Число фурм I ряда	–	6
7	Число фурм II ряда	–	6
8	Число фурм III ряда	–	6
9	Размер фурмы I ряда	мм×мм	200×125
10	Размер фурмы II ряда	мм×мм	70×50
11	Размер фурмы III ряда	мм×мм	70×50
12	Диаметр копильника	мм	820
13	Рабочая емкость копильника	м <sup>3</sup>	0.283
14	Высота от пода до шлаковой лётки копильника	мм	450
15	Высота от пода до оси фурм I ряда	мм	400
16	Диаметр шлаковой лётки	мм	50
17	Диаметр металлических лёток	мм	25
18	Количество металлических лёток	–	2
19	Сечение переходного окна	мм×мм	120×90
20	Масса загружаемой металлической колоши	кг	500
21	Масса холостой колоши	кг	900–930
22	Высота холостой колоши над верхней кромкой III ряда фурм	мм	550–600
23	Давление воздуха в фурменной коробке	мм. вод. ст.	600–650
24	Тип вентилятора	–	А-72-2 № 725766
25	Диаметр диафрагмы на вентиляторе	мм	220

Плавка осуществляется после подготовки вагранки к работе и розжига холостой колоши. Процесс розжига проводится в течение 2–3 часов. Высота холостой колоши замеряется мерным прутом. После разгорания кокса производится продувка холостой колоши в течение 2–3 мин, предварительно заделав рабочее окно. После продувки проверяется уровень холостой колоши и в случае, если он ниже заданного, составляющего 1250 мм, добавляется кокс. Загрузка кокса осуществляется скиповым подъемником.

Загрузка вагранки осуществляется скиповым подъемником. На холостую колошу заваливается известняк в количестве 12 кг, с целью ошлакования первых порций коксовой золы. Затем производится послойная загрузка материалов в следующей последовательности: металлическая колоша (500 кг), коксовая колоша (53–58 кг), флюс (16–17 кг). Флюс загружается в бункер весовой тележки непосредственно на топливную колошу, которая считается рабочей. Чтобы избежать соприкосновения известняка с футеровкой вагранки, его загружают в центральную часть бункера.

Компоненты металлической шихты загружаются в следующем порядке: чугун в чушках, лом чугунный, отходы собственного производства, лом стальной. Ферросилиций загружается на самый верх металлической колоши.

Описанная процедура загрузки считается регламентированной и соответствующей нормальному режиму работы вагранки.

После загрузки шихты до уровня завалочного окна и необходимой выдержки её для естественного прогрева первых металлических колош в течение 15–20 мин вагранка готова к плавке. Для начала плавки выполняются следующие операции:

1) открываются одна или две фурменные гляделки во избежание взрыва при включении дутья;

2) включается дутье, подача его регулируется шибером на воздухопроводе (давление должно составлять 580–630 мм. вод. ст.);

3) при появлении первых порций металла в копильнике металлическая летка заделывается формовочным составом.

В процессе плавки чугун из вагранки непрерывно поступает в копильник, из которого металл выдается в раздаточные ковши ёмкостью 2000 кг.

После каждого выпуска чугуна из копильника металлическая летка закрывается глиняной пробкой. Приблизительно через 15–20 мин после пуска дутья шлаковая лётка для спуска шлака закрывается и открывается в процессе плавки по мере необходимости. Предварительно включается подача воды на желоб, по которому шлак и вода направляются в приёмную яму. При соприкосновении шлака с водой происходит его грануляция. Гранулированный шлак из приёмной ямы периодически удаляется грейфером. При каждом открывании шлаковой летки дутье временно отключается.

Расплавленный шлак, спускаясь по стенке шахты, встречает у фурм холодный воздух, охлаждается, густеет и оседает на кусках кокса у фурм. Таким образом происходит намерзание шлака, которое приводит к уменьшению живого сечения фурм, по которым воздух попадает в шахту вагранки. Расход воздуха может при этом уменьшиться на 30–40 %, что приводит к снижению производительности вагранки и температуры чугуна.

Зашлакованные фурмы чистятся через фурменные смотровые окна с помощью лома, короткими ударами проталкивая зашлакованный кокс и наросты внутрь вагранки. Для более быстрого устранения зашлакования через завалочные окна засыпается плавиковый шпат в центр шахты в количестве до 5–6 кг.

Управление процессом ваграночной плавки осуществляется с целью обеспечения заданных показателей процесса – переменных состояния, которыми являются температура и химический состав чугуна. В процессе управления решаются следующие задачи:

- устранение зависания шихты;
- недопущение холодного хода вагранки;
- недопущение вынужденных остановок;
- недопущение местного разогрева кожуха;
- недопущение прорыва чугуна через под.

*Устранение зависания шихты.* Зависание ликвидируется ломом, вводя его в шихту через завалочное окно. Если зависание быстро устранить не удастся, прекращается

подача дутья. Крупное зависание шихты приводит к выгоранию холостой колоши, поэтому после устранения зависания в вагранку загружается дополнительная топливная колоша (коксовая пересыпка) в объеме до 2–3 рабочих коксовых колош.

*Холодный ход вагранки.* Главной причиной холодного хода вагранки является заниженная высота холостой колоши и некачественный её розжиг перед завалкой шихты. Для устранения холодного хода в вагранку загружается рабочая коксовая колоша (коксовая пересыпка) объемом 2–3 рабочих коксовых колош.

*Вынужденные остановки.* Причинами таких остановок может быть остановка литейного конвейера или авария оборудования. В этом случае для прекращения работы вагранки прекращается подача дутья, выпускается весь чугун и шлак, фурмы закрываются, летки заделываются свежей формовочной смесью, чтобы предотвратить подсос воздуха и остановить горение кокса.

*Местный разогрев кожуха.* Местный разогрев кожуха визуально определяется через местное его покраснение. Разогрев происходит вследствие выгорания или разрушения футеровки в зоне высоких температур, приводящих к тому, что раскаленные газы или непосредственно чугун и шлак соприкасаются с металлическим кожухом. Во избежание прожога кожуха на разогретое место направляется струя воды до тех пор, пока место разогрева не потемнеет. После этого работа вагранки продолжается, так как чугун, проникший к кожуху, затвердевает и становится защитой от дальнейшего повреждения.

*Прорыв чугуна через под.* Проникновение чугуна в стык подины с футеровкой возникает вследствие слабой набивки или набивке сухой формовочной землей. В таком случае на перегретое место, что определяется визуально по его покраснению, направляется струя воды.

Если прорыв чугуна происходит через днище, дутье прекращается и чугун выпускается. В образовавшееся вследствие прорыва отверстие вдавливается глина и снаружи наносится дополнительный слой глины, поддерживаемый металлической плиткой и подпираемой подпоркой.

Время окончания плавки определяется в зависимости от потребности в жидком металле и количества невыплавленного металла, находящегося в вагранке.

После загрузки последней колоши количество подаваемого воздуха поддерживается постоянным, для чего шибер на воздухопроводе постепенно закрывается.

О полном проплавлении шихты свидетельствует прекращение стекания капель чугуна у фурм. Если это происходит, то дутье останавливают, шибер закрывается полностью, а фурменные гляделки открываются во избежание взрыва. Из копильника выпускается весь металл и, открывая дверцу копильника, выпускается шлак.

В процессе ваграночной плавки контролю подлежат следующие технологические параметры:

- давление воздуха;
- температура жидкого металла;
- химический состав и механические свойства выплавляемого чугуна.

*Параметры и средства измерения давления воздуха.* Воздух, подаваемый в вагранку вентилятором, должен находиться под давлением выше атмосферного, чтобы преодолеть сопротивление столба шихтовых материалов. Избыточное

давление должно быть 600–650 мм. вод. ст. Для измерения давления дутья в фурменной коробке служит U-образный жидкостной манометр.

*Контроль температуры жидкого металла.* Измерение температуры жидкого металла производится на желобе вагранки и при заливке в форме оптическим пирометром излучения. Температура чугуна на желобе вагранки должна составлять  $\geq 1340$  °С.

*Контроль химического состава выплаваемого чугуна.* Контроль осуществляется экспресс-лабораторией. Заливка первой пробы на полный химический анализ проводится при 3-м–4-м выпуске металла из копильника. Последующие пробы отбираются через каждые 2 часа работы. Отбор проб на контроль содержания Si проводится через каждые 30 мин.

*Контроль механических свойств выплаваемого чугуна.* Контроль производится центральной заводской лабораторией по пробам на полный химический анализ.

### 2.3. Технологический аудит процесса управления термовременной обработкой в миксере

Жидкий чугун из вагранки подается в миксер (рис. 1), в качестве которого используется электродуговая печь ДЧМ-10 объемом 10 т. В нем осуществляется термовременная обработка расплава, имеющая целью доведение температуры чугуна до заданной (1370–1400 °С) и доведение химического состава до заданного, в соответствие с техническими условиями на чугун. Химический состав ваграночного чугуна, заливаемого в миксер, должен соответствовать следующему: С=3.2–3.5 %, Si=1.5–1.8 %, Mn=0.2–0.6 %, S=0.05–0.12 %, P не более 0.2 %, Cr=0.3–0.45 %, Ni=0.11–0.13 %, Cu=0.1–0.4 %, Ti=0.03–0.08 %. В миксере осуществляется перегрев и доводка по химическому составу по содержанию кремния до 2.3–2.5 %, марганца до 0.6–0.8 %.

Техническая характеристика электропечи-миксера ДЧМ-10 приведена в табл. 2.

**Таблица 2**

Техническая характеристика вагранки

№ п/п	Наименование	Размерность	Характеристика	Примечания
1	2	3	4	5
1	Емкость печи	т	10	по жидкому чугуну
2	Мощность трансформатора	кВА	2250	–
3	Напряжение низкой стороны трансформатора	В	150 125 105	с отклонениями $\pm 5\%$
4	Максимальный ток печи	А	10400	–
5	Число фаз	–	3	–
6	Частота тока	с <sup>-1</sup>	50	–
7	Диаметр электрода	мм	350	–
8	Диаметр распада электродов	мм	900	–
9	Ход электрода	мм	1200	–
10	Скорость перемещения электродов	м/мин	1.65	–
11	Диаметр ванны на уровне порога	мм	2350	–
12	Глубина ванны до порога	мм	560	–

**Продолжение таблицы 2**

1	2	3	4	5
13	Размеры рабочего окна	мм×мм	780×460	ширина×высота
14	Время наклона печи на 40°	с	56	минимальное
15	Удельный расход электроэнергии на подогрев чугуна	кВт·ч/т	105	при подогреве от 1400 до 1550 °С
16	Расход охлаждающей воды	м <sup>3</sup> /ч	15	–
17	Общий вес металлоконструкции печи	т	23.6	–

Подготовка миксера к работе включает в себя следующие операции:

1. Осмотр электродов и визуальная оценка соответствия их длины заданной. Длина электродов должна быть не менее 2.4 м. Короткие электроды наращиваются перед началом плавки. Наращивание электродов осуществляется на электрод, закрепленный в электрододержателе печи. Перед установкой в печь электроды выдерживаются в цехе в сухом месте не менее 10 суток. Наращивание выполняется следующим образом:

– в ниппельное гнездо наращиваемого электрода вворачивается до отказа графитовый ниппель;

– в ниппельное гнездо нового электрода вворачивается металлический ниппель, – новый электрод подводится мостовым краном к наращиваемому электроду;

– новый электрод опускается и наворачивается на графитовый ниппель до отказа, зазор между электродами не допускается;

– электрод раскрепляется в электрододержателе и мостовым краном опускается на необходимую глубину;

– электрод закрепляется в электрододержателе;

– удаляется металлический ниппель.

2. Очистка желобов миксера от наростов металла и шлака и подправка их футеровки.

3. Очистка и заправка порогов и загрузочного окна. Уплотнение заправочной массы осуществляется, начиная с внутренней стороны порога.

4. Перед включением напряжения проверяется состояние экономайзеров и водопроводных коммуникаций путем подачи воды в систему. При этом экономайзеры и водопроводная коммуникация не должны давать течи, а вода из сливных труб должна нормально поступать в приемную воронку.

5. Проверяется исправность заземления корпуса миксера внешним осмотром заземляющих шин на отсутствие разрывов (заземляющие шины окрашены в черный цвет).

6. Если миксер находится после капитального ремонта, осуществляется его разогрев. Для этого на подину напротив электродов укладывается 2–3 обгоревших куска графитизированных электродов и включается напряжение. В результате этого происходит сушка и разогрев футеровки до температуры 800–850 °С. Остатки электродов после разогрева миксера извлекаются через загрузочное окно.

Передача ваграночного чугуна в миксер и его перегрев осуществляется следующим образом:

1. Пустой разогретый барабанный ковш емкостью 2 т устанавливается мостовым краном на самоходную электротележку и перемещается к работающей вагранке.

2. Ковш наполняется чугуном, не доливая его на 1/7 объема.

3. Тележка с ковшом, заполненным расплавом ваграночного чугуна, перемещается в зону работы мостового крана, обслуживающего миксер.

4. Ковш снимается с тележки мостовым краном, подается к миксеру и металл сливается в миксер через сливной желоб загрузочного окна.

5. После слива в миксер двух тонн чугуна зеркало металла покрывается 1–2 лопатами сухого песка марки «КО2».

6. После слива в миксер 4–5 ковшей ваграночного чугуна производится перегрев металла до температуры 1370–1400 °С.

Корректировка химического состава осуществляется путем введения присадок, в зависимости от элемента химического состава, имеющего отклонения от заданного содержания, выпадающие за пределы поля допуска. Введение присадок является управляющим воздействием, имеющим целью перевести содержание элемента химического состава внутрь поля допуска. Такие управляющие воздействия приведены в табл. 3, 4.

**Таблица 3**

Количество и способ ввода присадок для снижения содержания элементов в чугуне

Наименование присадок	Количество присадки, кг на 1 т жидкого чугуна, вводимых в миксер ДЧМ-10					
	Si, %			Mn, %		Cr, %
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1
Лом стальной	12	25	38	42	84	74
Чугун передельный	26	51	76	83	166	148
–	При этом вносится Mn, %			При этом вносится Si, %		При этом вносится: Mn=0.17 % Si=0.1 %
	0.018	0.038	0.057	0.06	0.12	–

**Таблица 4**

Количество и способ ввода присадок для повышения содержания элементов в чугуне

Наименование присадок	Количество присадки, кг на 1 т жидкого чугуна, вводимых в миксер ДЧМ-10					
	Si, %	Mn, %	Cr, %	C, %	Ti, %	Cu, %
	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Ферросилиций ФС-25	4.4	–	–	–	–	–
Ферромарганец ФМн-70	–	1.3*	–	–	–	–
Феррохром	–	–	1.85	–	–	–
Чугун передельный	–	–	–	25	–	–
Чугун титаномедистый	–	–	–	–	13.3	36.3

**Примечание:** \* – дается на дно ковша

Доводка жидкого чугуна до заданного химического состава по марганцу (0.6–0.8) % проводится в ковше присадкой на дно ковша дробленого до фракции 1–10 мм просушенного доменного 70 %-го ферромарганца. Содержание в жидком чугуне кремния корректируется присадкой в миксер доменного 25 %-го ферросилиция.

При завышенном содержании серы (0.12–0.16) % проводится операция десульфурации. Для этого:



– на дно ковша дается прокаленная (влага  $\leq 0.5$  %) кальцинированная сода в количестве 6–10 кг/т жидкого;

– после заполнения чугуном ковша на  $1/3$  на зеркало металла дается дробленый до фракции 1–15 мм высушенный (влага  $\leq 0.5$  %) известняк в количестве 3–4 кг/т жидкого.

Контроль температуры расплава, выпускаемого из электропечи, осуществляется пирометром спектрального отношения «Спектропир-10», установленным в помещении пульта управления миксера ДЧМ-10. Температура выпускаемого металла должна быть в диапазоне 1370–1400 °С.

Для правильной организации перегрева ваграночного чугуна каждые две тонны жидкого чугуна, выпущенные из электропечи, восполняются заливкой новых порций ваграночного чугуна. Таким образом в ванне миксера постоянно держится 9–10 т металла.

Металл сливается в миксер и выпуск металла осуществляется из миксера только при снятом напряжении и поднятых электродах.

За шлаком в печи осуществляется постоянный контроль. Шлак должен быть жидким и покрывать все зеркало металла в ванне. При образовании вязких шлаков они скачиваются и наводится новый шлак присадкой сухого кварцевого песка.

Данные о ходе перегрева чугуна в миксере в каждой смене заносятся в шихтовый журнал, в частности фиксируются: химический состав, температура, механические свойства, количество перегретого чугуна и расход электроэнергии.

Окончание перегрева характеризуется следующими технологическими операциями:

1. После снятия напряжения шлак скачивается из печи, а оставшийся металл сливается в ковш.

2. Подина тщательно очищается от остатков шлака и металла. При наличии срывов подины и невозможности очистить её обычным путем от остатков жидкого металла, металл загущается сузим кварцевым песком и выгребается скребком через завалочное окно.

3. Подина и откосы заправляются смесью кварцевого песка с жидким стеклом (модуль 2.3–2.6, плотность 1480–1520 кг/м<sup>3</sup>) в соотношении по весу 10:1. После засыпки смесь уплотняется заправочной лопатой.

4. При наросте подины она «стравливается» посредством подачи на наросты известняка или плавикового шпата.

5. Свод, электрододержатели и токоведущие части обдуваются сжатым воздухом.

Таким образом, на основании проведенного технологического аудита установлено, что для доведения температуры расплава до заданного значения и поддержания температурного режима осуществляется управление мощностью печи путем переключения ступеней напряжения трансформатора.

Для управления химическим составом чугуна в миксер вводятся ферросплавы в количестве, зависящем от результатов химического анализа, полученных из лаборатории, т. е. в зависимости от текущего состояния системы. Это воздействие принято за управляющее, приводящее к реакции объекта в виде изменения в расплаве содержания корректируемого элемента химического состава. Следовательно, управление осуществляется вне вагранки – на уровне миксера или раздаточного ковша. Это позволяет считать, что принятие решения о выборе управления базируется на

результатах химического анализа расплава, выдаваемого из вагранки, а от качества управления ваграночным процессом зависит начальное состояние объекта управления.

#### 2.4. Обоснование критериев качества управления и представление схемы процесса управления «в целом»

Из результатов технологического аудита дуплекс-процесса «вагранка – миксер» и обобщения постановки задачи о выборе критериев качества управления следует, что химический состав чугуна, выдаваемого из вагранки, должен быть максимально близким химическому составу, требуемому техническими условиями на плавку. Следует особо отметить, что техническими требованиями на процесс доводки по химическому составу в миксере предусмотрено соответствие содержания углерода в чугуне диапазону 3,2–3,5 %. Осуществить это удастся не всегда, что связано с насыщением расплава углеродом в процессе взаимодействия расплава с коксом холостой колоши и горна. В результате протекания этого процесса содержание углерода в ваграночном чугуне почти всегда является завышенным. Поэтому приоритетным является процесс управления плавкой в вагранке. Управление ваграночным процессом должно быть таким, чтобы обеспечить заданный химический состав на момент выдачи расплава, регламентированный требованиями производительности всего плавильного участка. В этом случае математическая постановка задачи управления ваграночным процессом имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(t, x(t), u), \quad x(t_0) = x_0, \\ t_0 \leq t \leq t_{ed}, \quad x(t) &\in R_n, \quad u \in R_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x(t)$  – вектор состояния системы;  $u$  – управление;  $x(t_0)$  – вектор начального состояния;  $t_0$  – момент времени, соответствующий начальному состоянию системы;  $t_{ed}$  – момент времени, соответствующий достижению системой конечного состояния;  $R_n, R_m$  – евклидово пространство размерности  $n$  и  $m$  соответственно.

Компонентами вектора состояния является содержание элементов химического состава чугуна.

Целью управления является перевод системы из начального состояния  $x(t_0)$  в заданное конечное состояние  $x(t_{ed})$  за минимальное время. Поэтому, с одной стороны, можно говорить о необходимости решении задачи быстродействия:

$$J = \int_{t_0}^{t_{ed}} F(t, x(t), u) dt \rightarrow \inf, \quad F(t, x(t), u) = 1. \quad (2)$$

Минимизируемый функционал вида (2), соответствующий математическому описанию задачи Лагранжа, имеет смысл обеспечения требований к производительности дуплекс-процесса «вагранка – миксер».

С другой стороны, особенно важным является требование обеспечения заданного конечного состояния, которое может быть описано следующим образом:

$$x(t_{ed}) \in [x(t_{ed})], \quad (3)$$

где  $[x(t_{ed})]$  – заданные техническими условиями диапазоны содержания каждого элемента химического состава, по соответствию которым чугун классифицируется как годный или подлежащий корректировке по химическому элементу, относительно которого выявлено отклонение. Под отклонением понимается выпадение за диапазон  $[x(t_{ed})]$ , соответствующий полю допуска на содержание  $i$ -го элемента химического состава.

В этом случае, минимизируемый функционал должен иметь вид:

$$J = \varphi(t_{ed}, x(t_{ed})) \rightarrow \inf, \quad (4)$$

что указывает на необходимость решения задачи Майера.

Следовательно, если в качестве вектора состояний  $x(t)$  выбрать химический состав чугуна, управление процессом должно обеспечить выполнение требований максимальной производительности и точности получения заданного конечного состояния, оцениваемого в соответствии с (3).

Однако необходимо отметить еще один важный аспект в управлении ваграночным процессом. Этот аспект касается того, что качество управления ваграночным процессом должно обеспечивать требования вида:

$$x(t_{ed}^{cf}) - x(t_0^{mix}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

что соответствует требованию близости конечного состояния, описывающего ваграночный процесс, начальному состоянию, описывающему процесс термовременной обработки расплава в миксере. Для выполнения этого условия важным является управление температурным режимом ваграночного процесса таким образом, чтобы обеспечивать заданный температурный диапазон на каждом горизонте вагранки (рис. 2). Поэтому обоснованной является постановка задачи регулирования температурного режима ваграночного процесса как линейно-квадратичной задачи (ЛК-задачи) стабилизации заданного программного движения:

$$J = x^T(t_{ed})N_1x(t_{ed}) + \int_{t_0}^{t_{ed}} (x^T(t)N_2(t)x(t) + u^T(t)N_3(t)u(t))dt, \quad (6)$$

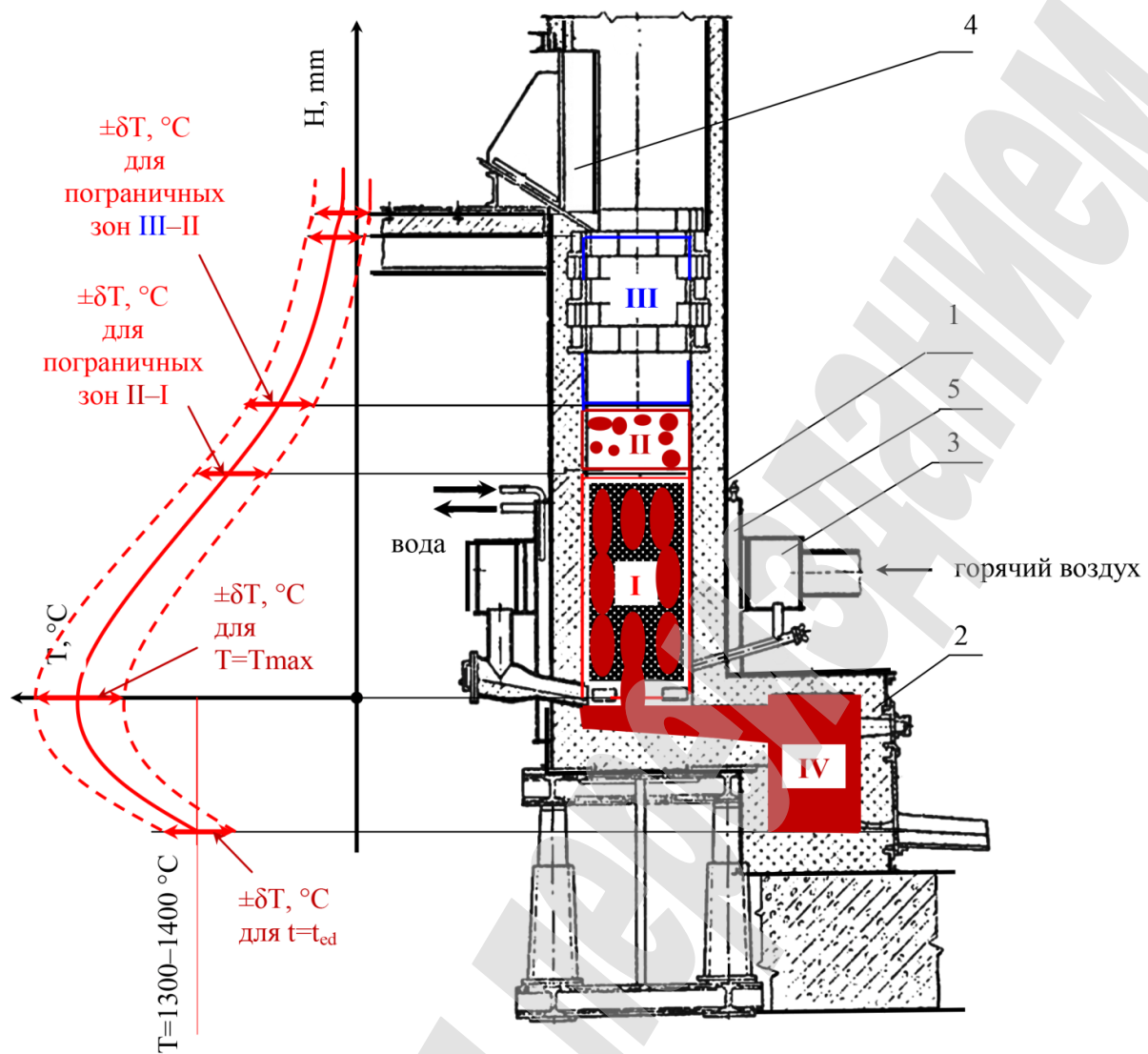
где  $x(t)$ ,  $x(t_{ed})$  – фазовый вектор, описывающий температуру на горизонтах вагранки в каждый момент времени и при достижении конечного состояния;

$x^T(t)$ ,  $x^T(t_{ed})$  – транспонированные матрицы вектора состояния;

$N_1 \geq 0$ ,  $N_2 \geq 0$ ,  $N_3 \geq 0$  – неотрицательно определенные матрицы;

$G(t) \in R_n$  для каждого момента времени;

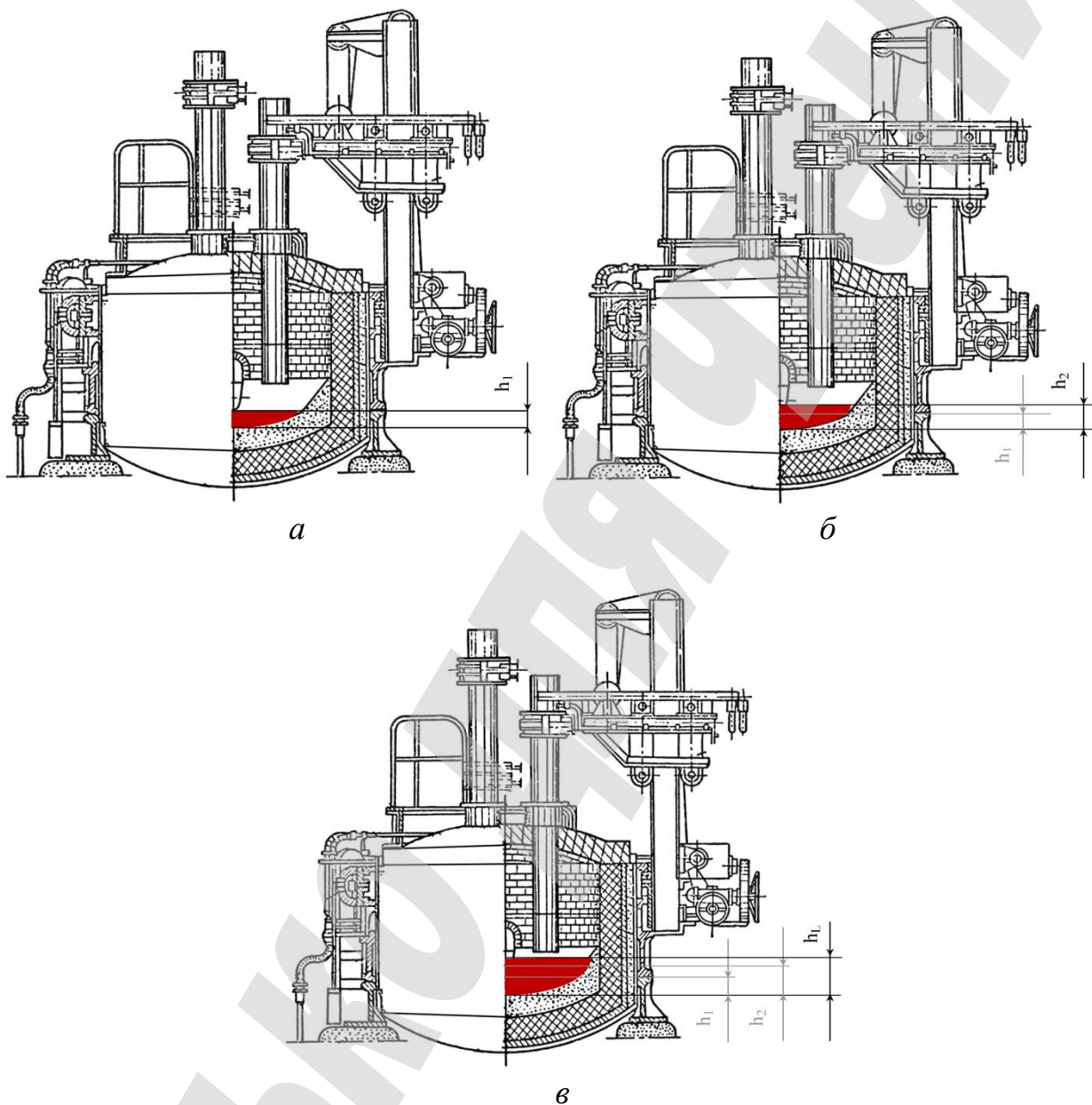
$u^T(t)N_3(t)u(t)$  – затраты на управление температурным режимом ваграночного процесса.



**Рис. 2.** Схема, поясняющая задачу стабилизации заданного программного движения в отношении регулирования температурного режима ваграночного процесса: 1 – вагранка; 2 – копильник; 3 – воздушный коллектор; 4 – завалочное окно; 5 – водоохлаждаемая рубашка; I – зона горения; II – зона плавления; III – зона нагрева шихты; IV – зона с жидким чугуном (копильник); ■ – расплав; ■ – кокс;  $\pm\delta T$  – поле отклонений температуры в рабочем пространстве вагранки

Решение ЛК-задачи должно приводить к удержанию траектории температуры по высоте вагранки в заданных пределах, что особенно важно в отношении границ различных температурных зон, оказывающих влияние на процесс фазовых превращений в процессе плавки и качество процесса в целом. Это означает, что температура является одним из основных технологических факторов, влияющих на формирование химического состава сплава. Поэтому регулирование температурного режима следует рассматривать как часть процесса управления формированием конечного химического состава расплава, выдаваемого из вагранки. Таким образом, можно говорить о том, что каким бы ни было управление ваграночным процессом, приоритетным является требование близости химического состава заданному техническими условиями. Так как выполнение этого условия является технологически сложным,

требование может быть ослаблено введением понятия меры близости фактического химического состава, выдаваемого из вагранки, требуемому. Это ослабление может быть обосновано тем, что в миксере, в результате управления процессом термовременной обработки, производится выравнивание химического состава, так как в нем аккумулируется расплав, выданный из вагранки несколькими порциями (рис. 3).

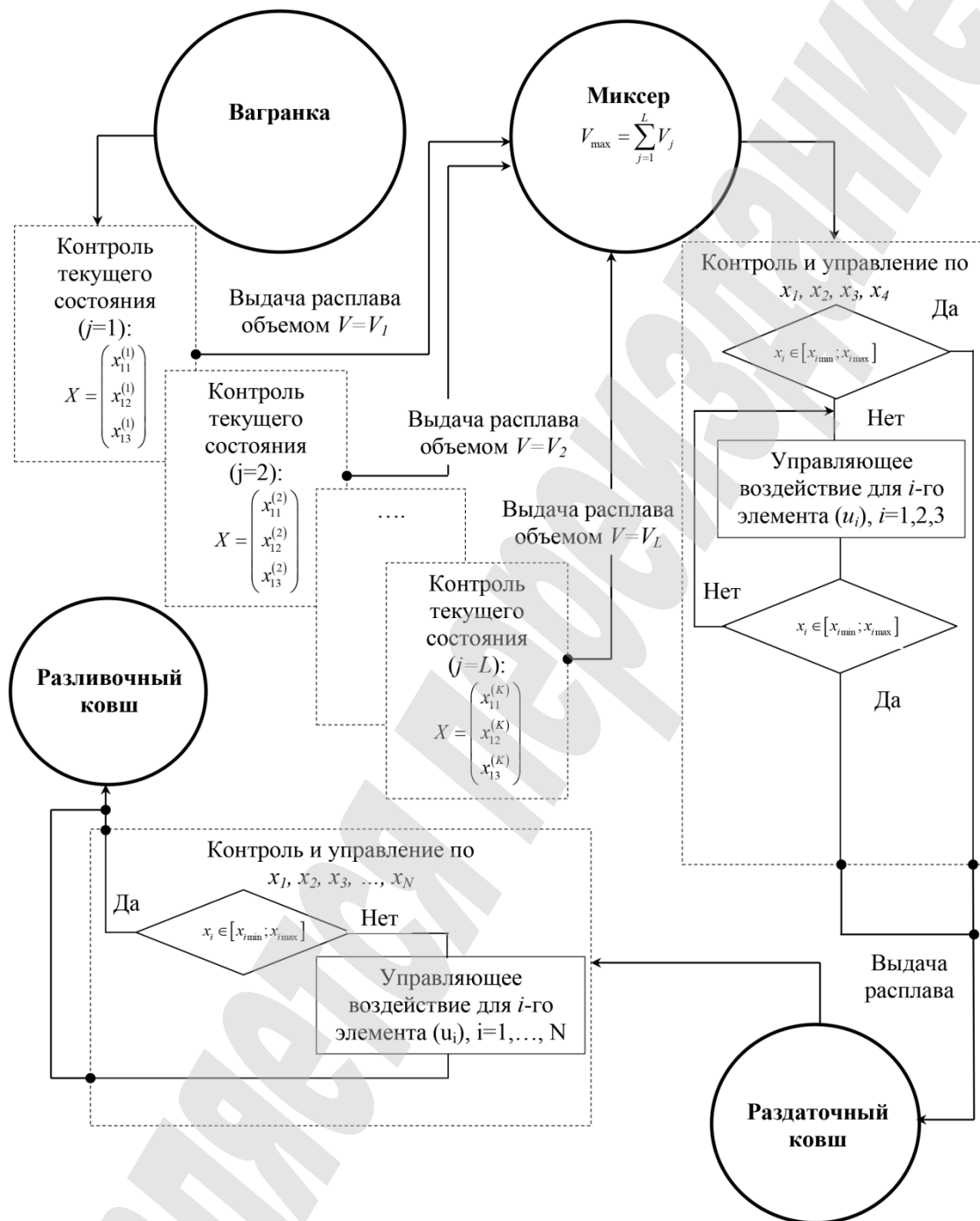


**Рис. 3.** Наполнение миксера порциями расплава, выдаваемого из вагранки в моменты времени  $j$  ( $j=1, \dots, L$ ):  $a - j=1 \rightarrow h=h_1$ ;  $б - j=2 \rightarrow h=h_2$ ;  $в - j=L \rightarrow h=h_L$

На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $j$  – момент времени выдачи расплава из вагранки в миксер;  $h_j$  – глубина ванны в миксере при выдаче расплава объемом  $V_j$  из вагранки.

Поэтому приоритетным является критерий качества управления вида (5), так как при его выполнении могут быть минимизированы затраты на термовременную обработку расплава в миксере. Схема процесса управления

технологической системой «вагранка – миксер», ориентированная на выполнение требований функционала вида (5), приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Схема процесса управления технологической системой «вагранка – миксер»

Из рис. 4 следует, что оценка состояния системы «вагранка – миксер», должна выполняться в режиме серийных плавов путем сбора первичных данных о текущем химическом анализе сплава.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель исследования состоит в разработке и практической апробации алгоритма оценки «в целом» качества управления дуплекс-процессом

«вагранка – миксер». Это даст возможность получения объективной информации об эффективности принятой на производстве системы управления выплавкой чугуна и разработке мероприятий по совершенствованию процессов управления на основании получаемых результатов оценки.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выбрать и обосновать математический аппарат, позволяющий комплексно проводить анализ процесса управления по данным технологического аудита.
2. Выполнить системный анализ производственных данных, снятых в процессе управления реально функционирующей технологической системой «вагранка – миксер».
3. Предложить направления совершенствования процесса управления дуплекс-процессом плавки «вагранка – миксер».

#### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Вопросы управления ваграночным процессом рассматриваются в нескольких аспектах, в зависимости от выбираемых критериев качества управления и подходов к описанию процессов:

- достижения максимальной степени интенсификации процесса [1, 2];
- достижения эффекта снижения энерго- и ресурсозатрат [3, 4];
- технологического описания процесса для выбора управления [5, 6];
- выбора и компоновки технических средств и структуры системы управления [7, 8];
- достижения эффекта экологической безопасности [9].

В работе [1] рассмотрены вопросы интенсификации ваграночной плавки путем утилизации тепла и использования подогретого воздуха. Это обеспечивает эффект повышения производительности, снижения потерь кремния и достижения баланса между повышением эффективности плавки и экономией средств на реализацию выбранного варианта управления процессом. В частности отмечено, что предложенный вариант обеспечивает снижение потребления кокса примерно на 5 %. Это открывает хорошие перспективы с точки зрения снижения затрат на производство. Однако следует отметить, что идея подогрева дутья и способов его подачи в зону горения хорошо известна и ее использование является развитием более ранних работ, относящихся к середине прошлого века [2]. Развитие этой идеи с точки зрения управления должно происходить на уровне систем регулирования подачи воздуха в фурменную коробку и его температуры. Это требует математического моделирования с целью получения адекватного описания влияния данных параметров на показатели плавки для его использования в решении задачи синтеза оптимального регулятора.

В работе [3] предложена технология применения слоевого способа сжигания природного газа для отопления вагранки. Такое решение, по утверждению авторов, обеспечивает повышение производительности плавильного агрегата на 36 % при сокращении удельного расхода кокса на 33.3 %. При этом отмечается уменьшение общего расхода теплоты на 18.78 % и потерь тепла с отходящими газами на 16.2 %.

В [3] сделан вывод о том, что реализация предложенных мероприятий позволяет достичь повышения теплового КПД агрегата на 15.81 %. Как развитие

этих решений, было бы перспективным проработать вопросы управления данным процессом, особенно на теоретическом уровне. Это связано с тем, что выявление механизмов теплоэнергетических процессов, протекающих в агрегате при использовании предлагаемого способа, позволило бы снять часть неопределенностей в задаче поиска оптимального управления ваграночным процессом. Вероятно, с этой точки зрения обоснованным является использование специализированных стендов для более глубокого исследования протекающих процессов [4]. Вместе с тем, следует отметить, что предпочтение желательно все же отдавать проведению промышленных экспериментов, так как именно они позволяют получать наиболее объективные данные по оценке параметров процесса.

В работе [5] ваграночный процесс рассмотрен с позиции функционирования кибернетической системы, преобразующей входную информацию в выходную. Приоритетными при таком представлении ваграночного процесса выбраны технологические параметры расхода кокса и расхода дутья. Управление процессом предложено реализовывать с использованием программного комплекса, позволяющего решать прогнозную задачу в зависимости от величины этих параметров. Технологические решения, в части использования как компонента топлива древесного угля в сочетании с горячим дутьем, описаны в работе [6]. Приводятся характеристики химического состава чугуна и рекомендации по его использованию в металлургической промышленности. Результаты работ [5, 6] свидетельствуют о том, что поиск путей управления процессом с целью достижения заданных характеристик ограничивается лишь несколькими входными переменными и переменными состояниями процесса. Такое ограничение обосновано, так как их увеличение неизменно приведет к значительному усложнению математического описания. В дополнение к сложности оценки переменных состояний и сложности измерения параметров процесса в реальном времени, неизбежно возникнет проблема поиска оптимального управления в условиях многоуровневой неопределенности. Решению этих проблем посвящены работы [7, 8], в которых предложено управлять ваграночным процессом на основе интеллектуальных систем на основе использования нейронных сетей [7]. А также конфигурации регулятора следующих технологических параметров процесса: температуры металла, содержания углерода в расплаве, скорости плавления [8]. Следует отметить, что работа [8] может рассматриваться как развитие работы [7], и результаты, полученные в [7, 8], могут представлять интерес с точки зрения практического использования алгоритмов управления названными параметрами ваграночного процесса. Однако, несмотря на приведенные экспериментальные результаты работы регулятора, вопросы, связанные с оценкой качества управления, не рассмотрены.

Параметры процесса с точки зрения их влияния на окружающую среду рассмотрены в работе [9], где, в частности, предложено техническое решение для эффективного метода утилизации пыли, выбрасываемой из печи. Можно рассматривать такое решение как часть общей системы управления на плавильном участке цеха, однако выбирать в качестве критериев качества управления процессом «в целом» величины выбросов было бы не совсем правильно. Степень загрязнения окружающей среды в результате



функционирования вагранок должна рассматриваться в комплексе совместно с другими выходными характеристиками ваграночного процесса.

Таким образом, анализ вышеприведенных работ позволяет говорить о фрагментарности рассмотрения проблемы управления ваграночным процессом.

Если говорить об использовании вагранок совместно с миксерами, то перспективным является исследование состояния вопроса по управлению процессами термовременной обработки, проводимой в миксерах. Как правило, такие миксеры представляют собой электропечи – электродуговые или индукционные. В последнем случае вопросы управления решаются проще, так как для индукционных печей режим работы с «болотом» является нормальным. Если же в качестве миксера используются электродуговые печи, то приоритетным критерием качества управления является критерий энергозатрат, так как КПД электродуговых печей на операции термовременной обработки не превышает 25 %. Такие печи традиционно представляются электротехнологическими комплексами [10, 11], обладающими рядом специфических особенностей в плане построения математических моделей, пригодных для поиска управления. Эти особенности проявляются в том, что построение таких моделей базируется на использовании «локальных» принципов – строятся частные модели и выявляются основные взаимосвязи между ними вместо построения общей модели. В некотором смысле такой подход переключается с парадигмой управления на основе моделей целевых операций и рассмотрения объектов управления как функциональных систем преобразовательного класса [12, 13]. При использовании в качестве миксеров электродуговых печей и рассмотрения процесса термовременной обработки, которая осуществляется в таких печах, имеет смысл говорить о двух принципиальных задачах управления:

- поиск оптимального по конечному состоянию управления физико-химическими процессами [14, 15];

- синтез оптимального регулятора температурного режима [16].

Понятно, что обе задачи по сути взаимосвязаны, так как регулирование температурного режима является одним из обязательных условий получения заданного химического состава сплава, формирующего конечное состояние системы. Учитывая, что именно в миксере обеспечивается формирование этого конечного состояния, процессы нагрева расплава в нем совмещаются с корректировкой химического состава, т. е. выбором управляющих воздействий по данным оперативного текущего контроля состояния сплава, поступающего из вагранки порциями в миксер. В этом случае, как и для вагранки, возможен выбор разных видов функционала управления, примеры которых могут быть найдены в [17]. Однако перечисленные работы посвящены решению классических задач в рамках поиска оптимального управления: оценке начального и конечного состояния системы, построению математических моделей управляемых процессов электроплавки и термовременной обработки, выбору вида функционала, синтезу оптимального регулятора. Вопросы оценки качества управления «в целом» в этих работах не поднимались, хотя они могут считаться важными с точки зрения получения объективных данных об эффективности принятой на предприятии системы управления выплавкой чугуна.

## 5. Методы исследования

Для разработки алгоритма оценки качества управления «в целом» дуплекс-процессом плавки предполагается реализация двух стадий:

- сбор промышленных данных о химическом составе сплава по ходу серийных плавки;
- системный анализ полученных данных.

Для реализации первой стадии в течение производственной смены по ходу плавки производится отбор проб на химический анализ [18]. Длительность наблюдения выбирается такой, чтобы сформировать достаточную для проведения системного анализа выборку данных. Отбор проб осуществляется в соответствии с графиком отбора проб на химический анализ, регламентированный технологическими инструкциями, действующими на предприятии. Моменты времени отбора проб нумеруются по порядку: 1, 2, 3..., причем каждый момент времени соответствует какому-то реальному времени. Интервалы реального времени между отборами проб не обязательно должны быть одинаковыми. Полученные из лаборатории данные о текущем химическом составе сплава фиксируются, формируя таким образом выборку о текущем состоянии системы. На основании полученных оперативных данных оператор (вагранщик) принимает решение об управлении.

Для реализации второй стадии необходимо анализ фактических данных, снятых в режиме нормального функционирования системы «вагранка – миксер», поэтому целесообразно использование приведенных ниже понятий математической статистики.

$x_{ij}$  – случайная величина, соответствующая содержанию  $i$ -го элемента химического состава в  $j$ -м эксперименте (под экспериментом понимается результат плавки, выполняемой серийно, т. е. по умолчанию понимается пассивный эксперимент);

$x_{ij}^{(k)}$  – случайная величина, соответствующая содержанию  $i$ -го элемента химического состава в  $j$ -м эксперименте в  $k$ -й момент времени;

$\tau$  – реальное время отбора пробы на химический анализ;

$t$  – момент времени отбора пробы на химический анализ;

$M(x_i^{(k)})$  – математическое ожидание случайной величины, рассчитываемое по формуле (7) для  $k$ -го момента времени;

$n$  – число параллельных экспериментов, соответствующих числу результатов химического анализа по  $i$ -му элементу в  $k$ -й момент времени;

$N$  – число контролируемых элементов химического состава;

$K$  – число моментов времени, для которых проводится анализ данных;

$S_i^{(k)2}$  – оценка дисперсии, рассчитываемая по формуле (8);

$S_i^{(k)}$  – оценка среднеквадратического отклонения, рассчитываемая по формуле (9);

$A$  – асимметрия кривой распределения, рассчитываемая по формуле (10);

$E$  – эксцесс кривой распределения, рассчитываемый по формуле (11);

$D(A)$  – дисперсия асимметрии, рассчитываемая по формуле (12);

$D(E)$  – дисперсия эксцесса, рассчитываемая по формуле (13);

$x_{inorm}$  – нормированное значение случайной величины  $x_i$ , рассчитываемое по формуле (14);

$m$  – число независимых входных переменных, влияющих на величину  $x_i$ ;

$F$  – матрица плана эксперимента  $[x_{ij}^{(k)}]$  размерностью  $n \times (m+1)$ ;

$F^T$  – транспонированная матрица плана эксперимента;

$C = (F^T F)^{-1}$  – дисперсионная матрица;

$X$  – матрица значений выходных переменных в  $j$ -м эксперименте для  $k$ -го момента времени;

$B$  – матрица оценок коэффициентов уравнения регрессии вида  $x_i = \varphi(t)$ , рассчитываемая по формуле (15).

$$M(x_i^{(k)}) = n^{-1} \sum_{j=1}^n x_{ij}^{(k)}, \quad i = 1, N, \quad k = 1, K, \quad (7)$$

$$S_i^{(k)2} = (n-1)^{-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^{(k)} - M(x_i^{(k)}))^2, \quad (8)$$

$$S_i^{(k)} = (S_i^{(k)2})^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

$$A = \frac{1}{n S_{ij}^{(k)3}} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^{(k)} - M(x_i^{(k)}))^3, \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{n S_{ij}^{(k)4}} \sum_{j=1}^n (x_{ij}^{(k)} - M(x_i^{(k)}))^4 - 3, \quad (11)$$

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n-3)}, \quad (12)$$

$$D(E) = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (13)$$

Итогом использования формул (7)–(13) является получение значений выборочных функций для дальнейшего анализа. Его первым этапом может быть регрессионный анализ, проводимый по выборке нормированных значений входных переменных:

$$x_{i\text{norm}} = \frac{2x_i - (x_{i\text{max}} + x_{i\text{min}})}{x_{i\text{max}} - x_{i\text{min}}}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

$$x_{i\text{max}} = \max_j x_{ij}, \quad x_{i\text{min}} = \min_j x_{ij}.$$

$$B = (F^T F)^{-1} F^T X = C F^T X. \quad (15)$$

Процедура (14) обеспечивает нормирование значений входных переменных, переводящее их абсолютные значения в безразмерный диапазон  $[-1; +1]$ , а процедура (15) – расчет оценок коэффициентов уравнения регрессии вида  $x_i = f(t)$ . Это уравнение описывает зависимость содержания в сплаве  $i$ -го элемента химического состава во времени по ходу процесса плавки.

Итогом использования процедур (14), (15) является получение методом наименьших квадратов (МНК) математического описания изменения во времени содержания  $i$ -го элемента химического состава в сплаве.

После этого выполняются следующие шаги:

*Шаг 1.* Статистический анализ точности:

$$|\hat{b}_i - \bar{b}_i| < t_{кр} s_i, \quad (16)$$

где  $|\hat{b}_i - \bar{b}_i|$  – доверительный интервал для коэффициентов (15) уравнения регрессии;  $t_{кр}$  – критическое значение распределения Стьюдента;  $s_i$  – среднее квадратическое отклонение оценки коэффициента уравнения регрессии  $b_i$ , рассчитываемое по формуле:

$$s_0 = s\sqrt{c_{11}}, s_1 = s\sqrt{c_{22}}, \quad (17)$$

где  $c_{11}$ ,  $c_{22}$  – элементы, стоящие на главной диагонали дисперсионной матрицы  $C = (F^T F)^{-1}$ , а  $s^2$  рассчитывается по формуле:

$$s^2 = \frac{S_E}{n\varphi_2}, \quad (18)$$

где приняты следующие обозначения:

$$S_E = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n (x_{kj} - M(x^{(k)}))^2, \quad (19)$$

$$\varphi_2 = K(n-1). \quad (20)$$

В (19), (20) использованы следующие обозначения:  $S_E$  – сумма квадратов, характеризующая ошибки экспериментов;  $\varphi_2$  – число степеней свободы.

Итогом процедуры (16) является построение доверительных интервалов для каждого коэффициента уравнения регрессии, представляемых в виде:

$$b_0 \pm t_{кр} s_0, b_1 \pm t_{кр} s_1. \quad (21)$$

*Шаг 2.* Оценка значимости коэффициентов  $b_i$ .

Выполняется в соответствии с критерием:

$$|b_i| \geq t_{кр} s_i. \quad (22)$$

*Шаг 3.* Проверка адекватности уравнения регрессии, выполняется в соответствии с критерием:

$$F = \frac{s_D^2}{s_e^2} \leq F_{кр}. \quad (23)$$

В (23) использованы следующие обозначения:

$F_{кр}$  – критическое значение  $F$ -распределения со степенями свободы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ;

$s_e^2$  – оценка дисперсии ошибок эксперимента, вычисляемая по формуле:

$$s_e^2 = \frac{S_E}{\varphi_2}; \quad (24)$$

$s_D^2$  – оценка дисперсии неадекватности уравнения регрессии, вычисляемая по формуле:

$$s_D^2 = \frac{nS_R}{\varphi_1}, \quad (25)$$

где  $nS_R$  – сумма квадратов, характеризующая неадекватность уравнения регрессии;

$$S_R = \sum_{k=1}^K (\hat{x}_k - M(x^{(k)}))^2, \quad (26)$$

где  $\hat{x}_k$  – расчетное значение содержания  $i$ -го элемента химического состава, полученное по уравнению регрессии;

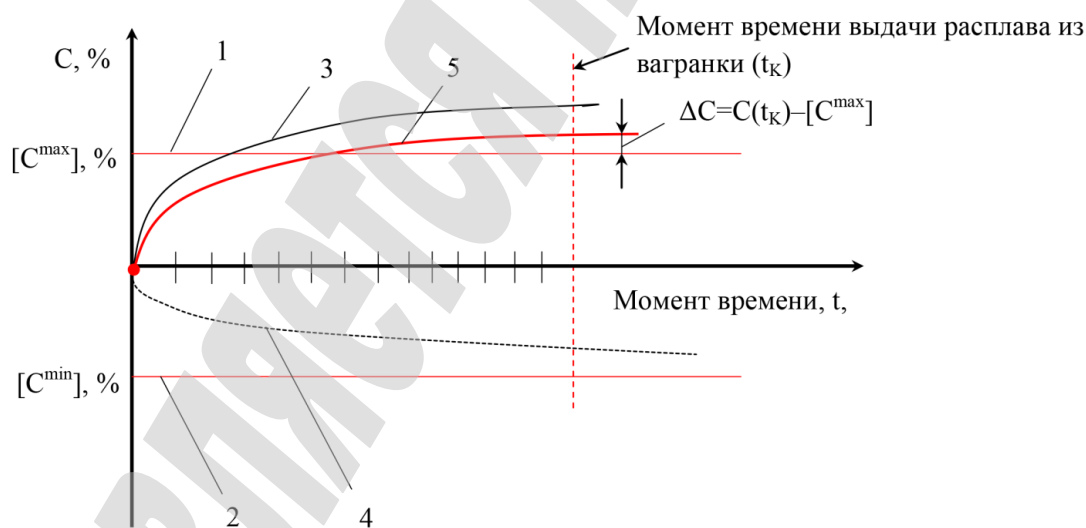
$\varphi_1$  – число степеней свободы:

$$\varphi_1 = K - (m + 1). \quad (27)$$

Учитывая тот факт, что химический состав расплава, выдаваемого из вагранки, характеризуется значительным разбросом почти по каждому элементу, задачей управления дуплекс-процессом является стабилизация содержания каждого элемента химического состава на последующих после ваграночного процесса технологических операциях. Это предполагает, что содержание каждого элемента химического состава путем управляющих воздействий нужно привести в заданный узкий диапазон. Если это условие обеспечивается, то имеет смысл говорить о стабилизации траектории – удержании содержания  $i$ -го элемента химического состава в течение заданного интервала времени в заданном техническими условиями диапазоне значений (поле допуска). В этом случае качество управления оценивается именно по этому критерию.

Если управление ваграночным процессом отлично от оптимального, то стабилизация возможна только путем оптимального управления на этапе термовременной обработки в миксере. Под термином «оптимальный» в данном случае понимается управление, обеспечивающее со 100 %-ной вероятностью удержание содержания  $i$ -го элемента химического состава в течение заданного интервала времени в заданном диапазоне значений. В общем случае, когда управление ваграночной плавкой не обеспечивает попадание содержания  $i$ -го элемента химического состава в заданный диапазон на момент времени выдачи расплава из вагранки, можно говорить о двух режимах дуплекс-процесса – нестационарном и стационарном. Особенно этот случай может проявляться в отношении углерода, так как именно по нему возможно выпадение за границы поля допуска вследствие специфики физико-химических процессов, протекающих в вагранке, на границах раздела фаз. Данные процессы развиваются следующим образом.

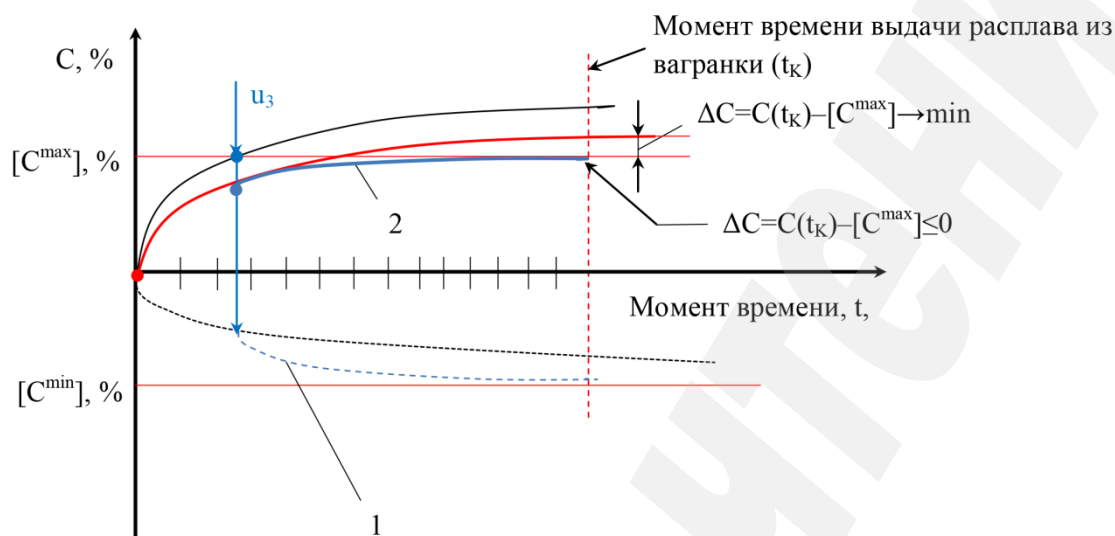
Расплав чугуна, стекая вниз со средней скоростью фронта  $v_F$ , контактирует с коксом, насыщаясь от него углеродом. Поэтому содержание углерода в чугуне при выдаче из вагранки всегда выше, чем расчетное вносимое с шихтой. Для снижения такого превышения (пригара), необходимо создавать условия, при которых  $v_F \rightarrow \max$ . Скорость насыщения расплава углеродом  $v_C$  тем выше, чем выше температура, так как процесс насыщения расплава углеродом является эндотермическим. С другой стороны, с повышением температуры жидкотекучесть чугуна увеличивается, что способствует увеличению  $v_F$ . Поэтому в отношении изменения содержания углерода во времени действует два конкурирующих фактора – температура и средняя скорость движения фронта расплава (рис. 5).



**Рис. 5.** Принцип конкуренции факторов в отношении содержания углерода в процессе ваграночной плавки: 1 – верхнее допустимое содержание углерода; 2 – нижнее допустимое содержание углерода; 3 – кривая насыщения расплава углеродом при  $v_F=0$  (теоретический случай); 4 – кривая снижения степени насыщения при  $v_F>0$ ; 5 – «суммарная» кривая изменения содержания углерода

Принцип управления процессом ваграночной плавки, имеющим целью стабилизацию содержания углерода на момент выдачи расплава, приведен на

рис. 6. В этом случае имеет смысл говорить об оптимизации управления по конечному состоянию, так как в отношении ваграночной плавки конечное состояние соответствует выдаче расплава.



**Рис. 6.** Принцип управления по конечному состоянию процессом ваграночной плавки:  $u_3$  – управление в процессе ваграночной плавки; 1 – кривая снижения степени насыщения при увеличении средней скорости фронта движения расплава вследствие управляющего воздействия  $u_3$ ; 2 – «суммарная» кривая изменения содержания углерода после применения управляющего воздействия  $u_3$

Формы кривых, описывающих изменение содержания углерода во времени на рис. 5 и рис. 6 являются демонстрационными (предположительными), а точных их вид может быть получен только на основании математического моделирования.

Для определения существенности влияния выбранного варианта управления на достижение заданного конечного состояния, которое проявляется в переводе процесса из нестационарного режима в стационарный, подходящим математическим аппаратом может оказаться дисперсионный анализ. Процедура его известна и математически описывается формулами (28)–(31), позволяющими установить значимость выбранного управляющего воздействия на стабилизацию содержания химического элемента, в отношении которого выполняется операция управления.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \geq F_{кр}, \quad (28)$$

где

$$s_1^2 = \frac{n \sum_{k=1}^K (M(x^{(k)}) - \bar{x})^2}{K - 1}, \quad (29)$$

$$\bar{x} = K^{-1} \sum_{k=1}^K M(x^{(k)}), \quad (30)$$

$$s_2^2 = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x})^2 - n \sum_{k=1}^K (M(x^{(k)}) - \bar{x})^2}{nK - K}. \quad (31)$$

В формулах (28)–(31) приняты следующие обозначения:  $s_1^2$  – факторная дисперсия;  $s_2^2$  – остаточная дисперсия. Так как расчеты для каждого элемента химического состава выполняются аналогично, индекс  $i$  в описании (28)–(31) опущен.

Итогом процедуры дисперсионного анализа в контексте решаемой задачи, должно быть определение момента времени перехода объекта управления из нестационарного режима в стационарный режим по химическому элементу, в отношении которого выполняется операция управления. Переход из нестационарного в стационарный режим дуплекс-процесса определяется как момент времени, когда влияние управляющего воздействия становится статистически значимым, т. е. когда абсолютная разность двух групповых средних значений  $x^{(k)}$  превысит величину  $t_{kp}s$ :

$$|M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)})| > t_{kp}s(M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)})), \quad r = 1, \dots, 4, \quad (32)$$

где

$$s = \sqrt{\frac{2}{n} s_2^2}. \quad (33)$$

Таким образом, определив уравнение регрессии и момент перехода процесса из нестационарного в стационарный режим, можно оценить величину несоответствия химического состава по каждому элементу значению, регламентированному технологической инструкцией, в каждый момент времени по ходу плавки:

$$\Delta = 1 - \left[ \Phi\left(\frac{x_{i\max} - M(x_i^{(k)})}{s_i^{(k)}}\right) - \Phi\left(\frac{x_{i\min} - M(x_i^{(k)})}{s_i^{(k)}}\right) \right], \quad (34)$$

где  $\Delta$  – доля несоответствия химического состава по каждому элементу значению, регламентированному технологической инструкцией;

$x_{i\max}$  – верхняя граница поля допуска на содержание  $i$ -го элемента химического состава;

$x_{i\min}$  – нижняя граница поля допуска на содержание  $i$ -го элемента химического состава;

$s_i^{(k)}$  – среднее квадратическое отклонение содержания  $i$ -го элемента химического состава;

$M(x_i^{(k)})$  – математическое ожидание содержания  $i$ -го элемента химического состава;

$\Phi(\cdot)$  – функция Лапласа.



## 6. Результаты исследований

### 6.1. Обобщенное представление алгоритма оценки «в целом» качества управления

Общий вид предлагаемого алгоритма оценки «в целом» качества управления представлен на рис. 7, 8.

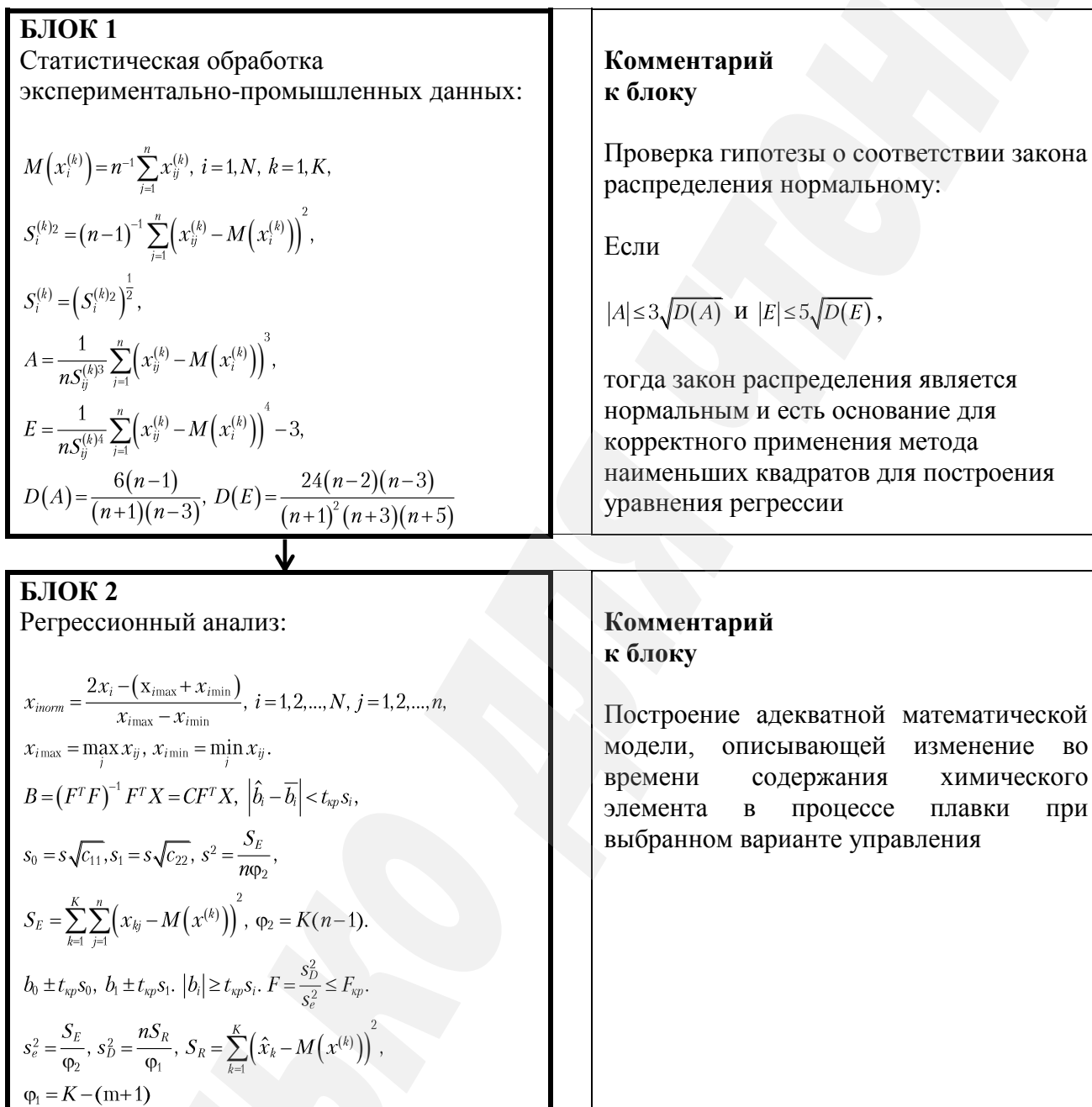
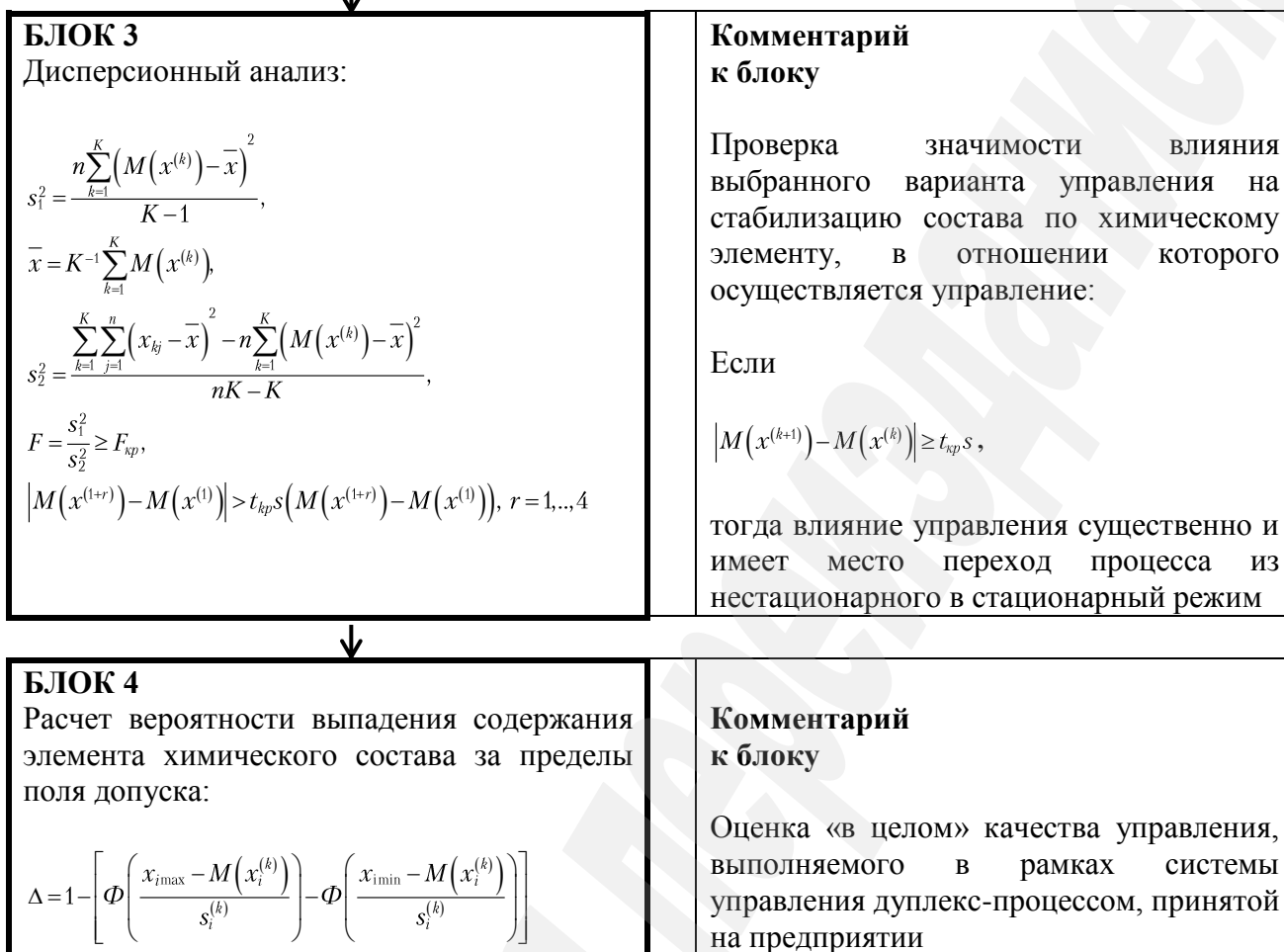


Рис. 7. Алгоритм оценки «в целом» качества управления (Блок 1, 2)



**Рис. 8.** Алгоритм оценки «в целом» качества управления (Блок 3, 4)

Итогом реализации алгоритма является количественная оценка доли чугуна, имеющего отклонение по содержанию  $i$ -го элемента химического состава по причине несовершенного процесса управления дуплекс-процессом.

## 6.2. Результаты практической реализации алгоритма оценки «в целом» качества управления

Первичные промышленные данные были получены на основании технологического аудита дуплекс-процесса «вагранка – миксер». Длительность наблюдений – 78 дней. Моменты времени отбора проб нумеровались по порядку: 1, 2, 3, 4, 5, с интервалом 2 часа, начиная с первой пробы. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты химического анализа содержания углерода в серийном процессе плавки

N промышленного эксперимента	Содержание углерода в чугуна, [C], %				
	Моменты времени отбора проб				
	1	2	3	4	5
1	3.74	3.35	*	3.45	3.38
2	3.79	3.56	*	3.34	3.28
3	3.6	3.48	*	3.37	3.21
4	3.59	3.36	*	3.39	3.2
5	3.8	3.55	*	3.4	3.28
6	3.6	3.38	*	3.38	3.28
7	3.69	3.46	*	3.35	3.34
8	3.8	3.49	*	3.42	3.25
9	3.8	3.35	*	3.32	3.3
10	3.6	3.35	*	3.41	3.33
11	3.76	3.54	*	3.28	3.22
12	3.67	3.46	*	3.3	3.29

**Примечание:** \* – данные для момента времени 3 не учитывались для практической реализации алгоритма, так как планировались к использованию для дальнейшей проверки гипотезы о работоспособности алгоритма

Для каждого момента времени ( $k=1, \dots, 5$ ) выполнялись операции блока 1 Алгоритма (рис. 7).

В табл. 6 приведены результаты проверки вида закона распределения содержания углерода в каждый момент времени  $k$

Таблица 6

Результаты реализации Блока 1 алгоритма

Момент времени	Среднее экспериментальное значение содержания углерода в чугуна, $M([C]^{(k)}), \%$	Оценка дисперсии* содержания углерода в чугуна, $S_{[C]}^{(k)2}$	Среднее квадратическое отклонение содержания углерода в чугуна, $S_{[C]}^{(k)}$	Асимметрия, A	Эксцесс, E	Критерии оценивания	
						$3\sqrt{D(A)}$	$5\sqrt{E(A)}$
1	3.7	0.007842	0.088557	-0.146	-1.864	2.253	1.119
2	3.44	0.006863	0.082842	0.059	-1.763		
3	–	–	–	–	–		
4	3.37	0.002602	0.051012	-0.176	-1.231		
5	3.28	0.002945	0.054272	0.131	-1.097		

**Примечание:** \* – оценка дисперсии рассчитана по формуле (8), в которой индекс  $i$  заменен индексом [C], что соответствует обозначению  $i=1$  – первый элемент химического состава чугуна – это углерод; квадратные скобки означают, что речь идет о содержании углерода в чугуна

Из табл. 6 видно, что условия нормальности распределения выполнены по критерию «асимметрия», но по критерию «эксцесс» они выполнены только для момента времени  $k=5$ . Это означает, что в первые периоды процесса

содержание углерода является существенно нестабильным, о чем свидетельствует величина  $E$ , смысл которой известным образом указывает на форму кривой распределения. Однако, несмотря на этот выявленный факт, можно признать закон распределения содержания углерода соответствующим нормальному. Аргументом в пользу этого может быть предположение, что на большей выборке данных условие по эксцессу могло бы быть выполненным. Поэтому возможно перейти к блоку 2 Алгоритма, выбирая в качестве выходной переменной содержание углерода в моменты времени  $k=1, \dots, 5$ , а в качестве входной переменной – какую-то функцию времени. Выбор входной переменной связан с обоснованием структуры уравнения регрессии, представляющего собой по смыслу кинетическое уравнение изменения содержания углерода во времени. Поэтому выбор структуры уравнения регрессии должен учитывать физико-химический смысл процессов, приводящих к изменению содержания углерода (рис. 5, 6). Отсутствие общего представления кинетического уравнения в традиционном виде – дифференциального уравнения, описывающего скорость процесса, – и сложность его непосредственного построения вынуждают прибегнуть только к качественной оценке при выборе структуры уравнения. Следует учесть, что ошибка в выборе структуры уравнения может привести к получению неадекватного результата с точки зрения физико-химического описания процесса, хотя со статистической точки зрения уравнение может быть адекватным. Поэтому при выборе структуры уравнения регрессии применились следующие соображения. С течением времени при выбранных вариантах управления процессом содержание углерода стремится к некоторому пределу. Его величина соответствует заданному техническими условиями среднему содержанию углерода – середине поля допуска (рис. 5, 6). В начальный момент времени ( $\tau=1$ ) содержание углерода должно соответствовать начальному, т. е. полученному при выдаче расплава из вагранки. Но оно является конечным состоянием процесса ваграночной плавки, которое должно быть достигнуто путем управления данным процессом. Эти условия выполняются, если принять следующий вид уравнения регрессии:

$$[C] = b_0 + b_1 \tau^{-1}, \quad (35)$$

где  $b_0, b_1$  – искомые оценки коэффициентов – элементы матрицы  $B$  в (15);  $\tau$  – момент времени контроля содержания углерода. Каждый момент времени контроля имеет представление в виде реального времени – момента отбора пробы на химический анализ в соответствии с регламентом, действующим на предприятии.

Если принять  $\tau^{-1} = x$ ,  $y = [C]$ , то уравнение (35) может быть представлено в линейном виде:

$$y = b_0 + b_1 x. \quad (36)$$

В этом случае становится возможной оценка коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов, т. е. реализация блока 2 Алгоритма.

Нормирование входной переменной выполнено в соответствии с (14), причем в качестве входной переменной выбрана величина  $x$ .

В табл. 7 представлены промежуточные данные и результаты расчета оценок коэффициентов уравнения вида (36).

**Таблица 7**

Промежуточные данные и результаты расчета оценок коэффициентов уравнения регрессии

Матрица плана в нормированном виде	Транспонированная матрица плана	Информационная матрица плана	Дисперсионная матрица	Матрица выходной переменной	Матрица оценок коэффициентов (15) уравнения регрессии (36)
$F$	$F^T$	$F^T F$	$C$	$Y^*$	$B$
$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -0.25 \\ 1 & -0.875 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -0.25 & -0.875 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 & -1.125 \\ -1.125 & 2.8281 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.2815 & 0.1120 \\ 0.112 & 0.3981 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.703 \\ 3.444 \\ 3.368 \\ 3.28 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.50416 \\ 0.19701 \end{pmatrix}$

**Примечание:** \* – выходная переменная – содержание углерода [C] – обозначено в уравнении (36) через  $y$  для придания ему общепринятого вида. Из этих соображений в таблице матрица значений выходной переменной обозначена через  $Y$ , хотя в формуле (15) принято обозначение матрицы выходных переменных через  $X$

Полученные результаты позволяют представить уравнение регрессии в нормированном виде:

$$y = 3.504 + 0.197x. \quad (37)$$

Учитывая выбранный диапазон варьирования входной переменной  $\tau^{-1}=(0.2; 1)$ , использованный для нормирования входной переменной по формуле (14), уравнение (37) примет вид, необходимый для приведения уравнения регрессии к натуральному виду:

$$y = 3.504 + 0.197 \left( \frac{x - 0.6}{0.4} \right). \quad (38)$$

Следовательно, в натуральном виде уравнение регрессии представляется следующим образом:

$$[C] = 3.2086 + 0.4925\tau^{-1}. \quad (39)$$

Результаты расчетов содержания углерода по уравнению регрессии (38) и проверки адекватности уравнения в соответствии с (23)–(25) приведены в табл. 8.

Результаты статистического анализа точности и проверки значимости, выполненные в соответствии с (16)–(18) для уравнения (39), приведены в табл. 9.

Таблица 8

Результаты расчетов содержания углерода и проверки адекватности уравнения регрессии

Момент времени отбора проб	Среднее экспериментальное значение содержания углерода в чугунае $M([C]^{(k)}), \%$	Расчетная концентрация углерода в чугунае по уравнению (38), $[C] \%$	$s_D^2 = \frac{nS_R}{\Phi_1}$	$s_e^2 = \frac{S_E}{\Phi_2}$	$F_{\Phi_1, \Phi_2}$	$F_{кр}$
1	3.7	3.701	0.01303	0.005563	2.34	5.12
2	3.44	3.455				
3	–	3.373				
4	3.37	3.332				
5	3.28	3.307				

Таблица 9

Результаты статистического анализа точности и проверки значимости

Дисперсионная матрица	Статистические характеристики					
	$S_E$	$s^2$	$s_0$	$s_1$	$b_0 \pm t_{кр} s_0$	$b_1 \pm t_{кр} s_1$
$\begin{pmatrix} 0.8414 & -1.2131 \\ -1.2131 & 2.4883 \end{pmatrix}$	0.24475	0.000464	0.019749	0.033962	3.2086±0.053	0.4925±0.092

С учетом диапазонов отклонений значений коэффициентов, уравнение регрессии (39) может быть представлено в виде:

$$[C] = (3.2086 \pm 0.053) + (0.4925 \pm 0.092)\tau^{-1}, \quad (40)$$

что позволяет определить возможное поле отклонений содержания углерода в каждый момент времени:

$$\delta = [C]_{\max} - [C]_{\min}. \quad (41)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 10.

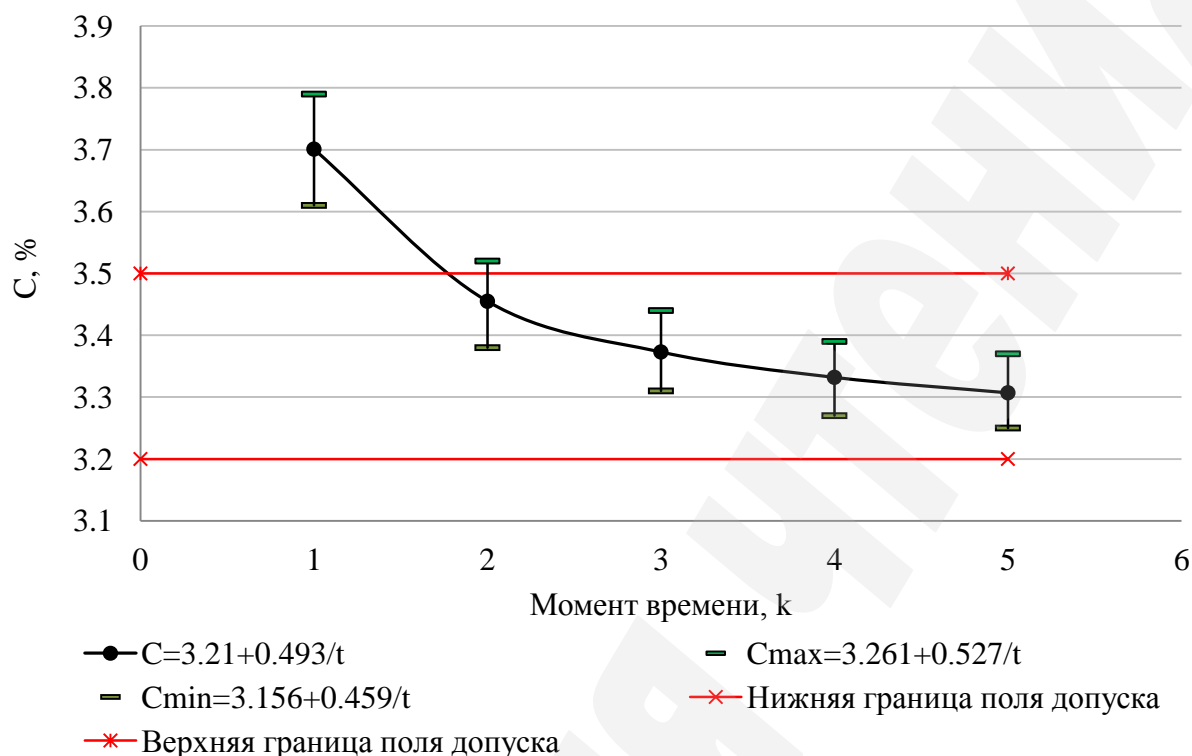
Таблица 10

Результаты расчетов поля отклонений содержания углерода

Момент времени отбора проб	Диапазон содержания углерода в каждый момент времени, $([C]_{\min}; [C]_{\max}), \%$	Поле отклонений содержания углерода в каждый момент времени, $\pm\delta/2, \%$
1	(3.61; 3.79)	0.09
2	(3.38; 3.52)	0.07
3	(3.31; 3.44)	0.065
4	(3.27; 3.39)	0.06
5	(3.25; 3.37)	0.06

Итоговое уравнение (40) представляет собой адекватную математическую модель, описывающую изменение содержания углерода в процессе плавки при

выбранном варианте управления. Графическая интерпретация модели с учетом полей отклонений для каждого момента времени  $k$  приведена на рис. 9.



**Рис. 9.** Графическая интерпретация математической модели, описывающей изменение содержания углерода в процессе плавки при выбранном варианте управления

На этом этапе анализа закончено выполнение блока 2 Алгоритма.

Для реализации блока 3 Алгоритма выполнен дисперсионный анализ, результаты которого могут быть использованы для оценки существенности влияния управления на каждом из этапов дуплекс-процесса. Результаты приведены в табл. 11.

Из табл. 11 видно, что уже между первым и вторым моментами времени влияние управления является существенным. Этот вывод обоснован тем, что между первым и вторым моментами времени осуществляется операция корректировки содержания углерода в расплаве, выданном из вагранки. Поэтому, вводя понятия нестационарного и стационарного режимов, можно считать, что границей этих режимов является момент времени, начиная с которого влияние управления становится значимым. Расчетное значение этого момента соответствует величине  $k$ , при которой кривая содержания углерода пересекается с верхней допустимой границей [ $C^{\max}$ ] (рис. 9).

На этом этапе определения границы нестационарного и стационарного режимов заканчивается реализация блока 3 Алгоритма.

Последний блок Алгоритма – блок 4 – позволяет для каждого момента времени  $k$  оценить по формуле (34) долю несоответствия выплавленного чугуна по содержанию углерода при использовании существующего варианта управления. Результаты расчетов приведены в табл. 12.

Таблица 11

## Результаты дисперсионного анализа

Статистические характеристики	Уровни влияния фактора управления для моментов времени $k$				
	1	2	3	4	5
	3.74	3.35	*	3.45	3.38
	3.79	3.56	*	3.34	3.28
	3.6	3.48	*	3.37	3.21
	3.59	3.36	*	3.39	3.2
	3.8	3.55	*	3.4	3.28
	3.6	3.38	*	3.38	3.28
	3.69	3.46	*	3.35	3.34
	3.8	3.49	*	3.42	3.25
	3.8	3.35	*	3.32	3.3
	3.6	3.35	*	3.41	3.33
	3.76	3.54	*	3.28	3.22
	3.67	3.46	*	3.3	3.29
$M([C]^{(k)})$	3.701	3.455	–	3.332	3.307
$[\bar{C}]$	3.44875	3.44875	–	3.44875	3.44875
$M([C]^{(k)}) - [C]$	0.06363	3.91E-05	–	0.0136	0.0201
$s_1^2$	0.389571				
$s_2^2$	0.00575				
$\varphi_1$	3				
$\varphi_2$	44				
$F$	67.75				
$F_{кр}$	2.82				
$s(M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)}))$	0.030958				
$t_{кр}$	2.07				
$t_{кр}S$	0.064082				
$ M(x^{(1+r)}) - M(x^{(1)}) $	0	0.246	0.328	0.369	0.394

**Примечание:** \* – данные для момента времени 3 не учитывались для практической реализации алгоритма, так как планировались к использованию для дальнейшей проверки гипотезы о работоспособности алгоритма

Таблица 12

## Результаты оценивания «в целом» качества управления дуплекс-процессом «вагранка – миксер»

Доля несоответствия выплавленного чугуна по содержанию углерода при использовании существующего варианта управления для моментов времени $k$				
1	2	3*	4	5
$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\Delta_4$	$\Delta_5$
0.988	0.235	0.198	0.005	0.071

**Примечание:** \* – расчет выполнен по данным табл. 8

Представленные в табл. 12 результаты являются итогом реализации алгоритма оценки «в целом» качества управления, выполняемого в рамках



системы управления дуплекс-процессом, принятой на предприятии. Она позволяет определить, на каком из участков технологического процесса требуется оптимизация управления, понимаемая в смысле обеспечения заданного конечного состояния при минимуме длительности нестационарного режима.

Из приведенного примера видно, что в рассмотренном случае требуется совершенствование управления процессом ваграночной плавки, так как заданное конечное состояние существующим вариантом управления не обеспечивается.

### 6.3. Возможные варианты совершенствования процесса управления на основе реализации предложенного алгоритма

Совершенствование процесса управления возможно двумя путями:

- 1) совершенствование процесса управления в ручном режиме плавки;
- 2) совершенствование системы управления на уровне автоматизации.

В обоих случаях регулированию подлежат температура и содержание углерода в чугуна. Результаты технологического аудита плавки показывают, что параметром, определяющим необходимость регулирования температуры, является перепад уровня холостой колоши. Если он недостаточен (42), то температура чугуна падает, хотя скорость движения фронта расплава растет.

$$\Delta h = h_{ah} - h_{sh} < 0, \quad (42)$$

где  $h_{ah}$  – фактический уровень холостой колоши от оси нижнего ряда фурм;  $h_{sh}$  – заданный уровень холостой колоши от оси нижнего ряда фурм.

В общем случае высота холостой колоши зависит от конструктивных параметров вагранки и принятых технологических режимов плавки:

$$h_1 = \varphi_1(\Delta T)_{d, \Sigma f, n, W, T_w, O_2, R_{por}}, \quad (43)$$

где  $h_1$  – уровень холостой колоши, мм;  $\varphi_1(\Delta T)_{d, \Sigma f, n, W, T_w, O_2, R_{por}}$  – функция перепада температур чугуна при фактических конструктивных параметрах вагранки и фактических технологических режимах плавки:

– группа конструктивных параметров вагранки:

$d$  – диаметр вагранки в свету, мм;

$\Sigma f$  – суммарная площадь сечения фурм, мм<sup>2</sup>;

$n$  – число рядов фурм;

– группа технологических режимов плавки:

$W$  – количество подаваемого в вагранку воздуха, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;

$T_w$  – температура подаваемого в вагранку воздуха, °С;

$O_2$  – концентрация кислорода в подаваемом в вагранку воздухе, %;

$R_{por}$  – пористость холостой колоши.

Поэтому условие регулирования температуры может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta h < 0 \rightarrow T < T_{sh}, \quad (44)$$

где  $\Delta h$  – перепад высоты холостой колоши, мм;  $T$  – фактическая (регистрируемая) температура чугуна, °С;  $T_{sh}$  – заданная температура чугуна.

$$V_{coke} = \varphi_2(h_1), \quad (45)$$

где  $V_{coke}$  – объем кокса холостой колоши, м<sup>3</sup>;  $\varphi_2(h_1)$  – функция высоты холостой колоши.

Поэтому регулирование должно выполняться путем подачи дополнительной рабочей топливной колоши. На рис. 10–12 представлена демонстрация принципа регулирования температурного режима.

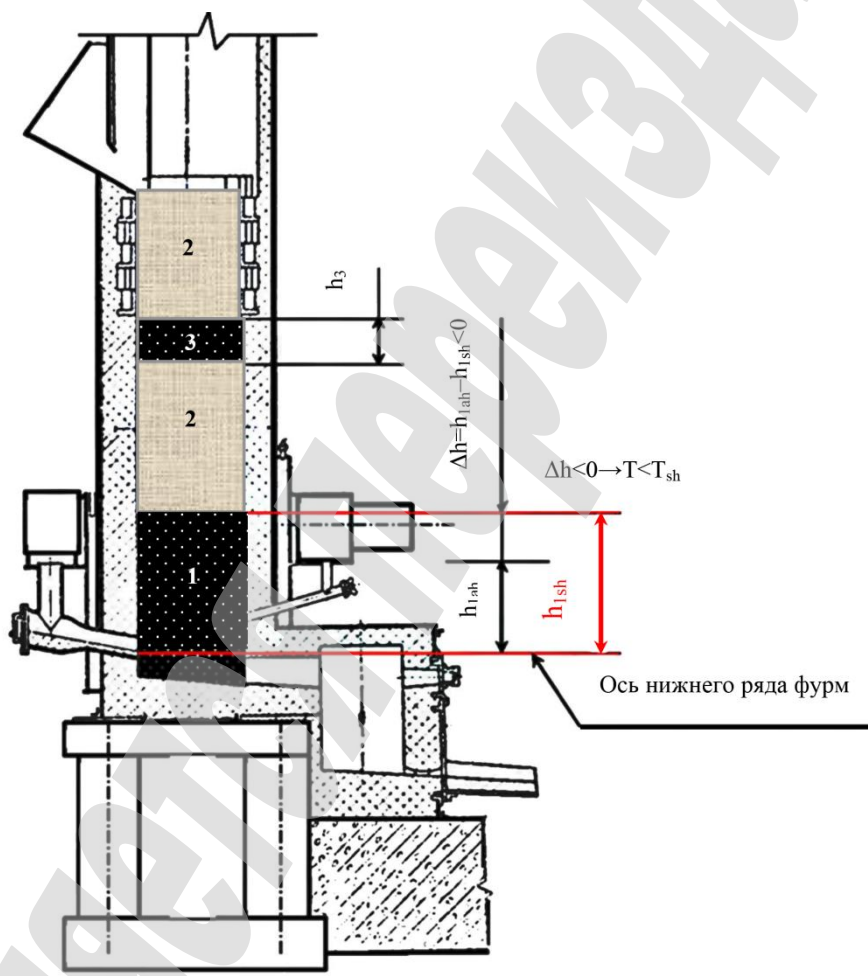


Рис. 10. Условия регулирования температуры:

1 – холостая колоша; 2 – металлическая колоша; 3 – рабочая топливная колоша

На рис. 10 через  $h_3$  обозначена высота рабочей топливной колоши, вводимой в вагранку для корректировки температуры, определяемая из величины  $V_{coke}$  при существующем диаметре вагранки в свету.



Рис. 11. Структурная схема регулятора температуры

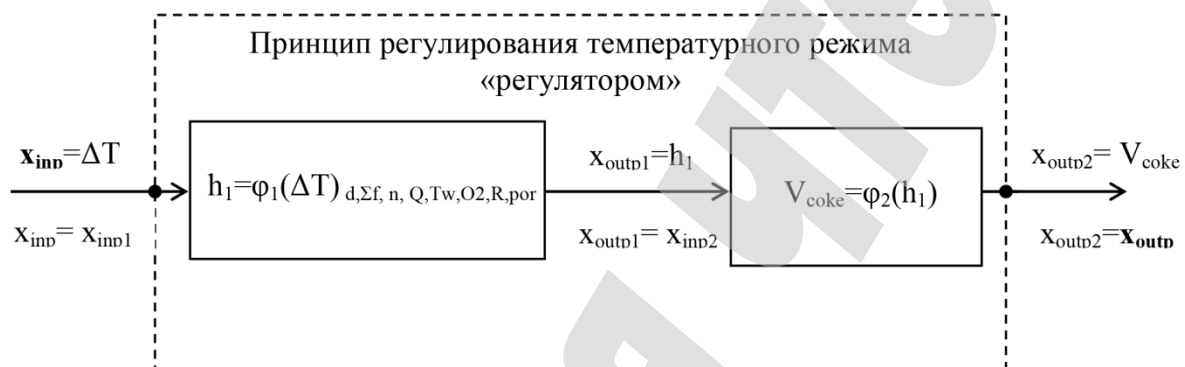


Рис. 12. Принцип регулирования температурного режима

Если уровень холостой колоши выше необходимого, то параметром, определяющим необходимость регулирования, является производительность вагранки:

$$\Delta h = h_{ah} - h_{sh} > 0, \quad (46)$$

а условие регулирования может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta h > 0 \rightarrow T > T_{ah}, \quad (47)$$

$$\Delta h > 0 \rightarrow Q < Q_{sh}, \quad (48)$$

где  $Q_{sh}$  – заданная величина производительности вагранки, т/ч.

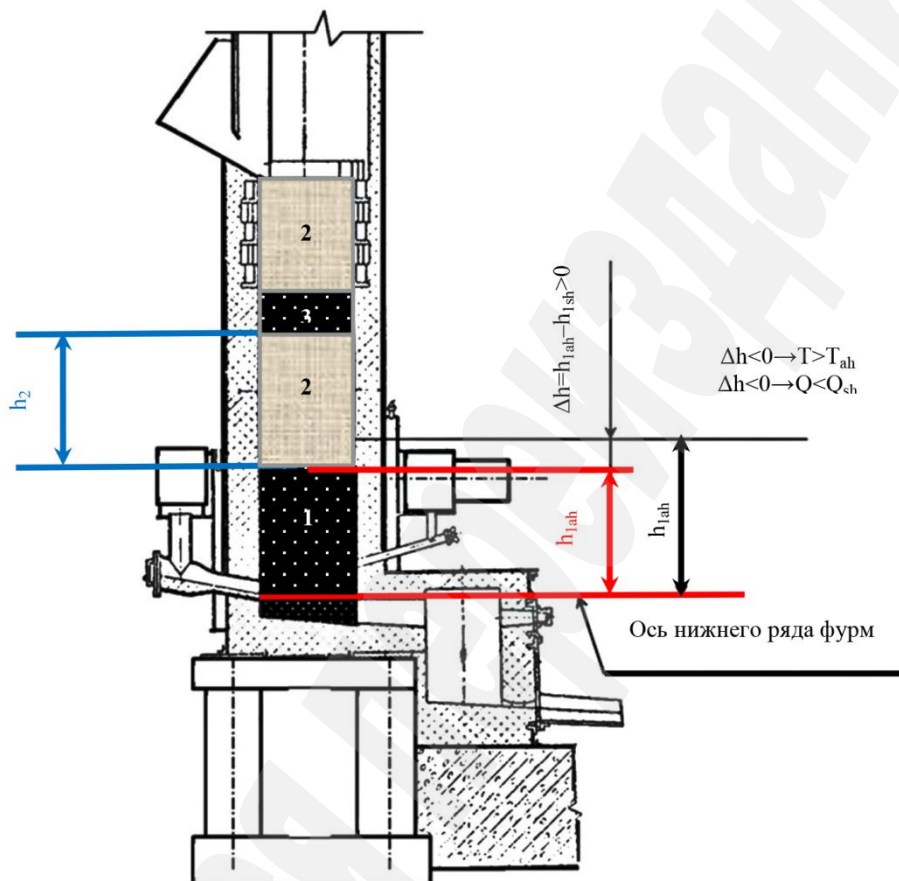
$$h_2 = \varphi_3(\Delta Q)_{d, \Sigma f, n, Q, T_w, O_2, R, por}, \quad (49)$$

где  $h_2$  – высота металлической колоши, мм;  $\varphi_3(\Delta Q)_{d, \Sigma f, n, Q, T_w, O_2, R, por}$  – функция перепада производительности вагранки при фактических конструктивных параметрах вагранки и фактических технологических режимах плавки.

$$V_{mel} = \varphi_4(h_2), \quad (50)$$

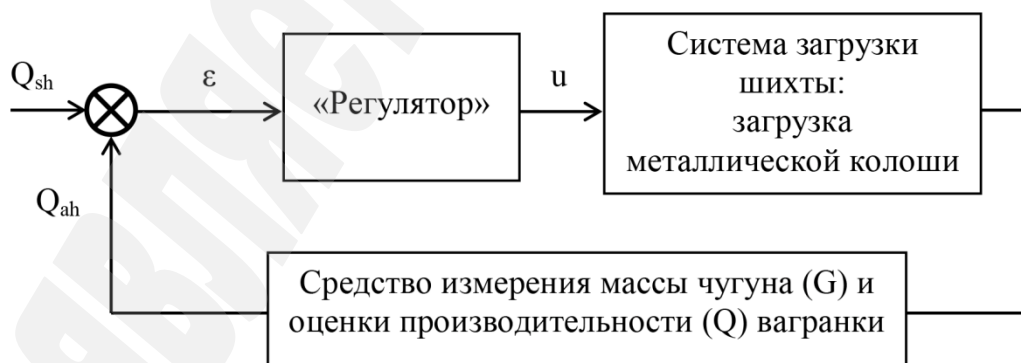
где  $V_{met}$  – объем шихты в металлической колоше,  $m^3$ ;  $\varphi_4(h_2)$  – функция высоты металлической колоши.

Поэтому регулирование производительности должно выполняться путем подачи дополнительной металлической колоши. На рис. 13–15 представлена демонстрация принципа регулирования.

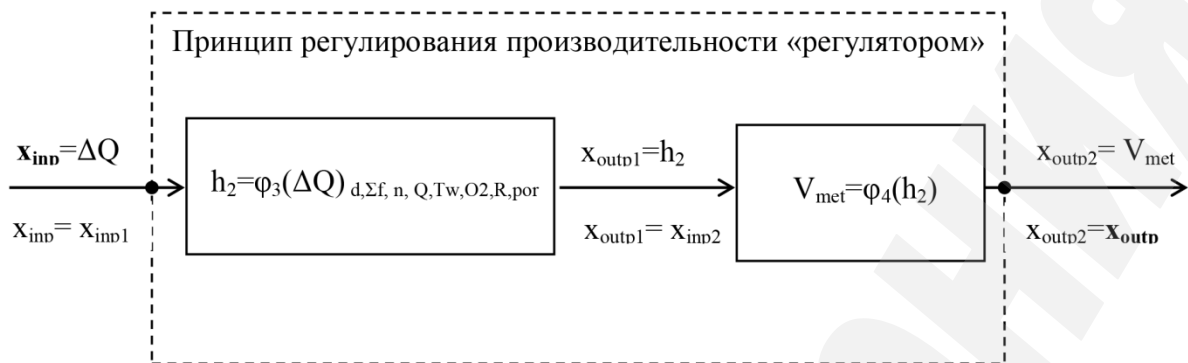


**Рис. 13.** Условия регулирования производительности:

1 – холостая колоша; 2 – металлическая колоша; 3 – рабочая топливная колоша

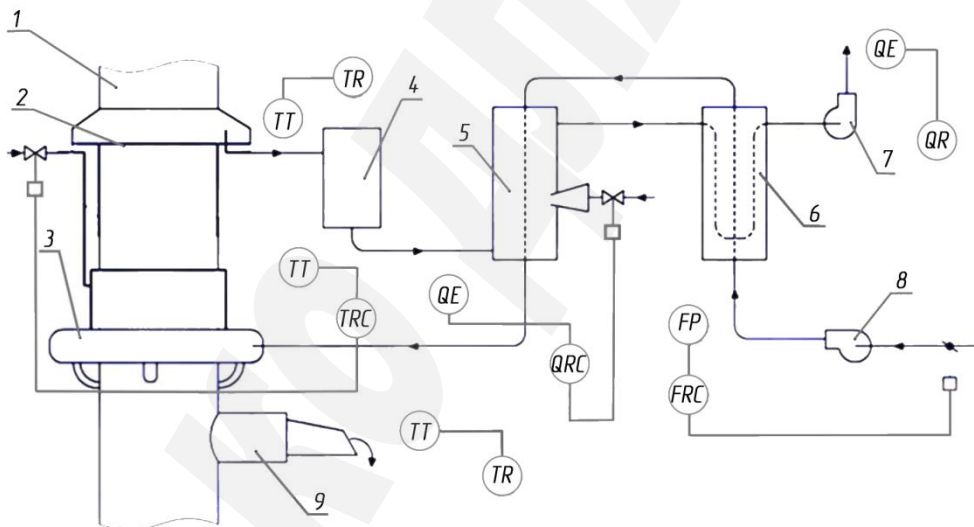


**Рис. 14.** Структурная схема регулятора производительности вагранки



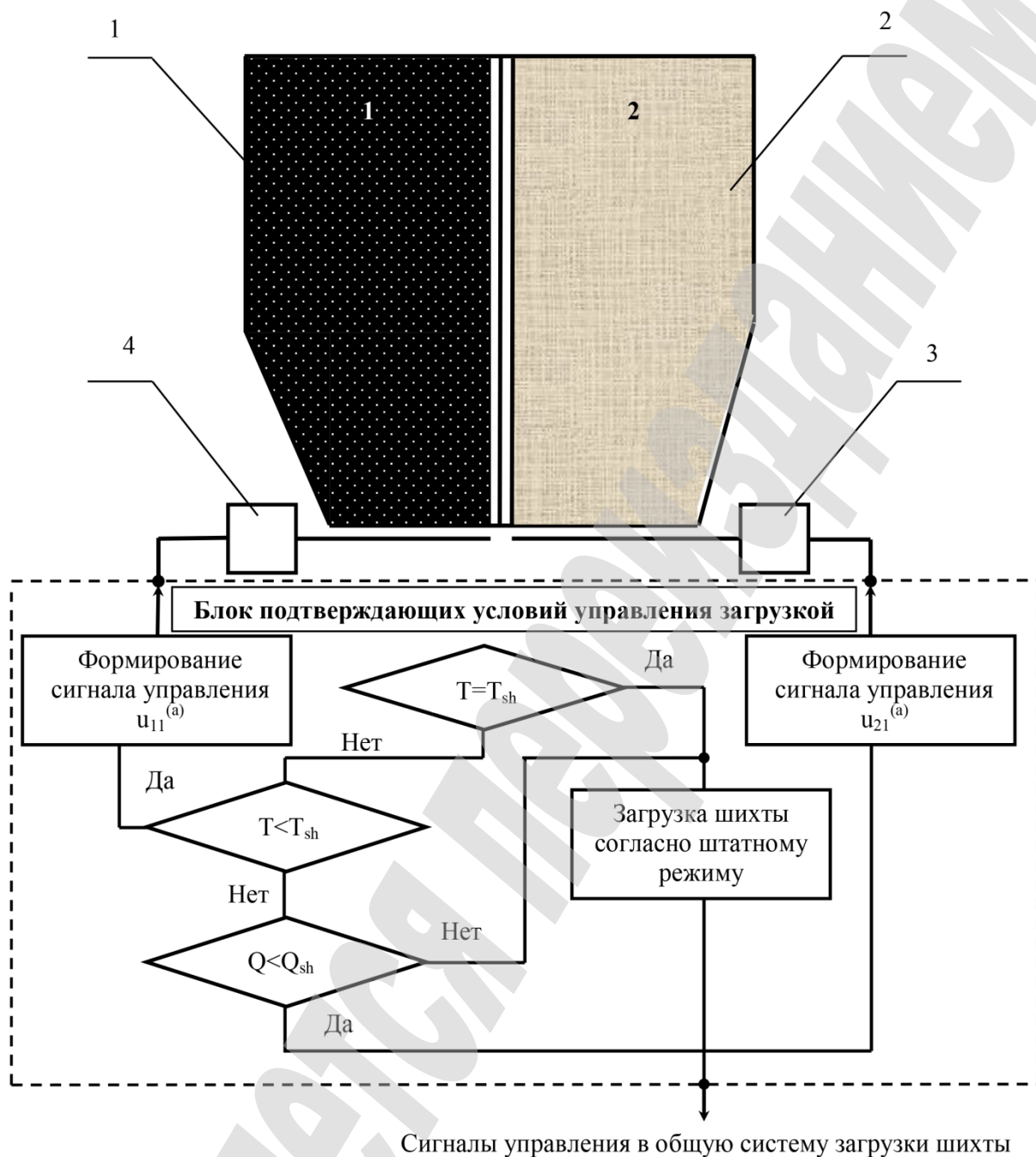
**Рис. 15.** Принцип регулирования производительности вагранки

Для практической реализации предложенного принципа регулирования необходимо проведение дополнительных исследований, посвященных математическому моделированию процесса и получению адекватного описания вида (43), (45), (49), (50). Полученные при этом результаты могут быть использованы либо как часть системы поддержки принятия решений в процессе управления в ручном режиме, либо для синтеза регулятора как части интегрированной системы автоматизированного управления ваграночной плавкой. Упрощенная функциональная схема системы автоматизации ваграночного процесса представлена на рис. 16.



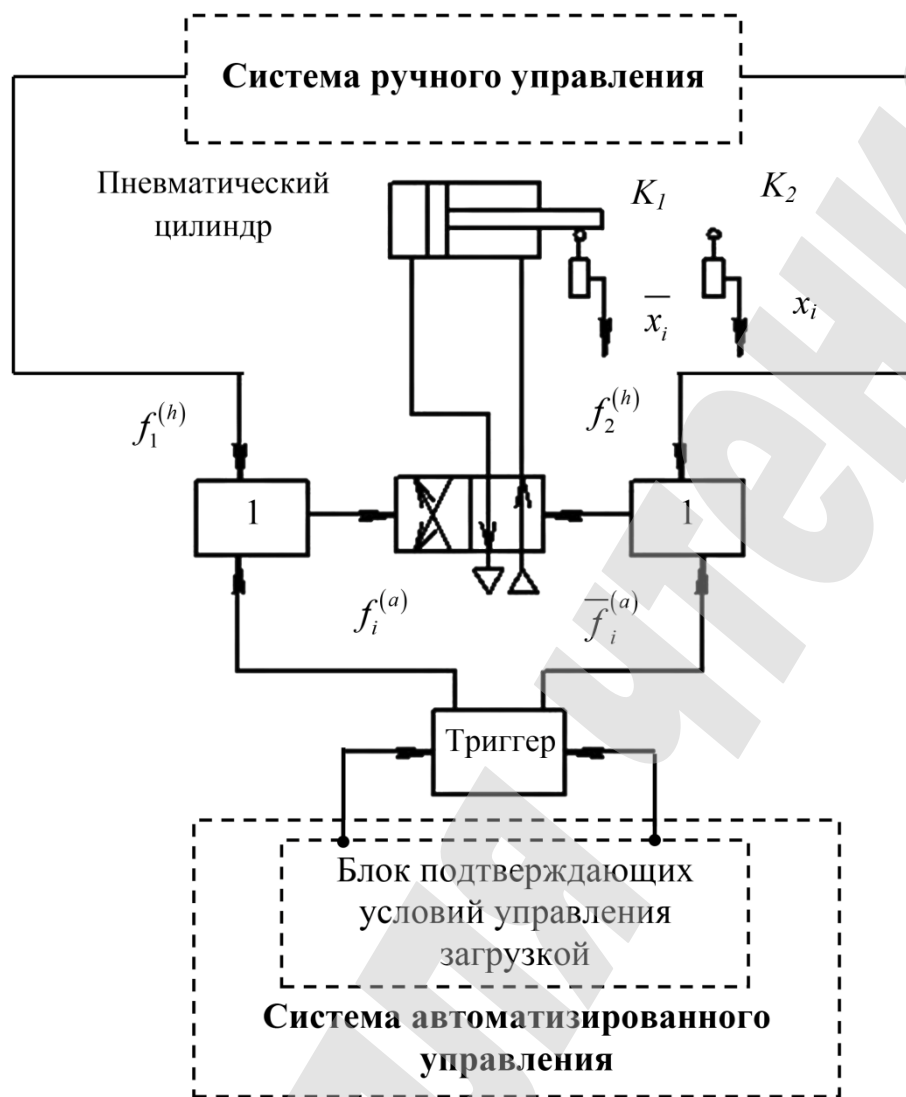
**Рис. 16.** Упрощенная функциональная схема системы автоматизации ваграночного процесса: 1 – вагранка; 2 – искрогаситель; 3 – фурменный пояс; 4 – мокрый очиститель; 5 – радиационный рекуператор; 6 – конвективный рекуператор; 7 – дымосос; 8 – вентилятор; 9 – копильник

Варианты технической реализации представлены на рис. 17, 18.



**Рис. 17.** Блок-схема части системы управления загрузкой, включающей регулирование температурного режима и производительности вагранки путем подачи рабочей топливной и металлической колош: 1 – бункер с коксом; 2 – бункер с металлической шихтой; 3 – исполнительный механизм системы загрузки металлической колоши; 4 – исполнительный механизм системы загрузки рабочей топливной колоши

На рис. 17 использованы следующие обозначения:  $u_{11}^{(a)}$  – включающий сигнал привода шибера бункера с коксом, приходящий из системы автоматизированного управления;  $u_{21}^{(a)}$  – включающий сигнал привода шибера бункера с металлической шихтой, приходящий из системы автоматизированного управления (рис. 18).



**Рис. 18.** Элемент системы управления шиберами бункерных заслонок

На рис. 18 приняты следующие обозначения:

$K_1, K_2$  – конечные выключатели ближний и дальний, соответственно;

$f_1^{(h)}, f_2^{(h)}$  – сигналы управления, приходящие на электромагниты распределителей из системы ручного управления;

$f_i^{(a)}, \bar{f}_i^{(a)}$  – сигналы управления, приходящие на электромагниты распределителей с триггера из системы автоматизированного управления;

$u_{i1}^{(a)}, u_{i0}^{(a)}$  – сигналы управления, приходящие из системы автоматизированного управления на включающий и отключающий входы триггера.

Представленные варианты технической реализации отображают принцип работы блока «система загрузки шихты» структурной схемы регулятора температуры и производительности вагранки, приведенной на рис. 11, 14.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

**Strengths.** Несовершенная система или процесс управления плавкой могут привести к получению брака отливок, снижению производительности, перерасходу ресурсов и технологической электроэнергии. Получение руководящим персоналом объективной информации о качестве управления возможно по показателям итога

технологического процесса, однако сам процесс характеризуется существенной неопределенностью как объект управления. Поэтому, даже имея выборку показателей технологического процесса, в основном трудно диагностировать его проблемный участок. В частности, получить ответ на вопрос, в каком именно участке или в какой именно момент времени реализации процесса допущены нарушения в части принятой системы управления плавкой. Такая проблема может быть решена путем использования предложенного алгоритма оценки «в целом» качества управления дуплекс-процессом. Совмещая в себе хорошо известный и простой математический аппарат, он позволяет количественно оценить качество управления дуплекс-процессом по таким показателям, как вероятность получения отклонений по химическому составу и длительности нестационарного режима, соответствующего времени стабилизации химического состава путем операций управления процессом, предусмотренном принятой в цехе системой управления. Это является сильной стороной данного исследования.

*Weaknesses.* Слабые стороны данного исследования связаны с тем, что итогом реализации алгоритма является лишь предоставление первичной информации для руководящего персонала, но он не содержит конкретных решений в части совершенствования системы или процессов управления.

*Opportunities.* Дополнительные возможности при использовании приведенных результатов в промышленных условиях связаны с использованием алгоритма как части системы поддержки принятия решений в случае ручного управления процессом или для разработки автоматизированной системы управления.

*Threats.* Предложенные в данной работе варианты практического использования алгоритма и возможные варианты технической реализации решений, получаемых на основе этого алгоритма, носят теоретический характер. Необходимым является практическая проработка и обоснование, предвещающие возможные решения по внедрению. Поэтому риски очевидны и связаны с прогнозированием окупаемости затрат на совершенствование системы управления.

## **8. Выводы**

1. Для создания алгоритма оценки «в целом» качества управления дуплекс-процессом «вагранка – миксер» предложено использование комбинированного математического аппарата, включающего в себя:

– стандартную статистическую обработку первичных данных, снятых в режиме серийных плавки: расчет статистических выборочных функций и проверку гипотезы о соответствии распределения данных нормальному закону, позволяющую корректное применение метода наименьших квадратов;

– регрессионный анализ для построения адекватной математической модели в виде уравнения регрессии, описывающей изменение содержания химического элемента в процессе плавки при выбранном варианте управления;

– дисперсионный анализ с целью проверки значимости влияния выбранного варианта управления на стабилизацию состава по химическому элементу, в отношении которого осуществляется управление. А также определения момента времени перехода процесса из нестационарного в стационарный режим вследствие применения выбранного варианта управления;



– оценка вероятности достижения заданного конечного состояния при выбранном варианте управления.

Обоснованием использования такого аппарата является его простота и эффективность с точки зрения получения объективной информации о качестве управления дуплекс-процессом. Итогом реализации алгоритма является количественная оценка доли чугуна, имеющего отклонение по содержанию  $i$ -го элемента химического состава по причине несовершенного процесса управления дуплекс-процессом. Она позволяет определить, на каком из участков технологического процесса требуется оптимизация управления, понимаемая в смысле обеспечения заданного конечного состояния при минимуме длительности нестационарного режима.

2. На основании данных серийных промышленных плавов выполнена реализация предложенного алгоритма. Полученные результаты позволили выявить участок дуплекс-процесса, несовершенный с точки зрения выбранного варианта управления. Им оказался процесс ваграночной плавки, не обеспечивающий при существующем варианте управления достижение заданного конечного состояния. За конечное состояние принят диапазон содержания в чугуне углерода, регламентированный техническими условиями, действующими на предприятии. Установлено, что процесс стабилизируется на участке термовременной обработки, о чем свидетельствует наступление момента времени, когда поле отклонений содержания углерода попадает внутрь поля допуска, предусмотренного техническими условиями. Это происходит между первым и вторым моментами отбора проб, что определяет момент времени перехода процесса из нестационарного в стационарный режим.

3. Предложена формализация задачи оптимального регулирования температурного режима ваграночной плавки и производительности вагранки, а также концептуальные варианты технической реализации системы регулирования. В частности, предложена простая схема регулятора, обеспечивающая возможность поддержания постоянства температуры чугуна и производительности вагранки путем регулирования уровня холостой и металлической колош. Управление процессом в этом случае осуществляется путем подачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы шиберов бункера с коксом и металлической шихтой, формируемых системами ручного или автоматизированного управления. Следует отметить, что для практической реализации такого решения необходимо иметь адекватные математические модели, описывающие последовательно включенные звенья системы регулирования. Полученные при этом результаты могут быть использованы либо как часть системы поддержки принятия решений в процессе управления в ручном режиме, либо для синтеза регулятора как части интегрированной системы автоматизированного управления ваграночной плавкой.

### **Литература**

1. Luis, C., Álvarez, L., Ugalde, M., Puertas, I. (2002). A technical note cupola efficiency improvement by increasing air blast temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, 120 (1-3), 281–289. doi: [http://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)01053-6](http://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)01053-6)

2. O'Brien, W. A., Ohio, F. (1948). Pat. No. 2 443 960 USA. *Control means for cupola furnaces*. United States Patent Office. Serial No. 525,686 5 Claims (Cl. 266–30)
3. Матюхин, В. И., Ярошенко, Ю. Г., Матюхина, А. В., Дудко, В. А., Пуненков, С. Е. (2018). *Повышение энергоэффективности технологических процессов выплавки чугуна в шахтных печах ваграночного типа. Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности*. Екатеринбург: УрФУ, 131–139.
4. Селянин, И. Ф., Феоктистов, А. В., Модзелевская, О. Г., Бедарев, С. А. (2014). Разработка ресурсосберегающих технологий ваграночного процесса на специализированном исследовательском комплексе. *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество Новокузнецк*, 150–155. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22406637>
5. Конончук, С. В., Сабирзянов, Т. Г. (2013). Улучшение работы коксовой вагранки на основе исследования взаимосвязи между параметрами ваграночного процесса. *Металлургия машиностроения, 1*, 8–13.
6. Isnugroho, K., Birawidha, D. C. (2018). The production of pig iron from crushing plant waste using hot blast cupola. *Alexandria Engineering Journal*, 57 (1), 427–433. doi: <http://doi.org/10.1016/j.aej.2016.11.004>
7. Larsen, E. D., Clark, D. E., Moore, K. L., King, P. E. (1997). *Intelligent control of Cupola Melting*. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/56c2/96af1d56d5cd963a5bcc38635142e5fa1968.pdf>
8. Moore, K. L., Abdelrahman, M. A., Larsen, E., Clark, D., King, P. (1998). Experimental control of a cupola furnace. *Proceedings of the 1998 American Control Conference*. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207). doi: <http://doi.org/10.1109/acc.1998.703360>
9. Jezierski, J., Janerka, K. (2011). Selected Aspects of Metallurgical and Foundry Furnace Dust Utilization. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20 (1), 101–105.
10. Труфанов, И. Д., Чумаков, К. И., Бондаренко, А. А. (2005). Общетеоретические аспекты разработки стохастической системы автоматизированной экспертной оценки динамического качества производственных ситуаций электросталеплавления. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6 (2 (18)), 52–58.
11. Труфанов, И. Д., Метельский, В. П., Чумаков, К. И., Лозинский, О. Ю., Паранчук, Я. С. (2008). Энергосберегающее управление электротехнологическим комплексом как база повышения энергоэффективности металлургии стали. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 6 (1 (36)), 22–29.
12. Lutsenko, I., Fomovskaya, E. (2015). Identification of target system operations. The practice of determining the optimal control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (2 (78)), 30–36. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.54432>
13. Lutsenko, I., Vihrova, E., Fomovskaya, E., Serdiuk, O. (2016). Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (4 (80)), 42–50. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.66307>
14. Дёмин, Д. А. (2013). Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях

неопределенности. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 5 (9 (65)), 45–53. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452>

15. Demin, D. (2017). Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (4 (87)), 51–63. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>

16. Demin, D. A. (2012). Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 52–58.

17. Дёмин, Д. А. (2011). Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой. *Технологический аудит и резервы производства*, 1, 15–24. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4082>

18. Чарыков, А. К. (1984). *Математическая обработка результатов химического анализа*. Ленинград: Химия, 168.