

УДК 681.5.015.24:621.785.34

## Разработка модели для оптимизации управления термической обработкой стали при непрерывном горячем оцинковании\*

М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## Model for optimizing control of the steel heat treatment in the continuous hot-dip galvanizing

M.Y. Ryabchikov, E.S. Ryabchikova

Magnitogorsk State Technical University

Предложена модель для оптимизации управления температурой стальной полосы при производстве оцинкованного листового проката с целью снижения затрат топлива. На основе обзора предложений по управлению температурой полосы показано, что оптимизация затруднена вследствие сложности получения пригодной для этого модели и гарантии устойчивости. Модель должна точно прогнозировать не только температуру полосы, но и влияние разных управляющих воздействий на тепловые потери. Однако относительно небольшое влияние некоторых управляющих воздействий на доступные для контроля сигналы сложно выявить на фоне ошибок, обусловленных упрощенным описанием теплообмена и действия неизвестных возмущений. Как следствие, влияние на затраты топлива таких воздействий, как расход воздуха на сжигание топлива, и число включенных горелок, неопределенно. Для решения проблемы применен метод синтеза модели, основанный на определении ее структуры и настроек путем тестирования по данным технологического процесса за значительный интервал времени. Метод предполагает сегментацию данных процесса во времени исходя из возмущений по сортаменту и значительного изменения скорости линии. Для каждого сегмента индивидуально определены возмущения по скорости изменения сигналов, которые постоянны в течение сегмента времени. Целью являлось получение такой структуры и настроек модели, при которых отсутствуют сегменты с аномально низкой точностью прогноза оценок температуры рабочего пространства, а также температуры отходящих дымовых газов. В результате получена модель, оперирующая сигналами в виде приращений относительно начального для сегмента момента времени, которая допускает оптимизацию управления с целью снижения тепловых потерь с отходящими дымовыми газами. Оценка возможности учета при оптимизации тепловых потерь через стенки показала, что это требует применения дополнительных средств контроля распределения температур в стенке или моделей, оперирующих абсолютными значениями сигналов. Предложенная модель не требует значительных вычислительных ресурсов и допускает использование при оптимизации управления простого метода, предложенного А.А. Красовским, что позволяет реализовать оптимизацию непосредственно на технологических контроллерах.

EDN: UCLCJJ, <https://elibrary/uclcj>

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10058, <https://rscf.ru/project/23-29-10058/>.

**Ключевые слова:** непрерывное горячее оцинкование, тепловые потери, оптимизация управления, температура полосы, оптимальное управление

The paper proposes a model to optimize control of a steel strip temperature in manufacture of a galvanized sheet metal product to reduce the fuel costs. Based on reviewing proposals for the strip temperature control, it shows that optimization is hindered by complexity in obtaining a suitable model and guaranteeing stability. The model should forecast accurately not only the strip temperature, but also the effect of various control actions on the heat losses. However, a relatively low effect of certain control actions on the signals available for monitoring is difficult to detect against the background of errors caused by simplified description of the heat exchange and action of the unknown disturbances. As a result, the effect of such actions as air consumption in the fuel combustion and the number of burners on the fuel costs is uncertain. To solve the problem, a method of model synthesis is applied based on determining its structure and settings by testing according to the technological process data for a significant time interval. The method involves segmenting the process data in time based on the product range disturbances and significant alterations in the line speed. For each segment, disturbances are determined separately by the alteration rate in the signal values that are unchanged during a time segment. The goal is to obtain such a structure and settings of the model, where segments with the abnormally low accuracy in forecasting the working space temperature, as well as the exhaust flue gases temperature, are missing. As a result, a model is obtained that operates with signals in the form of increments relative to the initial time for a segment, which allows for control optimization to reduce heat losses with the exhaust flue gases. Assessment of the possibility of accounting for the heat losses through the walls during optimization shows that this requires introduction of additional means in monitoring temperature distribution in the wall or the models operation with the absolute signal values. The proposed model does not require significant computing resources and allows the use of a simple method proposed by A.A. Krasovsky in monitoring the optimization, which makes it possible to implement it directly in the process controllers.

EDN: UCLCJJ, <https://elibrary/uclcj>

**Keywords:** continuous hot-dip galvanizing, heat losses, control optimization, strip temperature, optimal control

Оцинкованная стальная полоса (далее полоса) получила широкое применение в автомобильной и строительной промышленности. Для производства больших объемов оцинкованного листового проката наиболее эффективно использовать агрегат непрерывного горячего оцинкования (АНГЦ). Причем на одном АНГЦ можно производить широкий ассортимент продукции различного назначения, варьируя толщину и ширину полосы, марку стали, требования к механическим свойствам и характеристикам покрытия.

Металл поступает на АНГЦ в виде рулонов полосы. Так как процесс оцинкования осуществляется непрерывно, полосы разных рулонов соединяют путем сварки. При этом необходимо обеспечить надлежащее (иногда индивидуальное) качество полосы каждого рулона, поданного на АНГЦ.

Перед нанесением цинкового покрытия на АНГЦ выполняют термическую обработку ста-

ли (отжиг), которая предполагает нагрев полосы до заданной температуры, выдержку при этой температуре и охлаждение до уровня, близкого к температуре расплава в ванне оцинкования. Температура металла и продолжительность термической обработки оказывают значительное влияние на механические свойства продукции, а также могут стать причиной возникновения дефектов, в том числе покрытия [1–3].

Нагрев полосы обычно происходит в многозонной нагревательной печи косвенного принципа действия (далее печь) в атмосфере защитного восстановительного газа с помощью радиантных труб (далее трубы), где сжигается топливо. Сложность управления нагревом заключается в значительной инерции печи как объекта управления, а также в том, что температура металла известна только на выходе из печи. Это приводит к необходимости упреждающего управления работой системы нагрева.

При снижении расхода топлива температура труб может оставаться высокой продолжительное время. Поэтому на многих АНГЦ при управлении периодически отключают трубы, продолжая подавать в них воздух. Наличие нескольких зон, а также периодическое отключение некоторых горелок приводит к тому, что особенности управления системой нагрева могут оказывать существенное влияние на затраты энергии.

В целом доля термической обработки составляет около 65 % общих энергетических затрат на технологический процесс АНГЦ, причем примерно половина идет на покрытие тепловых потерь [4, 5].

Цель статьи — разработка моделей, которые позволят не только точно прогнозировать температуру металла, но и решать задачи оптимизации управления с учетом уровня тепловых потерь.

**Систематизация опыта и проблем оптимизации отжига полосы.** В работах [6–11] по управлению термической обработкой полосы указаны различные дополнительные цели, которых следует достичь при модельно-упреждающем управлении температурой металла. Помимо точного обеспечения заданной температуры металла стремятся обеспечить следующее:

- стабильное качество и минимум брака [6, 7];
- максимальную скорость линии [6, 7, 9];
- минимальное энергопотребление [6–9, 12, 13];
- снижение выбросов  $\text{CO}_2$  [6];
- ограничение температуры труб [6, 11] и внутренней поверхности стенок печи [6, 9] для предотвращения повреждений и ускоренного износа;
- ограничение перепада между температурами полосы и валков для предотвращения коробления металла [9];
- предотвращение больших колебаний расхода топлива [10] и равномерной загрузки горелок [11].

Дополнительные цели при оптимизации требуют усложнения модели для упреждающего управления, и, соответственно, увеличения числа факторов или введения новых переменных для определения состояний объектов, не контролируемых путем измерения.

Потенциально при отсутствии дополнительных целей можно использовать простые

модели без учета законов теплообмена. Так, в работе [14] предложена модель, основанная на представлении траектории изменения температуры металла во времени  $\tau$  с помощью экспоненты  $\exp(-T\tau)$ , где  $T$  — постоянная времени. Постоянную времени  $T$  подстраивают под процесс, и модель применяют для упреждающего управления по возмущению. Получены аналитические выражения для расчета упреждающего воздействия, но вопрос разработки модели для прогноза постоянной времени  $T$  при разных условиях и режимах не обсуждался.

Разработка и использование таких моделей предполагает наличие некоторого неизменного во времени алгоритма, который будет устранять неопределенность в способе формирования управляющих воздействий. Другой проблемой являются сложности интеграции новых компонентов на основе известных причинно-следственных связей для достижения дополнительных целей путем оптимизации.

В публикациях [6, 9, 15, 16] предложена более сложная модель для упреждающего управления температурой полосы. Модель включает в себя компоненты для определения эффекта горения топлива и температурного состояния труб, стен печи, роликов и полосы. Принята грубая дискретизация геометрических параметров рабочего пространства (РП) печи. Расчет теплообмена с продуктами сжигания топлива выполнен только для первой трубы каждой зоны. При этом определена обобщенная оценка температуры поверхности трубы.

Для прочих работающих труб оценка температуры получена исходя из гипотезы о линейном распределении температур по трубам зоны [17]. Полоса в печи была разбита по длине на сегменты, для которых определен тепловой поток на полосу исходя из текущего положения сегмента в печи при учете теплообмена с трубами и роликами. При расчете теплообмена в стенке печи использовано одномерное уравнение теплопроводности. Отмечено, что модель позволяет минимизировать энергопотребление или максимизировать производительность при ограничениях на температуру труб.

В работе [6] отклонение прогноза температуры полосы на выходе из печи от измеренного значения объяснено непостоянством коэффициента теплообмена. То есть наблюдаемым неизвестным параметром является коэффициент теплообмена при определении теплового пото-

ка на металл по данным измерения температур РП и полосы на входе в печь и на выходе из нее.

Похожие по структуре модели предложены в работах [8, 11]. В модели [11] каждые три трубы объединены в один виртуальный нагревательный элемент. Дискретизация труб предполагает наличие набора сегментов со своими температурами виртуального нагревателя, РП (внутренней поверхности стен) и полосы. Отклонение оценки температуры полосы на выходе из печи по модели от результатов измерений объяснено изменением температуры поверхности стен печи, которая является наблюдаемым параметром процесса. В модели [8] за наблюдаемый параметр процесса выбрана неизвестная начальная температура полосы на входе в секцию.

Очевидно, что для решения дополнительных оптимизационных задач модели [6, 8, 11] должны точно прогнозировать не только температуру полосы, но и влияние управления на критерии оптимизации (например, на расход топлива). В то же время модели, настраиваемые по данным о температуре полосы, демонстрируют возможность достаточно больших ошибок ее прогноза. При этом авторы не указывают степень влияния учета температурного состояния труб и роликов на точность прогноза температуры полосы. В подобной ситуации сложно гарантировать точный прогноз влияния вариации управления (например, схемы включения горелок) на расход топлива.

В работах [6, 8, 11] можно выделить четыре типовые задачи при управлении температурой полосы, решаемых последовательно:

- 1) выбор скорости линии и диапазона допустимых температур полосы на выходе секций термической обработки для разных рулонов, подаваемых на АНГЦ;

- 2) определение динамики изменения скорости линии;

- 3) планирование траекторий изменения температуры полосы в точках контроля, измеряемой температуры РП или ее оценок;

- 4) обеспечение заданной динамики изменения температуры полосы в точках контроля.

При планировании траекторий (задача 3) в работах [6, 8, 11] использованы похожие методы, основанные на численном решении задачи нелинейной оптимизации с учетом ограничений. Для минимизации вычислительной нагрузки определена предельно грубая допустимая дискретизация во времени. Критерии содержат два

суммируемых компонента, которые характеризуют отклонение температуры полосы от заданного значения и желательность  $\psi$  управляющих воздействий  $u$ . Для упрощения поиска выполнен переход к задаче неограниченной оптимизации. Учет ограничений по управляющим воздействиям реализован при определении желательности  $\psi$ . Для устранения ограничений по температуре полосы использованы штрафы в функционале  $J$  для оптимизации.

При итерационном поиске для определения оптимальной траектории изменения температуры полосы под действием технологических возмущений [6, 8] использован метод Гаусса — Ньютона. Некоторые частные производные  $J$  по  $\psi$  определены аналитически, остальные рассчитаны численно. Недостатком такой оптимизации является высокая вычислительная нагрузка, что затрудняет реализацию управления непосредственно на технологических контроллерах.

Метод оптимизации, разработанный в статье [6], также можно применять для обеспечения заданных траекторий (задача 4). Однако непонятно, как ошибки моделирования повлияют на качество управления.

В публикациях [18–24] для упреждающего управления предложено использовать только эмпирические модели. В качестве обоснования авторы указывают низкую точность прогноза и высокие вычислительные затраты для оптимизации с помощью интерпретируемых моделей. При применении уже настроенных эмпирических моделей вычислительные затраты незначительны, и оптимизация может быть основана на методах Монте-Карло.

Так, для планирования траекторий при технологических возмущениях предложено задействовать искусственную нейронную сеть (ИНС) [18]. На входы ИНС поступают текущие значения температуры РП в зонах и их производных по времени, а также температур полосы на входе в печь и на выходе из нее. На выходе ИНС формирует прогноз изменения температуры полосы на выходе из печи через некоторый малый интервал времени. Для определения оптимальных траекторий предложено использовать генетические алгоритмы.

Похожие методы определения траекторий предложены в публикациях [19–24], трудность применения которых связана с двумя проблемами. Так как АНГЦ обычно работают в типовых режимах, накопленные данные не позволяют создать представительную выборку для на-

стройки ИНС. Точность прогноза может сильно и непредсказуемо изменяться в разных ситуациях. Как следствие, при прогнозе используют относительно простые структуры ИНС. Так, в работе [21] отмечена целесообразность применения ИНС с малым числом нейронов для возможности работы в новых режимах.

Другой проблемой является то, что для прогноза на заданный интервал времени может потребоваться итерационное применение ИНС. При этом вероятен рост ошибки с увеличением периода времени, на который сделан прогноз.

Можно выделить две группы предложений для обеспечения возможности оптимизации по эмпирическим моделям. Первая группа связана с совершенствованием методов настройки и структур эмпирических моделей. Работы [19, 20, 22, 23] направлены на получение модели при проблемах исходной выборки. Например, в статье [23] предложен ансамбль из трех эмпирических моделей для прогнозирования заданных значений температуры полосы печей прямого и косвенного нагрева для отжига полосы. Отмечены преимущества такой системы в прогнозе для новой продукции. Однако следует учитывать, что решать задачи экстраполяции с помощью нелинейных эмпирических моделей сложно.

Вторая группа предложений связана с тем, что на выходах эмпирической модели напрямую формируется решение оптимизационной задачи. Так, в работе [18] помимо ИНС для прогноза температуры полосы предложена ИНС для статической оптимизации. На ее выходах формируются требуемые значения температур полосы в зонах, а также рациональная скорость линии на основании опыта управления.

Решение похожей задачи приведено в трудах [25, 26], где, исходя из накопленного опыта и заданной температуры полосы на выходе из печи, ИНС прогнозируют требуемые управляющие воздействия. В работе [25] модель определяет требуемый расход топлива по данным о заданной температуре полосы, скорости линии, соотношении между газом и воздухом и по другим параметрам. Тем самым модель воспроизводит логику управления, которая в прошлом оказалась эффективной.

Однако в каждой ситуации управление может иметь свои особенности, вследствие чего никакой из существующих вариантов траекторий использовать нельзя. Кроме того, выбор вариантов управления при оптимизации огра-

ничен примененными ранее на практике вариантами, которые могут не удовлетворять в полной мере выбранному критерию оптимизации.

Таким образом, оптимальное упреждающее управление термической обработкой затруднено в силу сложности получения пригодной для этого модели. Модель должна точно прогнозировать не только температуру полосы, но и влияние всех управляющих воздействий на критерии оптимизации, к которым относятся расходы топлива и воздуха, число включенных горелок. Модель должна позволять оценивать последствия применения неопробованных на практике вариантов управления, а вычислительные затраты на оптимизацию — реализовывать управление на базе технологических контроллеров.

**Постановка задачи по разработке модели.** Для достижения целей оптимизации могут потребоваться новые варианты управления (ранее неопробованные на практике). Соответственно, оценка последствий их применения с помощью моделей может потребовать решения задачи экстраполяции.

С учетом этого целесообразно включить в состав модели интерпретируемые компоненты. При этом решение задачи оптимального управления с применением моделей должно быть нетребовательным к вычислительной нагрузке. Последнюю можно уменьшить, упростив модель или выбрав менее затратный в вычислительном плане метод оптимизации. Степень упрощения ограничена возможным сопутствующим снижением точности прогноза, на которую существенно влияют неизвестные возмущения.

В работах [27, 28] показано, что одной из основных причин низкой точности прогноза температуры полосы является недостаток информации о фактическом температурном состоянии РП в печи. Контроль температуры РП осуществляется в отдельных точках. При малом изменении измеренной температуры нет гарантий, что в прочих частях РП печи температура изменится также. С учетом этого предложено при прогнозе температуры полосы использовать обобщенные оценки температуры РП, а не результаты ее измерения. Их можно оперативно получить по данным о температуре полосы на входе в секцию термической обработки и на выходе из нее.

В работе [29] продемонстрированы преимущества модели определения неизвестных воз-

мушений на основе отклонения оценки температуры РП от результатов измерения перед моделями, предложенными в публикациях [6, 8, 11]. Например, коррекция коэффициента теплообмена [6] приводит к перенастройке упрощенной модели прогноза по температуре полосы на текущий режим, но при прохождении сварного шва параметры металла резко изменяются, что может стать причиной существенной ошибки. Настройки упрощенной модели целесообразно выбирать исходя из сопоставимой точности при разных условиях [30].

В моделях [6, 8, 11] рассчитаны обобщенные оценки температуры труб и внутренней поверхности стен печи. Однако изменения температур стен в отдельных областях печи и отдельных труб не определены. Как следствие, в модели расчет теплообмена ведется между оценками температуры, что приводит к неопределенности настроек модели для одновременного определения обобщенных оценок разных температур. Причиной является возможность получения одной и той же температуры полосы на выходе из печи при различных соотношениях между температурами стен и труб.

В работе [28] предложено использовать по одной оценке температуры РП для каждой зоны печи. Оценки обобщают температуры стен и труб. Для управления предложены две модели.

Первая модель предназначена для решения двух задач: получения оценок температуры РП и ее прогноза на выходе из печи при заданных значениях оценок. Особенности настройки этой модели рассмотрены в публикациях [27, 29]. Авторы используют данные в периоды существенного изменения толщины полосы, и по ним перед сменой сортамента определяют оценки температуры РП. Оценки применяют для прогноза изменения температуры полосы на выходе из печи при смене сортамента. Модель настраивают по данным о смене сортамента путем минимизации ошибки прогноза.

Вариант модели для условий печи с двумя зонами рассмотрен в работе [28]. Теплообмен в каждой зоне упрощенно описан уравнением

$$\frac{dT_m(\tau)}{d\tau} = a[T_n - T_m(\tau)]; \quad a = \frac{\alpha_m}{h}, \quad (1)$$

где  $T_m$  — температура металла (полосы);  $T_n$  — оценка температуры РП, принятая постоянной за время движения металла;  $\tau$  — время пребывания полосы в секции;  $\alpha_m$  — параметр настройки;  $h$  — толщина полосы.

Принимая известным по данным измерений перепад  $\Delta T_{п.м}$  между оценками температур в первой  $T_{п1}$  и второй  $T_{п2}$  по ходу движения полосы зонах, получаем следующие выражения для их определения:

$$T_{п1} = \frac{\frac{T_{м1}(0)}{a_1\tau_1 + 1} - T_{м2}(\tau_2) + a_2\tau_2 [\Delta T_{п.м} - T_{м2}(\tau_2)]}{a_2\tau_2 + \frac{a_1\tau_1}{a_1\tau_1 + 1}}; \quad (2)$$

$$T_{п2} = T_{п1} + \Delta T_{п.м},$$

где индексы «1» и «2» соответствуют первой и второй зонам;  $T_{м1}(0)$  и  $T_{м2}(\tau_2)$  — температура полосы на входе в первую зону и на выходе из второй зоны.

Потенциально упреждающее управление  $T_n$  можно реализовать, используя только первую модель, путем коррекции режима перед технологическим возмущением. Но это не позволяет решать дополнительные задачи оптимизации, включая энергосбережение, и может быть сопряжено с проблемами качества управления. Для получения оценок  $T_n$  требуется полный проход полосы через секцию. Это увеличивает инерцию и запаздывание объекта и имеет два негативных последствия:

- значительные отклонения оценки  $T_n$  от заданного значения в периоды смены скорости линии или параметров полосы, когда распределение температуры в РП интенсивно меняется;
- увеличение затрат энергии из-за необходимости обеспечения требуемых значений  $T_n$  задолго до прохождения сварного шва, так как устойчивость может быть гарантирована только при значительной продолжительности переходных процессов.

С учетом этого вторую модель применяют для прогноза  $T_n$  исходя из параметров полосы, скорости линии, расходов топлива и воздуха на зоны. При этом температуру полосы используют только на входе в секцию. Модель настраивают по данным, обработанным с помощью первой модели путем получения оценок  $T_n$ . Вторая модель предназначена для решения двух задач: планирования динамики изменения заданных значений оценок  $T_n$  и формирования упреждающего воздействия при изменении сортамента или скорости линии для компенсации действия возмущения на  $T_n$ .

Особенности настройки второй модели рассмотрены в работах [27, 28, 31]. Сложность настройки обусловлена наличием неизвестных возмущений, имеющих низкочастотные и трен-

довые компоненты. Для настройки модели используют данные набора отдельных специально отобранных периодов времени. Сигналы модели представляют в виде приращений относительно начального для периода момента времени. Совместно с общими для всех периодов параметрами настройки для каждого периода индивидуально определяют параметр  $x_5$ , характеризующий неизвестные возмущения.

Вторую модель создают индивидуально для каждой зоны секции. Например, модель для зоны секции выдержки [28] имеет вид

$$\frac{dT_{\text{п}}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{x_3} \{ \Delta V_{\text{т}}(\tau)x_1 - \Delta T_{\text{п}}(\tau)x_2 - S[\Delta T_{\text{п}}(\tau) - \Delta T_{\text{м0}}(\tau)] - x_4 \Delta E(\tau) + x_5 \}. \quad (3)$$

Здесь  $x_3$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_4$  — параметры настройки;

$$\Delta V_{\text{т}}(\tau) = V_{\text{т}}(\tau) - V_{\text{т}}(0); \quad \Delta T_{\text{п}}(\tau) = T_{\text{п}}(\tau) - T_{\text{п}}(0);$$

$$S = bLhv/(\alpha L + hv); \quad \Delta T_{\text{м0}}(\tau) = T_{\text{м0}}(\tau) - T_{\text{м0}}(0);$$

$$\Delta E(\tau) = V_{\text{п.г}}(\tau)T_{\text{п}}(\tau) - V_{\text{п.г}}(0)T_{\text{п}}(0),$$

где  $V_{\text{т}}(\tau)$ ,  $T_{\text{п}}(\tau)$ ,  $T_{\text{м0}}(\tau)$  и  $V_{\text{п.г}}(\tau)$  — расход топлива, температура РП, температура металла на входе в секцию и расход продуктов горения в момент времени  $\tau$  соответственно;  $V_{\text{т}}(0)$ ,  $T_{\text{п}}(0)$ ,  $T_{\text{м0}}(0)$  и  $V_{\text{п.г}}(0)$  — те же параметры в начальный для периода момент времени;  $b$  — ширина полосы;  $L$  — длина полосы в секции;  $v$  — скорость линии.

Результаты настройки модели [28] показали достаточно высокую точность прогноза температуры полосы с применением моделей (2) и (3) для отобранных периодов времени. В то же время неизвестны последствия применения этих моделей для энергосберегающего управления.

Уменьшить затраты энергии при заданных сортаменте и скорости линии можно путем снижения следующих параметров: продолжительности избыточного нагрева металла, тепловых потерь с отходящими дымовыми газами и тепловых потерь от внешней поверхности стен печи.

Точный прогноз температуры полосы позволяет уменьшить затраты энергии путем снижения продолжительности избыточного нагрева металла в периоды технологических возмущений. Однако модель (3) не учитывает число включенных горелок в зоне, а точный прогноз возможен только при наличии неизменной во времени зависимости между расходом топлива и числом включенных горелок. Если отбор дан-

ных для настройки модели происходит без учета особенностей алгоритма управления и работы горелок, то точность прогноза может упасть.

При прохождении через печь полоса периодически оказывается рядом с выключенными и включенными горелками. Изменение числа включенных горелок оказывает большее воздействие на обобщенные оценки  $T_{\text{п}}$ , чем изменение расхода топлива на уже работающих горелках. Изменение расхода топлива ориентировано на коррекцию температуры в локальных областях РП, где работают горелки. В то же время периодическое включение и выключение горелок влияет на тепловые потери с дымовыми газами.

Чтобы учесть при оптимизации тепловые потери с дымовыми газами, необходимо разработать модель для точного прогноза температуры дыма. Причиной варьирования тепловых потерь может являться изменение числа включенных горелок, а также расходов топлива и воздуха на зону. Но в модели (3) принято допущение о постоянстве линейной зависимости между температурой отходящих из зоны дымовых газов и обобщенной оценкой  $T_{\text{п}}$  зоны. Поэтому новый алгоритм управления горелками может привести к существенному уменьшению точности прогноза.

Снизить тепловые потери от внешней поверхности стен печи можно путем перераспределения тепловых нагрузок между зонами. В модели (3) изменение тепловых потерь от стен, с которыми соприкасается РП зоны, принято пропорциональным изменению оценки  $T_{\text{п}}$ . Оптимизация требует достоверной информации о соотношении между значениями параметров настройки  $x_2$  зон. Другой проблемой является использование приращений сигналов в модели (3), которая не оперирует непосредственно самим уровнем тепловых потерь. Одной из причин перехода к приращениям являлось возможное непостоянство тепловых потерь.

Таким образом, энергосберегающее управление требует разработки модели прогноза температуры дымовых газов, изучения влияния неопределенности значений параметров на результаты оптимизации, а также дальнейшего совершенствования модели (3). Однако решение этих задач затруднено. Относительно небольшое влияние отдельных особенностей процесса на точность прогноза температуры полосы и дымовых газов бывает сложно вы-

явить на фоне ошибок, обусловленных упрощенным описанием теплообмена или действием неизвестных возмущений.

**Способ настройки моделей.** При настройке модели (3) используют данные отдельных периодов времени. Для учета начального для периода времени неустановившегося состояния объекта применяют параметр  $x_5$ . Согласно модели (3), при изменении скорости линии и параметров полосы произойдет скачкообразная смена скорости изменения оценки  $T_n$  зоны. Упрощенная модель может допускать существенные ошибки при определении этого изменения. Учесть эти ошибки можно также с помощью параметра  $x_5$ . Рост точности прогноза за счет определения  $x_5$  позволяет выявить влияние на процесс прочих возмущений, таких как изменение числа включенных горелок.

С учетом этого проведена автоматическая сегментация технологических данных за семь месяцев работы АНГЦ № 1 ПАО «ММК». Новый сегмент данных начинался при изменении скорости линии (более чем на 30 м/мин за период, превышающий 5 мин), толщины или ширины полосы.

Для каждого сегмента индивидуально подбирали параметр  $x_5$  путем минимизации отклонения оценки температуры полосы (2) в секции от ее прогноза согласно модели (3). В результате выявлены сегменты (периоды времени), когда точность прогноза по модели (3), полученной в работе [28], существенно снижалась. При совершенствовании структуры и настройке модели стремились обеспечить приемлемую точность прогноза для всех сегментов.

Выбор способа настройки обусловлен тем, что при низкой продолжительности сегментов высокую точность иногда можно обеспечить выбором только значений  $x_5$ . Поэтому при настройке нельзя использовать средние по всем сегментам значения ошибки прогноза. Кроме того, большие ошибки для отдельных сегментов могут быть вызваны тем, что модель учитывает не все закономерности.

**Модель для прогноза температуры дымовых газов.** Температура дымовых газов является итоговым параметром взаимосвязанных теплообменных процессов между: газом и трубами; трубами, полосой и стенками печи; газом и системой рекуперации тепловых потерь; системой рекуперации и воздухом на сжигание топлива.

Сложно разработать модель, достоверно описывающую все указанные процессы из-за недостатка контролируемых параметров. В то же время чрезмерное упрощение может привести к наличию сегментов времени с низкой точностью прогноза, что является признаком неадекватности модели. С учетом этого рассмотрены два варианта моделей.

Первый вариант модели, основанный на двух апериодических звеньях первого порядка, имеет вид

$$\Delta Z_1(\tau) = \Delta V_r(\tau)x_6 + \Delta V_b(\tau)x_7; \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta Z_2(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{k_1}[\Delta Z_1(\tau) + x_8 - \Delta Z_2(\tau)]; \quad (5)$$

$$\frac{d\Delta T_{п.г}(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{k_2}[\Delta Z_2(\tau) - \Delta T_{п.г}(\tau)],$$

где  $\Delta Z_1(\tau)$  — изменение равновесной температуры дымовых газов;  $\Delta V_b(\tau)$  и  $\Delta T_{п.г}(\tau)$  — изменение с начала периода расхода воздуха и температуры дымовых газов;  $x_6$ ,  $x_7$ ,  $x_8$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  — параметры настройки;  $\Delta Z_2(\tau)$  — сигнал на выходе первого апериодического звена.

В модели (4), (5) искали общие для всех отобранных периодов времени параметры  $x_6$ ,  $x_7$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ , а параметр  $x_8$  подбирали индивидуально для каждого сегмента. Несмотря на простоту, модель обеспечила высокую точность прогноза более чем для 70 % сегментов при  $x_6 = 0,6$  °С·ч/м<sup>3</sup>,  $x_7 = 0,08$  °С·ч/м<sup>3</sup>,  $k_1 = k_2 = 400$  с (настройки одинаковы для зон). Однако для остальных сегментов ошибки велики. Модель не удалось настроить для приемлемой точности в любой период времени в прошлом, и ее нельзя использовать при оптимизации.

Второй вариант модели основан на упрощенном моделировании теплообмена между газом и трубами. Вместо температуры трубы использована оценка температуры РП  $T_n$  зоны:

$$\frac{dT_r(\tau)}{d\tau} = \alpha_r [T_r(\tau) - T_n], \quad (6)$$

где  $T_r$  — температура газа при движении через трубу;  $\alpha_r$  — параметр настройки.

Принимаем, что время прохождения газа через трубу  $\tau_{тр}$  является постоянной величиной. Тогда решение выражения (6) имеет вид

$$T_r(\tau_{тр}) = \frac{T_{г0} + \alpha_r^* T_n}{\alpha_r^* + 1}; \quad \alpha_r^* = \alpha_r \tau_{тр}, \quad (7)$$

где  $T_{г0}$  — начальная температура дымовых газов;  $\alpha_r^*$  — параметр настройки.

Эффект от сжигания топлива упрощенно представим как

$$T_{r0} = T_{b0} + \frac{Q_r V_r^*}{C_r V_r^*} = T_{b0} + x_9 \frac{V_r^*}{V_r^*}; \quad V_r^* = V_b^* + V_t^*, \quad (8)$$

где  $T_{b0}$  — температура подогретого воздуха для сжигания топлива;  $Q_r$  — удельная теплотворная способность топлива;  $V_r^*$ ,  $V_t^*$  и  $V_b^*$  — расход на одну горелку топлива, продуктов горения и воздуха соответственно;  $C_r$  — удельная теплоемкость продуктов горения;  $x_9$  — параметр настройки.

Учитывая, что для сжигания  $1 \text{ м}^3$  природного газа обычно требуется не менее  $13 \text{ м}^3$  воздуха, допускаем, что начальная температура газа определяется температурой подогретого воздуха, используемого при сжигании топлива.

Для выключенных горелок, через которые проходит воздух, справедливо соотношение

$$T_{r0} = T_{b0}. \quad (9)$$

Равновесную температуру газа на выходе из зоны находим из выражения

$$Z_1 = \frac{T_r^{\text{вкл}} n^{\text{вкл}} + T_r^{\text{выкл}} n^{\text{выкл}}}{N}, \quad (10)$$

где  $T_r^{\text{вкл}}$  и  $T_r^{\text{выкл}}$  — температура газа на выходе включенных и выключенных горелок;  $n^{\text{вкл}}$  и  $n^{\text{выкл}}$  — число включенных и выключенных горелок в зоне;  $N$  — общее число горелок в зоне,  $N = n^{\text{вкл}} + n^{\text{выкл}}$ .

С учетом соотношений (7)–(9) выражение (10) приобретает вид

$$Z_1 = \frac{n^{\text{вкл}} V_r^* x_9}{(\alpha + 1) N V_r^*} + \frac{T_{b0} + \alpha T_{п}}{\alpha + 1}, \quad (11)$$

где  $\alpha$  — параметр настройки.

Допускаем, что температура подогретого воздуха для сжигания топлива  $T_{b0}$  остается постоянной в течение сегмента времени, а  $V_r^* = V_b^*$ . Учитывая, что  $V_b = N V_b^*$  и  $V_t = n^{\text{вкл}} V_t^*$ , запишем выражение (11) с использованием приращений сигналов по отношению к начальному моменту времени:

$$\Delta Z_1(\tau) = \frac{x_9}{\alpha + 1} \Delta D(\tau) + \frac{\alpha}{\alpha + 1} \Delta T_{п}(\tau), \quad (12)$$

где

$$\Delta D(\tau) = \frac{V_t(\tau)}{V_b(\tau)} - \frac{V_t(0)}{V_b(0)}.$$

Модель (12) не учитывает снижение эффективности рекуперации тепловых потерь с ро-

стом расхода продуктов горения. Поэтому дополнительно учтем изменение расхода воздуха на зону:

$$\Delta Z_1(\tau) = \frac{x_9}{\alpha + 1} \Delta D(\tau) + \frac{\alpha}{\alpha + 1} \Delta T_{п}(\tau) + x_{10} \Delta V_b(\tau). \quad (13)$$

Для модели (13), (5) найдены параметры настройки ( $\alpha = 0,4$ ;  $x_9 = 1200$ ;  $x_{10} = 0,08$ ;  $k_1 = k_2 = 400$ ), при которых отсутствуют сегменты с низкой точностью прогноза. Пример прогноза температуры дымовых газов (дыма) для трех сегментов времени при изменении скорости линии, числа включенных горелок, расходов топлива и воздуха приведен на рис. 1.

Рациональные значения параметров настройки  $k_1$ ,  $k_2$  варьировали для разных сегментов времени в диапазоне  $300 \dots 500 \text{ с}$ , но при принятом среднем уровне отклонения оказались относительно небольшими. Модель (13), (5) можно использовать при оптимизации управления с целью экономии энергии путем снижения тепловых потерь с отходящими продуктами горения.

**Модель для прогноза оценок температуры РП.** Полученную модель прогноза температуры дымовых газов можно применять при прогнозе оценок  $T_{п}$ , для чего в модели (3) при расчете  $\Delta E$  следует учесть результаты этого прогноза. Также прогноз по моделям (13), (5) учитывает динамику рекуператора. Поэтому при прогнозе оценок  $T_{п}$  целесообразно использовать изменение равновесной температуры дыма  $\Delta Z_1(\tau)$ :

$$\begin{aligned} \frac{dT_{п}(\tau)}{d\tau} = & \frac{1}{x_3} \{ \Delta Z_3(\tau) - \Delta T_{п}(\tau) x_2 - C [\Delta T_{п}(\tau) - \Delta T_{m0}(\tau)] \} + x_5; \\ \frac{d\Delta Z_3(\tau)}{d\tau} = & \frac{1}{k_3} [ \Delta V_t(\tau) x_1 - \Delta Z_4(\tau) x_9 - \Delta Z_3(\tau) ]; \\ \Delta Z_4(\tau) = & V_{п,r}(\tau) (Z_1(0) + \Delta Z_1(\tau) + x_8) - \\ & - V_{п,r}(0) Z_1(0), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\Delta Z_3(\tau)$  — параметр, характеризующий тепловой поток от труб;  $k_3$  — параметр настройки;  $\Delta Z_4(\tau)$  — параметр, характеризующий изменение уровня тепловых потерь с дымом.

Анализ ошибок прогноза оценок  $T_{п}$  зон секции выдержки за продолжительный период времени с помощью модели (14) показал возможность существенных отклонений для от-

дельных сегментов. Отличительной особенностью сегментов являлось продолжительное уменьшение числа включенных горелок. При одном и том же повышении расхода топлива параметр  $\Delta T_n$  больше увеличивается при большем числе включенных горелок.

Причиной этого является отсутствие в модели (1) учета времени пребывания полосы рядом с включенными и выключенными горелками, что приводит к варьированию температур РП в первой и второй зонах, определяемых по выражениям (2), при изменении числа работающих горелок. Другой причиной снижения точности прогноза служит отсутствие учета инерции при изменении температуры труб.

С учетом указанных особенностей модель (14) приобретает вид

$$\frac{d\Delta Z_3(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{k_3} \{ f_r(n^{вкл}(\tau)) [\Delta V_r(\tau)x_1 - \Delta Z_4(\tau)x_9] - \Delta Z_3(\tau) \};$$

$$f_r(n^{вкл}(\tau)) = \frac{n^{вкл}(\tau)}{N}. \quad (15)$$

Отсутствие сегментов с низкой точностью прогноза было обеспечено при использовании в функции  $f_r$  прямо пропорциональной зави-

симости от числа включенных горелок. Причем для второй зоны такая тенденция сохранялась только при числе горелок менее восьми. Возможной причиной этого является то, что увеличение числа включенных горелок второй зоны более шести обычно происходит при полном включении всех горелок в первой зоне.

Для зон секции выдержки определен параметр  $x_9 = 0,001$ . Рациональное значение параметра  $k_3$  находится в диапазоне 200...500 с для разных сегментов, но на среднем уровне может быть принято равным 350 с. Пример прогноза оценок температуры РП приведен на рис. 2.

Видно, что точный прогноз изменения температуры полосы (рис. 2, з, и) обеспечен точным прогнозом оценок температуры РП в первой и второй зонах (рис. 2, е, ж), определяемых по выражениям (2). При этом имеется значительное отклонение между изменениями оценок  $T_n$  и локально измеренной температурой РП в зонах (показано среднее по двум датчикам значение температуры в каждой из зон).

Изучение точности прогноза по модели (15) для множества сегментов, полученных при обработке данных, показало возможность значимого отклонения в периоды существенного изменения температуры РП. Возможной причиной

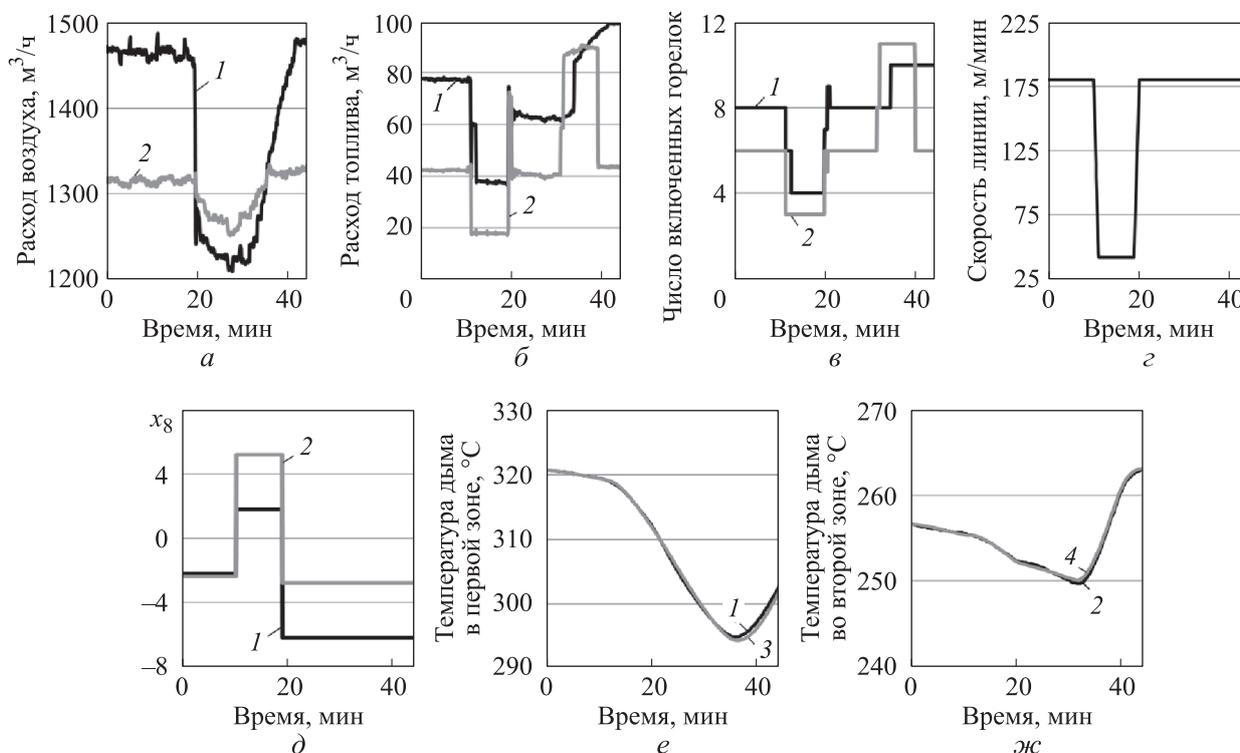


Рис. 1. Пример прогноза температуры дыма при изменении скорости линии, числа включенных горелок, расходов топлива и воздуха:  
1 и 2 — данные для первой и второй зоны; 3 и 4 — прогноз для первой и второй зоны

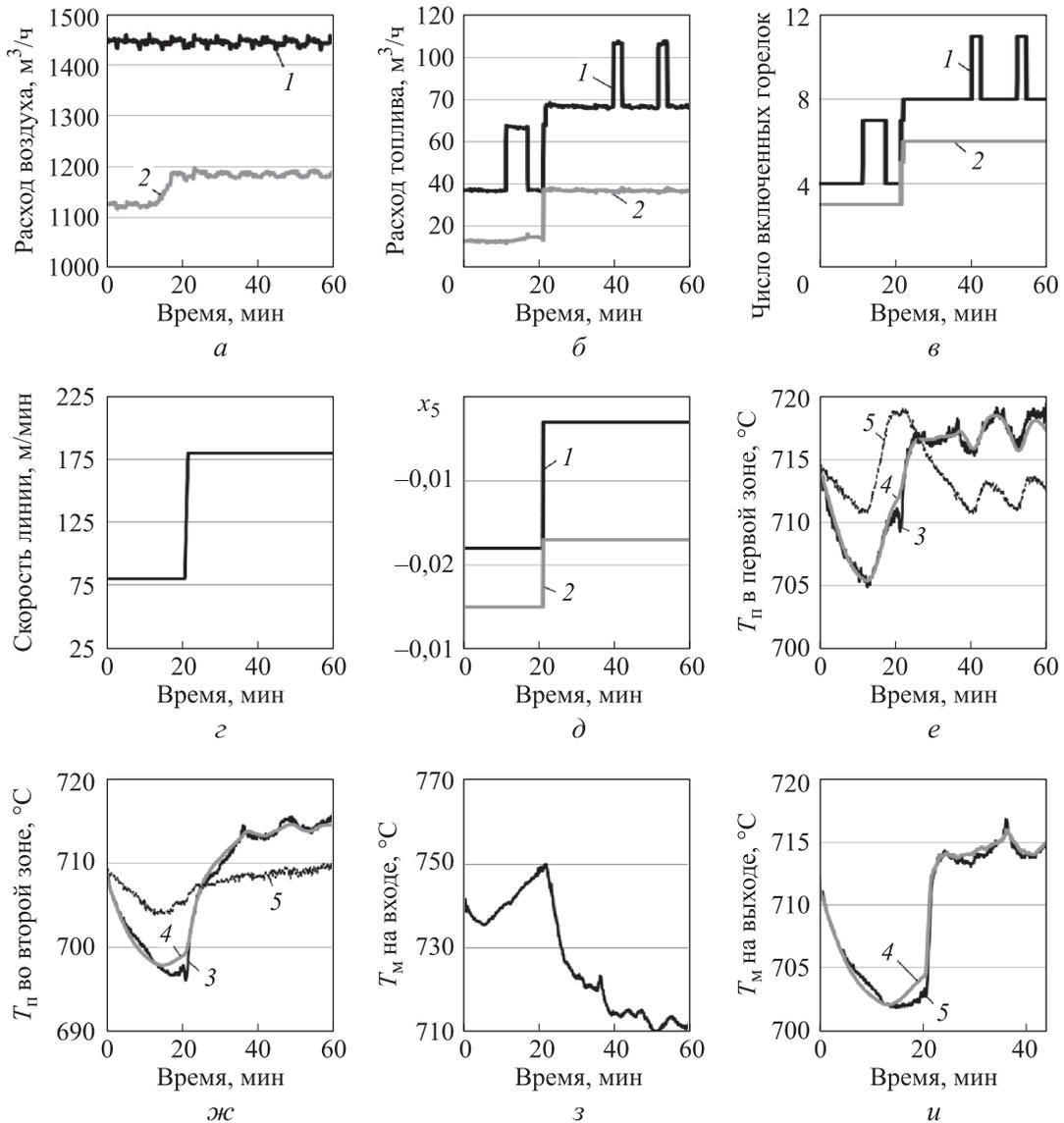


Рис. 2. Пример прогноза оценок температуры РП:  
 1 и 2 — данные для первой и второй зоны; 3 — оценки по выражениям (2);  
 4 и 5 — результаты прогноза и измерения

этого являются неучтенные тепловые процессы в стенках печи. Несмотря на малые изменения, температура РП может продолжительное время оставаться в окрестностях одного и того же среднего уровня. При этом распределение температур меняется только в относительно небольшой части по толщине стенки, оставаясь постоянным в ее стальной части. Поэтому параметры  $x_2$  и  $x_3$  в модели (14) не определяют тепловые процессы по всей толщине стенок печи.

Чтобы учесть изменение распределения температур в стенках печи при существенном изменении температуры РП, стенку печи условно разделяли на две части (рис. 3). Внутреннюю часть ограничивали значениями  $T_{\Pi}$

и  $T_c$ , а внешнюю —  $T_c$  и  $T_n$ . Приняли, что наружная температура  $T_n$  в течение отдельного сегмента времени остается неизменной.

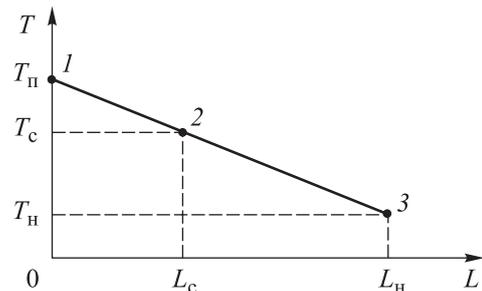


Рис. 3. Упрощенная декомпозиция стенки печи

Отклонения в динамике изменения оценки температуры РП  $T_n$  при значительном изменении температуры РП объясним изменением температуры  $T_c$ . При этом допускаем стационарный характер распределения температуры между точками 1 и 2, а также между точками 2 и 3. Тогда для температуры  $T_c$  запишем

$$\frac{dT_c(\tau)}{d\tau} = \frac{a_c}{L_c L_6} [T_n(\tau) - T_c(\tau)] - \frac{a_c}{L_6(L_n - L_c)} [T_c(\tau) - T_n(\tau)], \quad (16)$$

где  $a_c$  — температуропроводность;  $L_6$  — длина блока конечно-объемной модели.

Рассмотрим выражение (16) для произвольного и начального моментов времени в сегменте. Кроме постоянства  $T_n$  допускаем равенство нулю скорости изменения  $T_c$  в начальный момент времени. С учетом этого получаем

$$\frac{dT_c(\tau)}{d\tau} = x_{11} \{[\Delta T_n(\tau) - \Delta T_c(\tau)] - x_{12} \Delta T_c(\tau)\}; \quad (17)$$

$$\frac{dT_n(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{x_3} \{ \Delta Z_3(\tau) - \Delta T_n(\tau) x_2 - C[\Delta T_n(\tau) - \Delta T_{m0}(\tau)] \} - x_{11} [\Delta T_n(\tau) - \Delta T_c(\tau)] + x_5, \quad (18)$$

где  $x_{11}$ ,  $x_{12}$  — дополнительные параметры настройки.

В ходе настройки найдены значения параметров  $x_{11} = 0,0004$  и  $x_{12} = 0,2$ , при которых ошибка снижается вследствие значительного изменения  $T_n$ . На точность модели в прочих ситуациях модификация (17) не оказывает значимого влияния. Пример прогноза для одного

из сегментов времени показан на рис. 4. Для сравнения вариантов модели для всего периода (включает девять сегментов) подбирали только одно общее значение  $x_5$ . Видно, что модификация (18) позволяет повысить точность в периоды значительного и быстрого изменения температуры РП.

**Нелинейная модель для прогноза.** Эффективное применение разработанных моделей на практике требует определения возмущений  $x_5$  при прогнозе  $T_n$  и определения  $x_8$  при прогнозе  $T_{пг}$ . Значения параметров  $x_5$ ,  $x_8$  обусловлены влиянием предыдущих сегментов времени, упрощением модели и действием неизвестных возмущений. Под упрощением модели понимаем как упрощение используемых зависимостей, так и учет не всех доступных сигналов технологического процесса.

Устранить недостаток, обусловленный упрощением используемых зависимостей, можно путем прогноза параметров  $x_5$ ,  $x_8$  с помощью эмпирической модели. Отметим, что с учетом прочих причин вариации  $x_5$ ,  $x_8$  целесообразен прогноз их изменения при смене сегмента времени.

Для настройки эмпирической модели по результатам проведенной сегментации данных сформированы две выборки. Выборка для настройки создана по данным за первую половину рассматриваемого при сегментации периода времени (4000 наборов), выборка для теста — по данным второй половины периода времени (3977 наборов). Каждый набор данных характеризует отдельный малый период времени при их сегментации между возмущениями по сортменту и существенными изменениями скорости

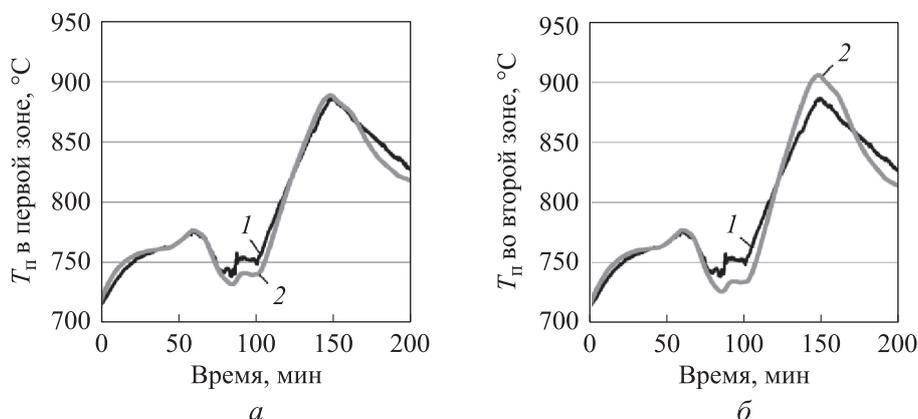


Рис. 4. Пример прогноза оценок температуры РП с использованием (а) и без использования (б) модифицированной модели (18): 1 — оценка; 2 — прогноз

линии. Набор содержит рассчитанные для периода средние по времени значения сигналов.

В качестве эмпирической модели использовали ИНС — типовой многослойный перцептрон. ИНС настраивали для прогноза  $\Delta x_5$  и  $\Delta x_8$  моделей (5), (13)–(15), а также для прогноза схожего возмущения  $\Delta x_4^*$  в модели прогноза оценки  $T_n$  в секции закрытого охлаждения, предложенной в работе [27]. На входы ИНС подавали средние значения сигналов для текущего и предыдущего сегментов. В моделях прогноза  $\Delta x_5$  и  $\Delta x_8$  на входы ИНС поступали средние значения параметров  $\nu$ ,  $n^{\text{вкл}}$ ,  $V_T$ ,  $V_B$ ,  $T_{m0}$ ,  $h$  и  $b$ , а в модели прогноза  $\Delta x_4^*$  — средние значения параметров  $\nu$ ,  $T_{m0}$ ,  $h$ ,  $b$  и мощности вентиляторов  $P$ .

При прогнозе  $\Delta x_5$ ,  $\Delta x_8$  и  $\Delta x_4^*$  по тестовой выборке коэффициенты корреляции составили соответственно 0,65, 0,69 и 0,78. Вероятной причиной более низкой точности прогноза  $\Delta x_5$  по сравнению с  $\Delta x_4^*$  является дополнительная инерция, обусловленная теплообменом с участием труб. Значения параметров  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  могут варьироваться, что также влияет на величины  $x_5$  и  $x_8$ .

Дальнейшим направлением работ по усовершенствованию нелинейной модели является модернизация системы прогноза  $\Delta x_5$ ,  $\Delta x_8$  и  $\Delta x_4^*$ , для чего можно использовать систему прогноза неизвестных скачкообразных возмущений [29].

**Влияние неопределенности на энергосбережение.** Разработанная модель обеспечивает точный прогноз изменения температуры дыма для всех сегментов времени в прошлом. Это является свидетельством того, что модель учитывает все основные закономерности. Так как снижение температуры дыма напрямую связано с экономией энергии, модель можно использовать для энергосберегающего управления, чтобы уменьшить тепловые потери с отходящими дымовыми газами.

Для оценки возможности оптимизации управления путем перераспределения тепловых нагрузок между зонами печи определяли уровень неопределенности значений параметров  $x_2$  зон. Для этого использовали результаты полного перебора значений настроек  $\{x_1, x_2, x_3, x_5\}$  зон. Для каждого варианта настроек оценивали ошибку прогноза оценок  $T_n$  для пяти различных периодов времени. Отбирали варианты настроек, при которых для каждого периода ошибка не превышала более чем на 50 % значение, обеспе-

чивающее наилучший для отдельного периода вариант.

Анализ полученных результатов выявил незначительное варьирование параметров  $x_1$  и  $x_3$ . При этом в первой зоне параметр  $x_2$  изменяется в диапазоне  $-5,0 \dots -1,5$ , а во второй — в интервале  $-9,4 \dots -2,6$ , что затрудняет использование значений  $x_2$  при оптимизации управления с целью уменьшения тепловых потерь от стен. Наиболее вероятной причиной этого является использование в модели сигналов, представленных в виде приращений. Это позволило настроить модель по данным, полученным в условиях неизвестных возмущений, но также затрудняет мониторинг тепловых потерь от стен.

Можно указать два направления дальнейших работ для оперативной диагностики тепловых потерь от стен. Первое связано с применением средств контроля распределения температур в стенках печи с использованием многозонных термопар [32]. Их установка в окрестностях наружной поверхности стенок менее затратная, чем увеличение точек контроля температуры РП. Это может обеспечить мониторинг тепловых потерь и более точный контроль распределения температуры в РП на основе решения обратной задачи теплопроводности.

Второе направление связано с отбором и агрегированием данных. В качестве примера рассмотрим простую модель, предложенную в работе [27] для моделирования охлаждения полосы:

$$P(\tau)x_1^* + T_n(\tau)x_2^* = C[T_n(\tau) - T_{m0}(\tau)] + x_3^* \frac{dT_n(\tau)}{d\tau}, \quad (19)$$

где  $x_1^*$ ,  $x_2^*$  — параметры настройки.

Отберем из базы данных сегменты времени для типового сортамента и типовой скорости линии ( $C = \text{const}$ ), в течение которых оценку температуры РП  $T_n$  можно считать установившейся. Запишем выражение (19), используя средние по времени значения сигналов:

$$\bar{P}x_1^* + \bar{T}_n x_2^* + Q_n = C(\bar{T}_n - \bar{T}_{m0}), \quad (20)$$

где  $Q_n$  — возмущение, связанное с непостоянством тепловых потерь через стены.

Рассматривая модель (20) для двух разных отобранных сегментов времени, перейдем к приращением средних по времени значениям сигналов

$$\Delta \bar{P}x_1^* + \Delta \bar{T}_n x_2^* + \Delta Q_n = C(\Delta \bar{T}_n - \Delta \bar{T}_{m0})$$

или

$$\Delta \bar{P}x_1^* + \Delta \bar{T}_n (x_2^* + \Delta Q_n^*) = C(\Delta \bar{T}_n - \Delta \bar{T}_{m0}).$$

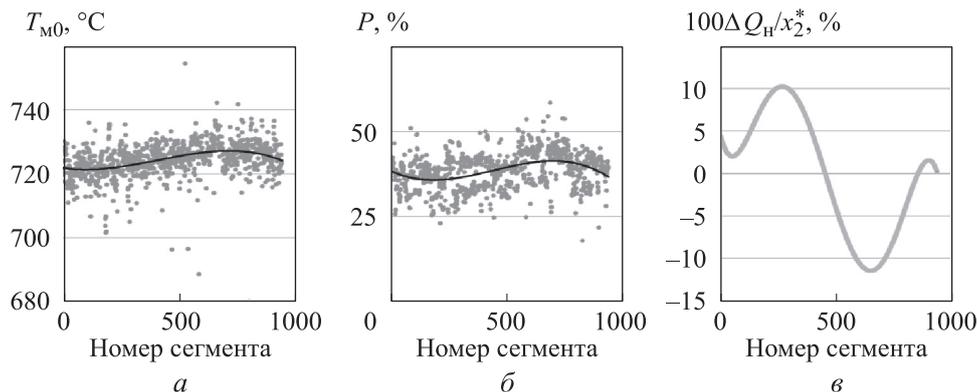


Рис. 5. Пример определения изменения тепловых потерь от стен по агрегированным данным

Отсюда получаем

$$x_2^* + \Delta Q_H^* = \frac{C(\Delta \bar{T}_n - \Delta \bar{T}_{M0}) - \Delta \bar{P}x_1^*}{\Delta \bar{T}_n}. \quad (21)$$

Пример изменения средних для сегментов значений мощности вентиляторов и начальной температуры полосы перед охлаждением приведен на рис. 5. Отобраны сегменты при  $v = 180$  м/мин,  $h = 0,00048$  м и  $b = 1$ . Величина  $Q_H$  рассчитана путем аппроксимации средних для сегментов значений сигналов.

Как видно из рис. 5, тепловые потери являются непостоянными. Сегменты времени с наибольшим уровнем тепловых потерь соответствуют зимним месяцам. Относительно низкий уровень варьирования тепловых потерь может быть обусловлен относительно невысокой температурой РП в секции закрытого охлаждения.

**Возможность применения модели при оптимальном управлении.** Использование оценок температуры РП зон  $T_n$ , определяемых по температуре полосы, может привести к неустойчивости системы управления из-за значительной инерции объекта. В то же время от системы управления требуется высокое быстродействие. Возмущения вследствие неточного определения величин  $\Delta x_5$ ,  $\Delta x_8$  и  $\Delta x_4^*$  должны оперативно компенсироваться, как и возмущение, связанное с неточным прогнозом изменения температуры полосы при прохождении сварного шва.

Дать гарантии устойчивости системы управления достаточно просто при выполнении следующих условий: выделение уровней планирования и обеспечения температуры РП; решение задачи обеспечения температуры РП индивидуально для каждой отдельной зоны.

В этом случае систему управления температурой РП  $T_n$  разрабатывают исходя из воз-

можных ошибок прогноза  $\Delta x_5$ ,  $\Delta x_8$ ,  $\Delta x_4^*$  и требований к обработке скачкообразного возмущения по заданному значению  $T_n$  при прохождении сварного шва через печь. Для системы управления температурой РП с двумя степенями свободы ошибки моделирования [28] можно компенсировать типовым контуром управления с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором и обратной связью. Одновременно с этим при упреждающей компенсации известных возмущений в контуре прямого разомкнутого управления (feed forward control) можно проводить оптимизацию управления. Под известными возмущениями понимают возмущения по заданию, скорости линии и сортаменту.

При таком раздельном управлении зонами непонятно как выбрать соотношение между заданными оценками  $T_n$  отдельных зон и определить связь между изменением расхода топлива и переключением горелок в зоне с учетом управляющего воздействия от ПИД-регулятора.

Выбор соотношения между заданными значениями оценок  $T_n$  зон можно направить на снижение тепловых потерь от стен. Допускаем, что соотношение задано путем выбора перепада оценок  $\Delta T_{п.м}$ , определяемого по выражению (2), поддерживаемого постоянным в течение сегмента времени. Определение величины  $\Delta T_{п.м}$  относится к задаче статической оптимизации, решаемой однократно перед началом каждого нового сегмента, причем без учета динамических свойств объекта.

Выбор перепада  $\Delta T_{п.м}$  основан на минимизации общего изменения расхода топлива на печь после перехода процесса в новое установившееся состояние по отношению к оценке установившегося расхода топлива для предыдущего сегмента времени. Оценка расхода топлива

необходима, так как на практике установившийся режим может не возникнуть. При выборе величины  $\Delta T_{п.м}$  следует учитывать сопутствующее изменение тепловых потерь с отходящим дымом. Для значительного перепада оценок температур РП зон может потребоваться уменьшение числа работающих горелок в отдельных зонах в долгосрочной перспективе. Это может привести к тому, что несмотря на снижение тепловых потерь от стен, в целом затраты энергии увеличатся из-за роста тепловых потерь с дымом.

Таким образом, в ходе статической оптимизации определяются целевые значения  $T_{п}$  зон для следующего сегмента времени исходя из критерия

$$\Delta V_{т.у}^{\Sigma} \rightarrow \min; \Delta V_{т.у}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_3} \Delta V_{т.у}^i; \quad (22)$$

$$V_{т.у}^i(k) = V_{т.у}^i(T_{п.з}^i(k-1), Y(k-1), n_p^i(k-1)) + \Delta V_{т.у}^i(\Delta T_{п.у}^i(k), Y(k), n_p^i(k));$$

$$T_{п.з}^{i \neq 1}(k) = T_{п.з}^1(k) + \Delta T_{п.м}^{i \neq 1}(k);$$

$$Y = \{v, h, b, T_{м.0}, T_{м.3}\};$$

$$\Delta T_{п.у}^i(k) = T_{п.з}^i(k) - T_{п.з}^i(k-1),$$

где  $\Delta V_{т.у}^{\Sigma}$  и  $\Delta V_{т.у}^i$  — изменение установившегося расхода топлива  $V_{т.у}^i$  на всю печь и  $i$ -ю зону;  $N_3$  — число зон;  $V_{т.у}^i$  — установившийся расход топлива в  $i$ -й зоне;  $k$  — номер сегмента времени;  $T_{п.з}^i$  — заданное значение оценки температуры РП в  $i$ -й зоне;  $n_p^i$  — текущее число работающих горелок в  $i$ -й зоне;  $T_{м.3}$  — заданная температура полосы на выходе из печи.

Целью оптимизации по модели (22) является поиск величин  $T_{п.м}^{i \neq 1}$  и  $n_p^i$ , при которых изменение установившегося расхода на печь будет минимальным (это также означает минимизацию расхода топлива на печь при известной оценке установившегося расхода для предыдущего сегмента времени). Процедура оптимизации включает в себя два этапа.

Первый этап — определение по модели оценок установившихся расходов топлива на зоны для обеспечения заданных значений  $T_{п}$  для текущего сегмента времени. Необходимость этого этапа обусловлена использованием в модели сигналов в виде приращений. Второй этап — оптимизация путем выбора варианта включения горелок в зонах и изменения заданных значений  $T_{п}$ , при которых минимизируется изменение расхода топлива.

Для оперативной компенсации ошибок моделирования, приводящих к отклонению факти-

ческой оценки  $T_{п}$  от заданной, может потребоваться изменение числа включенных горелок. Чтобы минимизировать вмешательство в найденную при оптимизации схему включения горелок, необходимо дальнейшее совершенствование контура управления с ПИД-регулятором. Его основой может стать подсистема слежения за отклонением фактических значений возмущений  $x_5, x_8, x_4^*$  для текущего сегмента времени от их ранее спрогнозированных уровней.

Модель можно использовать для подготовки правил коррекции числа включенных горелок с учетом уровня  $x_5, x_8, x_4^*$  на основе вычислительных экспериментов, например, на базе нечеткой логики по аналогии со способом, описанным в работе [33].

Оптимизацию при выборе упреждающего воздействия для компенсации возмущений выполняют индивидуально для каждой зоны перед началом очередного сегмента времени. При этом решают две задачи. Первой из них является выбор динамики изменения  $T_{п}$  зоны для перехода к новому заданному значению  $T_{п}$ , выбранному по результатам статической оптимизации. Вторая задача заключается в определении упреждающего воздействия по расходу топлива и числу включенных горелок для обеспечения следования оценки  $T_{п}$  выбранной динамике. Если с началом нового сегмента заданное значение  $T_{п}$  не меняется, то решают только вторую задачу. Отклонения полученных значений  $T_{п}$  от заданных [28] компенсирует ПИД-регулятор.

В условиях частого изменения сортамента печь может значительно долго работать при переходных процессах  $T_{п}$ . В переходном режиме процесс неоптимален по затратам энергии. При выходе сварного шва из печи температура полосы меняется скачкообразно. Чтобы не допустить брак, значение  $T_{п}$  в период прохождения сварного шва должно удовлетворять требованиям как для предыдущего сегмента времени, так и для нового. Как следствие, возможен избыточный нагрев полосы в течение некоторого интервала предыдущего или нового сегментов времени.

С учетом этого целесообразно минимизировать продолжительность переходного процесса, принимая во внимание, что изменение числа работающих горелок для ускорения переходного процесса может увеличить тепловые потери с дымом. Исходя из этого, оптимизация с целью экономии топлива при изменении заданного

значения  $T_n$  требует совместного решения первой и второй задач.

Для получения решения можно использовать алгоритм оптимального управления с прогнозирующей моделью А.А. Красовского [34]. Целью является оптимизация траектории изменения  $X_T = \{\Delta V_T, \Delta T_n\} = \{x_{T1}, x_{T2}\}$  по критерию обобщенной работы путем минимизации функционала

$$I = R_3(X_T(\tau_2), U(\tau_2)) + \int_{\tau}^{\tau_2} G(X_T, U) d\tau + \frac{1}{2} \int_{\tau}^{\tau_2} (\dot{U}^T K^{-2} \dot{U} + \dot{U}_{\text{опт}}^T K^{-2} \dot{U}_{\text{опт}}) d\tau, \quad (23)$$

где  $R_3$  — оценка степени выполнения требований к состоянию процесса в момент  $\tau_2$ ;  $\tau_2$  и  $\tau_1$  — время завершения и начала сегмента;  $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$ ;  $G(X_T)$  — оценка эффективности процесса в момент времени  $\tau$ ;  $U$  — матрица воздействий,  $U = \{u_1 = \Delta V_T, u_2 = \Delta V_n, u_3 = n^{\text{вкл}}\}$ ;  $U_{\text{опт}}$  — оптимальная матрица воздействий,  $U_{\text{опт}} = U$  при использовании функционала обобщенной работы, квадратичного относительно управлений;  $K$  — матрица, состоящая из коэффициентов для настройки, поиска и определения приоритетов при выборе воздействий  $U$ ,  $K = \{k_{u1}, k_{u2}, k_{u3}\}$ .

Известно, что для процесса, который может быть представлен уравнениями

$$\dot{x}_{Ti} + f_i(X_T, U, \tau) = 0, \quad (24)$$

оптимальные по критерию (23) управления можно определить как

$$\dot{u}_j = -k_{uj}^2 \frac{\partial R}{\partial u_j}, \quad (25)$$

где  $R$  — решение уравнения

$$\frac{\partial R}{\partial \tau} - \sum_{i=1}^{n_x} \left( f_i \frac{\partial R}{\partial x_{Ti}} \right) = -G \quad (26)$$

при граничном условии  $R(\tau = \tau_2) = R_3$ .

Предложенные модели для прогноза температуры дымовых газов и оценок температуры РП соответствуют структуре (24), что позволяет использовать алгоритм, предложенный в работе [34].

Для определения  $\partial R / \partial u_i$  используют модель свободного движения объекта. Сегмент времени разделяют на множество малых периодов, для которых значения  $U$  рассчитывают последовательно. Для каждого из периодов определяют последующую динамику изменения  $X_T$

при постоянстве  $U$  для будущих периодов. Тогда уравнение свободного движения объекта (26) принимает вид

$$\dot{R} = -G.$$

Отсюда

$$R = R_3(X_T(\tau_2), U(\tau_2)) + \int_{\tau}^{\tau_2} G(X_T, U) d\tau. \quad (27)$$

По выражению (27) определяют текущее значение  $R$  и, соответственно, его изменение за малый период времени, что позволяет получить значения  $\partial R / \partial u_i$ . Далее по уравнению (25) находят производные  $u$  по времени и новые значения  $u$  через малый интервал времени.

Задача оптимизации процесса в рамках сегмента времени является терминальной, поэтому сигналы множества  $X_T$  выбирают исходя из возможности определения на их основе функций  $R_3$  и  $G$ . Для решения терминальной задачи достаточно, чтобы  $R_3$  и  $G$  были непрерывными и неотрицательными. Степень достижения заданного состояния процесса  $R_3$  оценивают через отклонение от заданного значения  $T_n$  при  $\tau_2$ :

$$R_3(X_T(\tau_2), U(\tau_2)) = \begin{cases} w_1 [T_{n.3}(k+1) - \Delta T_n(\tau_2) - T_n(\tau_1)] \\ \text{при } \Delta T_n(\tau_2) + T_n(\tau_1) \leq T_{n.3}(k+1); \\ 0 \text{ при } \Delta T_n(\tau_2) + T_n(\tau_1) > T_{n.3}(k+1), \end{cases}$$

где  $w_1$  — параметр, определяющий компромисс между достижением величины  $T_{n.3}(k+1)$ , необходимой к моменту начала следующего сегмента времени  $k+1$ , и достижением целей управления для текущего сегмента.

При определении параметра  $G$  следует учитывать не только текущий расход топлива, но и заданное значение  $T_{n.3}(k)$  для сортамента, который в текущий момент находится в печи ( $T_{n.3}$  меняется скачкообразно при прохождении сварного шва):

$$G(X_T, U) = \begin{cases} \frac{w_2}{\tau_2 - \tau_1} [T_{n.3}(k) - \Delta T_n(\tau) - T_n(\tau_1)] + \\ + \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} [V_T(\tau_1) + \Delta V_T(\tau)] \\ \text{при } \Delta T_n(\tau) + T_n(\tau_1) \leq T_{n.3}(k); \\ \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} [V_T(\tau_1) + \Delta V_T(\tau)] \\ \text{при } \Delta T_n(\tau) + T_n(\tau_1) > T_{n.3}(k), \end{cases}$$

где  $w_2$  — параметр, определяющий компромисс между снижением оценки температуры

РП  $T_n$  менее заданного значения и общих за сегмент времени затрат топлива.

Полученную в ходе поиска динамику изменения  $\Delta T_n$  используют в качестве эталонной модели в системе управления с двумя степенями свободы [28]. Найденную динамику изменения  $U$  применяют при формировании упреждающего воздействия для компенсации возмущений.

При управлении в периоды смены сортамента полагают порядок коррекции скорости линии  $v$  и  $T_n$  заданным и последовательным. Вариант алгоритма определения порядка коррекции  $v$  и  $T_n$  предложен в работе [35]. Период времени между коррекцией  $v$  и  $T_n$  рассматривают как отдельный сегмент времени, для которого решают задачу статической и динамической оптимизации.

Предложенные модели оперируют изменением значений сигналов относительно начальных для сегмента времени значений. Это предполагает оптимизацию непосредственно при управлении, что накладывает ограничение на вычислительные затраты. Предложенный способ оптимизации не требует существенных вычислительных затрат и может быть реализован на основе программируемых технологических контроллеров.

## Выводы

1. Представление сигналов в виде приращений относительно начального для сегмента времени момента позволило создать простые модели, которые потенциально обеспечивают высокую точность прогноза температуры полосы на выходе из печи. Стабильно высокая точность прогноза можно быть обеспечена при точном прогнозе скачкообразных возмущений по скорости изменения сигналов процесса при изменении сортамента или значительном изменении скорости линии. Полученные результаты показывают перспективность использования

эмпирических моделей. Поэтому одним из основных направлений дальнейшей работы является совершенствование способа сегментации данных во времени и совершенствование системы прогноза скачкообразных возмущений  $x_5, x_8, x_4^*$ .

2. Применение метода [31] для настройки модели позволило выявить влияние управляющих воздействий — числа включенных горелок, расходов топлива и воздуха — на тепловые потери с отходящими дымовыми газами. Это дает возможность оптимизировать управление для экономии топлива.

3. Установлено, что оперативное определение и учет при оптимизации тепловых потерь через стенки печи требует контроля распределения температур в стенках печи. По-видимому, можно использовать упрощенные модели теплообмена в стенке, допускающие стационарность распределения температуры в ее частях. Проверка этого требует проведения экспериментов.

4. Предложенная модель не требует значительных вычислительных ресурсов и допускает использование при оптимизации управления простого метода [34], предложенного Красовским А.А. Статическая оптимизация по модели (22) также нетребовательна к вычислительным затратам даже при использовании полного перебора при поиске. Это дает возможность реализовать оптимизацию управления перед началом каждого сегмента времени непосредственно на технологических контроллерах.

5. Проведение оптимизации целесообразно при планировании динамики изменения оценок температуры РП и при упреждающей компенсации действия на них возмущений по скорости линии и сортаменту. Это позволяет оптимизировать настройки регулятора, обеспечивающего выход параметра  $T_n$  на заданный уровень и эффективную отработку возмущений  $x_5, x_8, x_4^*$ , обусловленных ошибками моделирования.

## Литература

- [1] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. и др. Изучение ограничений производительности агрегатов непрерывного горячего оцинкования, связанных с дефектами продукции. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2024, т. 67, № 1, с. 89–105, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-89-105>
- [2] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С. и др. Влияние скорости движения и натяжения стальной полосы на дефекты продукции агрегатов непрерывного горячего оцинкования. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2023, т. 21, № 4, с. 93–104.

- [3] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Чута А.С. Управление гибким производством оцинкованного листового проката с учетом качества продукции и человеческого фактора. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2023, № 4, с. 122–135.
- [4] Chavan R.R. *Analysis of energy consumption in continuous galvanizing lines*. MS Thesis. Statler College of Engineering and Mineral Resources, 2006, doi: <https://doi.org/10.33915/etd.1749>
- [5] Sundaramoorthy S., Phuong Q., Gopalakrishnan B. et al. Heat balance analysis of annealing furnaces and zinc pot in continuous hot dip galvanizing lines. *Energy Eng.*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 12–47, doi: <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11668651>
- [6] Strommer S., Niederer M., Steinboeck A. et al. Hierarchical nonlinear optimization-based controller of a continuous strip annealing furnace. *Control Eng. Pract.*, 2018, vol. 73, pp. 40–55, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.12.005>
- [7] Yahiro K., Shigemori H., Hirohata K. et al. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proc. IECON '93*, 2002, pp. 481–486, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339029>
- [8] Seo M., Ban J., Cho M. et al. Low-order model identification and adaptive observer-based predictive control for strip temperature of heating section in annealing furnace. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 53720–53734, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071124>
- [9] Fein M., Böck-Schnepps M., Strommer S. et al. Model-based control and optimization of continuous strip annealing furnaces. *Measuring & Process Control*, 2016, no. 1, pp. 57–63.
- [10] Yoshitani N. Optimal control of steel strip temperature in continuous annealing processes. In: *Materials science and engineering serving society*. Elsevier, 1998, pp. 303–308, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044482793-7/50069-2>
- [11] Bitschnau L., Jakubek S., Kozek M. Constrained model predictive control of a continuous annealing furnace. *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Conf.*, 2010, pp. 285–292, doi: <https://doi.org/10.1115/DSCC2010-4129>
- [12] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [13] Zhou M., Yu D., Zhou J. A new strip temperature control method for the heating section of continuous annealing line. *IEEE Conf. on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008, pp. 861–864, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2008.4670926>
- [14] Peng L., Li F. The optimal design of hot steel strip temperature control algorithm. *IFAC Proc. Volumes*, 2003, vol. 36, no. 24, pp. 129–132, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37615-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37615-2)
- [15] Strommer S., Niederer M., Steinboeck A. et al. Nonlinear observer for temperatures and emissivities in a strip annealing furnace. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731914>
- [16] Niederer M., Strommer S., Steinboeck A. et al. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace. *J. Process Control*, 2016, vol. 48, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.012>
- [17] Imose M. Heating and cooling technology in the continuous annealing. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 1985, vol. 25, no. 9, pp. 911–932, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.25.911>
- [18] Martínez-de-Pisón F.J., Alba-Elías F., Castejón-Limas M. et al. Improvement and optimisation of hot dip galvanising line using neural networks and genetic algorithms. *Ironmak. Steelmak.*, 2006, vol. 33, no. 4, pp. 344–352, doi: <https://doi.org/10.1179/174328106X101565>
- [19] Martínez-de-Pisón F.J., Pernía A.V., González A. et al. Optimum model for predicting temperature settings on hot dip galvanising line. *Ironmak. Steelmak.*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 187–194, doi: <https://doi.org/10.1179/030192309X12573371383604>
- [20] Martínez-de-Pisón F.J., Celorrio L., Pérez-de-la-Parte M. et al. Optimising annealing process on hot dip galvanising line based on robust predictive models adjusted with genetic algorithms. *Ironmak. Steelmak.*, 2011, vol. 38, no. 3, pp. 218–228, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281210Y.0000000001>
- [21] Sanz-García A., Fernández-Ceniceros F., Fernández-Martínez J. et al. Methodology based on genetic optimisation to develop overall parsimony models for predicting temperature

- settings on annealing furnace. *Ironmak. Steelmak.*, 2014, vol. 41, no. 2, pp. 87–98, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000094>
- [22] Ding H., Shen H., Xie Q. Predictive modeling of strip temperature in continuous annealing furnace: an improved optimization algorithm. *ISIJ Int.*, 2024, vol. 65, no. 4, pp. 808–816, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-379>
- [23] Sanz-Garcia A., Antoñanzas-Torres F., Fernández-Ceniceros J. et al. Overall models based on ensemble methods for predicting continuous annealing furnace temperature settings. *Ironmak. Steelmak.*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 51–60, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000104>
- [24] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [25] Zhang Y., Jin Y., Cao W. et al. A dynamic data-driven model for predicting strip temperature in continuous annealing line heating process. *Proc. 37th CCC*, 2018, pp. 1887–1891, doi: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8484015>
- [26] Kim S.Y., Choi J.D., Yy K.B. et al. A temperature control of steel strip using neural network in continuous annealing process. *Proc. ICNN'95*, 1995, vol. 1, pp. 631–635, doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488253>
- [27] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Шманев Д.Е. и др. Управление охлаждением стальной полосы при гибком производстве оцинкованного листового проката. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2021, т. 64, № 7, с. 519–529, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-519-529>
- [28] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Модели для упреждающего управления тепловыми процессами термической обработки стали на агрегатах непрерывного горячего оцинкования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 80–96. EDN: UUNLLG
- [29] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Новак В.С. Гибридная модель для упреждающего управления температурой металла при горячем оцинковании стальной полосы. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2023, т. 24, № 8, с. 421–432, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432>
- [30] Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S. Big data-driven assessment of proposals to improve enterprise flexibility through control options untested in practice. *Glob. J. Flex. Syst. Manag.*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 43–74, doi: <https://doi.org/10.1007/s40171-021-00287-5>
- [31] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Идентификация модели объекта при наличии неизвестных возмущений с широким частотным диапазоном на основе перехода к приращениям сигналов и отбора данных. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2024, т. 16, с. 315–337, doi: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-2-315-337>
- [32] Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р. и др. Непрерывный контроль температуры жидкой стали в технологических агрегатах металлургического производства. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия*, 2018, т. 18, № 3, с. 33–41, doi: <https://doi.org/10.14529/met180304>
- [33] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Кокорин И.Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2020, т. 21, № 3, pp. 143–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157>
- [34] Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. *Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами*. Москва, Наука, 1977. 271 с.
- [35] Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Управление температурным состоянием протяжной башенной печи для рекристаллизационного отжига стальной полосы. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, 2018, № 1, с. 13–21.

## References

- [1] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S. et al. Investigation of performance limitations in continuous hot-dip galvanizing units associated with product defects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous

- Metallurgy], 2024, vol. 67, no. 1, pp. 89–105, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-1-89-105> (in Russ.).
- [2] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S. et al. Influence of steel strip speed and tension on product defects on continuous hot-dip galvanizing lines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023, vol. 21, no. 4, pp. 93–104. (In Russ.).
- [3] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Chuta A.S. Managing flexible galvanized sheet production with product quality and human factors in consideration. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering & Automation Problems], 2023, no. 4, pp. 122–135. (In Russ.).
- [4] Chavan R.R. *Analysis of energy consumption in continuous galvanizing lines*. MS Thesis. Statler College of Engineering and Mineral Resources, 2006, doi: <https://doi.org/10.33915/etd.1749>
- [5] Sundaramoorthy S., Phuong Q., Gopalakrishnan B. et al. Heat balance analysis of annealing furnaces and zinc pot in continuous hot dip galvanizing lines. *Energy Eng.*, 2016, vol. 113, no. 2, pp. 12–47, doi: <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11668651>
- [6] Strommer S., Niederer M., Steinboeck A. et al. Hierarchical nonlinear optimization-based controller of a continuous strip annealing furnace. *Control Eng. Pract.*, 2018, vol. 73, pp. 40–55, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.12.005>
- [7] Yahiro K., Shigemori H., Hirohata K. et al. Development of strip temperature control system for a continuous annealing line. *Proc. IECON '93*, 2002, pp. 481–486, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.1993.339029>
- [8] Seo M., Ban J., Cho M. et al. Low-order model identification and adaptive observer-based predictive control for strip temperature of heating section in annealing furnace. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 53720–53734, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071124>
- [9] Fein M., Böck-Schnepps M., Strommer S. et al. Model-based control and optimization of continuous strip annealing furnaces. *Measuring & Process Control*, 2016, no. 1, pp. 57–63.
- [10] Yoshitani N. Optimal control of steel strip temperature in continuous annealing processes. In: *Materials science and engineering serving society*. Elsevier, 1998, pp. 303–308, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-044482793-7/50069-2>
- [11] Bitschnau L., Jakubek S., Kozek M. Constrained model predictive control of a continuous annealing furnace. *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Conf.*, 2010, pp. 285–292, doi: <https://doi.org/10.1115/DSCC2010-4129>
- [12] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [13] Zhou M., Yu D., Zhou J. A new strip temperature control method for the heating section of continuous annealing line. *IEEE Conf. on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008, pp. 861–864, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2008.4670926>
- [14] Peng L., Li F. The optimal design of hot steel strip temperature control algorithm. *IFAC Proc. Volumes*, 2003, vol. 36, no. 24, pp. 129–132, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37615-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37615-2)
- [15] Strommer S., Niederer M., Steinboeck A. et al. Nonlinear observer for temperatures and emissivities in a strip annealing furnace. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2016.7731914>
- [16] Niederer M., Strommer S., Steinboeck A. et al. Nonlinear model predictive control of the strip temperature in an annealing furnace. *J. Process Control*, 2016, vol. 48, pp. 1–13, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.012>
- [17] Imose M. Heating and cooling technology in the continuous annealing. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 1985, vol. 25, no. 9, pp. 911–932, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.25.911>
- [18] Martínez-de-Pisón F.J., Alba-Elías F., Castejón-Limas M. et al. Improvement and optimisation of hot dip galvanising line using neural networks and genetic algorithms. *Ironmak. Steelmak.*, 2006, vol. 33, no. 4, pp. 344–352, doi: <https://doi.org/10.1179/174328106X101565>

- [19] Martínez-de-Pisón F.J., Pernía A.V., González A. et al. Optimum model for predicting temperature settings on hot dip galvanising line. *Ironmak. Steelmak.*, 2010, vol. 37, no. 3, pp. 187–194, doi: <https://doi.org/10.1179/030192309X12573371383604>
- [20] Martínez-de-Pisón F.J., Celorrio L., Pérez-de-la-Parte M. et al. Optimising annealing process on hot dip galvanising line based on robust predictive models adjusted with genetic algorithms. *Ironmak. Steelmak.*, 2011, vol. 38, no. 3, pp. 218–228, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281210Y.0000000001>
- [21] Sanz-García A., Fernández-Ceniceros F., Fernández-Martínez J. et al. Methodology based on genetic optimisation to develop overall parsimony models for predicting temperature settings on annealing furnace. *Ironmak. Steelmak.*, 2014, vol. 41, no. 2, pp. 87–98, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000094>
- [22] Ding H., Shen H., Xie Q. Predictive modeling of strip temperature in continuous annealing furnace: an improved optimization algorithm. *ISIJ Int.*, 2024, vol. 65, no. 4, pp. 808–816, doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-379>
- [23] Sanz-Garcia A., Antoñanzas-Torres F., Fernández-Ceniceros J. et al. Overall models based on ensemble methods for predicting continuous annealing furnace temperature settings. *Ironmak. Steelmak.*, 2014, vol. 41, no. 1, pp. 51–60, doi: <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000104>
- [24] Guo C., Zhang Y., You X. et al. Optimal control of continuous annealing process using PSO. *Proc. IEEE Int. Conf. on Automation and Logistics*, 2009, pp. 602–606, doi: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2009.5262851>
- [25] Zhang Y., Jin Y., Cao W. et al. A dynamic data-driven model for predicting strip temperature in continuous annealing line heating process. *Proc. 37th CCC*, 2018, pp. 1887–1891, doi: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2018.8484015>
- [26] Kim S.Y., Choi J.D., Yy K.B. et al. A temperature control of steel strip using neural network in continuous annealing process. *Proc. ICNN'95*, 1995, vol. 1, pp. 631–635, doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488253>
- [27] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Shmanev D.E. et al. Strip cooling control for flexible production of galvanized flat steel. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2021, vol. 64, no. 7, pp. 519–529, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-7-519-529> (in Russ.).
- [28] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. Models for predictive thermal control in steel heat treatment using the continuous HD galvanizing units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 12, pp. 80–96. EDN: UUNLLG (in Russ.).
- [29] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Novak V.S. Hybrid model for metal temperature control during hot dip galvanizing of steel strip. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 8, pp. 421–432, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.24.421-432> (in Russ.).
- [30] Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S. Big data-driven assessment of proposals to improve enterprise flexibility through control options untested in practice. *Glob. J. Flex. Syst. Manag.*, 2022, vol. 23, no. 11, pp. 43–74, doi: <https://doi.org/10.1007/s40171-021-00287-5>
- [31] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. Identification of an object model in the presence of unknown disturbances with a wide frequency range based on the transition to signal increments and data sampling. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer Research and Modeling], 2024, vol. 16, pp. 315–337, doi: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2024-16-2-315-337> (in Russ.).
- [32] Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bondareva A.R. et al. Continuous temperature control of liquid steel in technological units of metallurgical production. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 33–41, doi: <https://doi.org/10.14529/met180304> (in Russ.).
- [33] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Kokorin I.D. System of temperature stabilization in a heating furnace based on sliding mode control and fuzzy logic. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 143–157, doi: <https://doi.org/10.17587/mau.21.143-157> (in Russ.).

- [34] Krasovskiy A.A., Bukov V.N., Shendrik V.S. *Universalnye algoritmy optimalnogo upravleniya nepreryvnymi protsessami* [Universal algorithms for optimal control of continuous processes]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 271 p. (In Russ.).
- [35] Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S. Thermal management on strand and tower-type furnace for recrystallization steel strip annealing. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2018, no. 1, pp. 13–21. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.11.2024

## Информация об авторах

**РЯБЧИКОВ Михаил Юрьевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления». Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: mr\_mgn@mail.ru).

**РЯБЧИКОВА Елена Сергеевна** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления». Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, Российская Федерация, пр. Ленина, д. 38, e-mail: mika.elena@mail.ru).

## Information about the authors

**RYABCHIKOV Mikhail Yurievich** — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Associate Professor of Department of Automated Control Systems. Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: mr\_mgn@mail.ru).

**RYABCHIKOVA Elena Sergeevna** — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor, Associate Professor of Department of Automated Control Systems. Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: mika.elena@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. Разработка модели для оптимизации управления термической обработкой стали при непрерывном горячем оцинковании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 2, с. 60–81.

### Please cite this article in English as:

Ryabchikov M.Y., Ryabchikova E.S. Model for optimizing control of the steel heat treatment in the continuous hot-dip galvanizing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 2, pp. 60–81.