

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОКОВЕДУЩИХ ЖИЛ НА ОСНОВЕ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНИЯМИ
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ПРОКАТКИ МЕДНОЙ КАТАНКИ**

**Цыпкина Виктория Вячеславовна,
Иванова Вера Павловна,
Акабирова Лола Хусейновна,
Пирназарова Сарбиназ Сарсенбаевна,
Аминов Руслан Дмитриевич**

**ИНФОРМАЦИЯ О
СТАТЬЕ**

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 22.06.2026

Revised: 23.06.2026

Accepted: 24.06.2026

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА:**

*непрерывное литьё и
прокатка, медная
катанка, система
управления,
теплообмен,
энергетическая
эффективность,
автоматизация
производства,
математическое
моделирование,
оптимальное управление,
качество продукции,
металлургические
процессы..*

АННОТАЦИЯ:

В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности функционирования линий непрерывного литья и прокатки (НЛП) медной катанки на основе анализа существующих систем управления и разработки подходов к их совершенствованию. Проведен анализ эксплуатационных режимов плавильно-раздаточного участка, выявлены основные причины энергетических потерь и снижения качества продукции, обусловленные температурной нестабильностью, инерционностью процессов и недостаточной адаптивностью систем управления. Установлено, что перегревы расплава и перегрузки прокатного оборудования приводят к значительному перерасходу электроэнергии, ухудшению геометрических и физико-механических характеристик катанки, а также снижению надежности технологического оборудования. Показано, что существующие системы управления не обеспечивают комплексного учета взаимосвязанных теплообменных и деформационных процессов. Предложен системный подход к моделированию объекта управления, основанный на декомпозиции технологического процесса и формализации энергетических потоков. Обоснована необходимость разработки математических моделей и алгоритмов оптимального управления с целью минимизации

энергозатрат и повышения качества медной катанки. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации автоматизированных систем управления металлургическими производствами.

Введение. Современное развитие металлургической и кабельной промышленности во многом определяется внедрением высокоэффективных непрерывных технологических процессов, среди которых особое место занимает технология непрерывного литья и прокатки (НЛП) медной катанки. Данный способ позволяет получать длинномерные бесстыковые полуфабрикаты с высокими показателями электропроводности (удельное электрическое сопротивление порядка $1,724 \cdot 10^{-8}$ Ом·м), улучшенными механическими характеристиками и стабильным качеством поверхности при отсутствии окисной пленки, что является критически важным для последующего производства кабельно-проводниковой продукции.

Несмотря на технологические преимущества линий НЛП, значительная часть действующего оборудования на предприятиях кабельной отрасли эксплуатируется более 15 лет и характеризуется высоким уровнем физического и морального износа. В этих условиях повышение эффективности производства катанки достигается преимущественно за счет интенсификации технологического процесса, снижения простоев оборудования, оптимизации энергопотребления и повышения уровня автоматизации управления.

Ключевым фактором, определяющим эффективность функционирования линий НЛП, является качество систем управления технологическим процессом. Анализ существующих автоматизированных систем управления показывает, что их функционирование, как правило, основано на локальной стабилизации отдельных технологических параметров без учета комплексного характера взаимосвязанных тепломассообменных и механических процессов. При этом не учитываются временные запаздывания, распределенность параметров, нелинейность динамики, а также взаимное влияние подсистем при теплопереносе и деформации металла [1].

Так, регулирование температурных режимов плавильного и смесительного оборудования без учета динамических задержек приводит к отклонениям от оптимального теплового состояния системы, перерасходу электрической энергии и ускоренному износу футеровки, в частности индукционных нагревательных элементов. Указанные факторы обуславливают снижение надежности оборудования и увеличение длительности внеплановых простоев [3].

Дополнительной проблемой является недостаточная формализация процедур управления производительностью плавильно-раздаточного участка (ПРУ), при которой выбор режимных параметров зачастую осуществляется на основе

субъективного опыта операционного персонала. Отсутствие единой формализованной модели принятия решений приводит к неустойчивости технологических режимов и снижению воспроизводимости качества продукции.

Анализ эксплуатационных данных свидетельствует о существенном росте энергозатрат, увеличении себестоимости продукции, а также снижении производительности вследствие аварийных остановок оборудования и нестабильности технологического процесса. При этом наблюдается перерасход электроэнергии, обусловленный колебаниями температурного режима расплава и нестабильностью работы прокатного стана, достигающий порядка 25 % от нормативного уровня.

Следует отметить, что существующие системы управления не учитывают совокупность взаимосвязанных факторов, включающих тепловые, механические и гидродинамические процессы, а также ограничения технологического характера. В результате контроль более чем 170 параметров технологического процесса, из которых порядка 25 являются критически важными, становится практически невозможным в условиях ручного или полуавтоматического управления.

В этих условиях очевидна необходимость перехода к принципиально новым подходам к управлению сложными технологическими объектами, основанным на использовании методов математического моделирования, системного анализа и оптимального управления. Целью настоящей работы является проведение структурного анализа плавно-раздаточного участка линии НЛП, разработка математических моделей основных технологических подсистем и синтез системы оптимального управления по критерию минимизации энергозатрат с последующей реализацией алгоритмов автоматизированного управления технологическим процессом.

Реализация поставленной цели требует разработки комплекса взаимосвязанных математических моделей, описывающих процессы плавления, накопления и транспортировки расплава, кристаллизации, прокатки и охлаждения катанки. В рамках системного подхода линия НЛП рассматривается как сложный многоуровневый объект с распределенными параметрами, в котором теплообменные процессы могут быть представлены в виде последовательности взаимосвязанных звеньев с потоками энергии Q_i и массы m_i , а также внешними энергетическими воздействиями Q_n и потерями Q_n .

Таким образом, разработка интеллектуальной системы управления линией НЛП, основанной на адекватных математических моделях технологических подсистем, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит повысить энергетическую эффективность, снизить себестоимость продукции и обеспечить стабильность качества медной катанки в условиях длительной эксплуатации оборудования.

Анализ современных исследований в области непрерывного литья и проката.

Анализ научно-технической литературы и современных исследований в области непрерывного литья и прокатки (НЛП) медной катанки показывает, что основные направления совершенствования технологических процессов связаны с повышением энергоэффективности, стабилизацией тепловых режимов и развитием автоматизированных систем управления сложными металлургическими объектами.

В работах, посвящённых исследованию тепломассообменных процессов в установках непрерывного литья, рассматриваются модели тепловых потоков в плавильных агрегатах, миксерах и кристаллизаторах, а также влияние нестационарных режимов на качество получаемого полуфабриката. Отмечается, что нарушение теплового баланса системы приводит к возникновению температурных градиентов, ухудшению структуры металла и снижению стабильности геометрических параметров катанки.

Значительное внимание в технической литературе уделяется вопросам управления прокатными станами и системами транспортировки расплава. Исследования показывают, что динамические нагрузки, колебания скорости подачи и нестабильность температурного режима оказывают существенное влияние на качество конечной продукции и ресурс оборудования. При этом большинство существующих решений основано на использовании классических ПИД-регуляторов, ориентированных на локальную стабилизацию отдельных параметров процесса.

Отдельную группу составляют работы, посвящённые моделированию процессов тепломассообмена и деформации металла в линиях НЛП. В данных исследованиях применяются как аналитические, так и численные методы, включая конечные разностные и конечно-элементные подходы. Однако существующие модели, как правило, не учитывают в полной мере распределённый характер параметров технологической системы, а также взаимосвязь между подсистемами «плавление – транспортировка – кристаллизация – прокатка».

В ряде исследований отмечается, что эффективность функционирования линий НЛП существенно ограничивается отсутствием комплексного системного подхода к управлению технологическим процессом. Существующие автоматизированные системы управления, как правило, не обеспечивают оптимизацию энергозатрат и не учитывают взаимное влияние тепловых, механических и гидродинамических процессов, протекающих в оборудовании.

Отдельное направление исследований связано с разработкой интеллектуальных систем управления металлургическими процессами на основе методов математического моделирования, теории оптимального управления и системного анализа. В этих работах предлагается использовать многокритериальные модели, позволяющие учитывать энергетические, технологические и экономические показатели. Однако практическая реализация подобных решений на действующих

линиях НЛП остается ограниченной из-за сложности идентификации параметров и высокой размерности моделей.

**Анализ научно-технических источников
по вопросам управления линиями НЛП**

Таблица-1

№	Источник	Рассматриваемые вопросы	Основные результаты	Ограничения
1	Перлин И.Л., Ерманок М.З. <i>Теория волочения</i>	Теория пластической деформации металлов	Описаны основы волочения и напряженно- деформированно го состояния	Не учитываются автоматизированн ые системы управления
2	Avitzur В. <i>Metal Forming Processes</i>	Математическое моделирование деформации	Разработаны аналитические модели процессов обработки давлением	Ограничена применимость к непрерывным процессам
3	Dieter G.E. <i>Mechanical Metallurgy</i>	Механика пластической деформации	Установлены зависимости между напряжениями и деформациями	Отсутствует учет тепловых процессов НЛП
4	Semiatin S.L. <i>ASM Handbook</i>	Технологии обработки металлов	Обобщены промышленные технологии прокатки и литья	Недостаточная детализация динамики процессов
5	Rowe G.W. <i>Metal Forming Processes</i>	Технология волочения и прокатки	Рассмотрены режимы обработки металлов	Не рассматриваются системы управления
6	Phelan P. et al. (2001)	Моделирование дефектов при волочении	Показано влияние трения и температуры на качество проволоки	Локальные модели без учета системы в целом

7	Chin R.K., Steif P.S. (1995)	Численное моделирование деформации	Получены распределения деформаций в проволоке	Отсутствует интеграция с АСУ ТП
8	Wistreich J.G.	Процессы волочения	Исследованы фундаментальны е закономерности процесса	Не учитываются современные линии НЛП
9	Отечественны е исследования НЛП (металлургическ ие журналы)	Тепломассообме н в линиях НЛП	Описаны тепловые режимы и их влияние на качество катанки	Частичная формализация моделей
10	Патент РУз № FAR 00659	Совмещение фельрного и бесфильрного волочения	Предложено снижение износа инструмента до 25%	Требует модернизации оборудования

Таким образом, анализ технических источников (таблица-1) показывает, что несмотря на значительное количество исследований в области непрерывного литья и прокатки, сохраняется необходимость разработки комплексных математических моделей и интеллектуальных систем управления, обеспечивающих согласованное функционирование всех подсистем линии НЛП и оптимизацию энергозатрат при производстве медной катанки.

Постановка задачи исследования и обоснование необходимости совершенствования системы управления линиями непрерывного литья и проката. Современный уровень развития металлургической и кабельной промышленности в значительной степени определяется эффективностью функционирования линий непрерывного литья и прокатки (НЛП), обеспечивающих получение медной катанки с заданными электрическими, механическими и геометрическими характеристиками. При этом качество медной катанки является определяющим фактором, влияющим на эксплуатационные свойства токоведущих жил, включая электрическое сопротивление, механическую прочность, пластичность, стабильность диаметра и однородность структуры материала.

Несмотря на технологические преимущества линий НЛП, эксплуатационный анализ показывает, что значительная часть действующих производственных комплексов характеризуется высоким уровнем физического и морального износа оборудования,

что приводит к снижению стабильности технологического процесса, ухудшению качества катанки и росту энергетических затрат.

Функционирование плавно-раздаточного участка (ПРУ) линии НЛП сопровождается сложными взаимосвязанными тепломассообменными и механическими процессами, определяющими формирование структуры и качества металла (рис.1). При этом существующие системы управления ориентированы преимущественно на локальную стабилизацию отдельных технологических параметров и не обеспечивают комплексного учета инерционности, распределенности параметров, временных запаздываний и взаимовлияния подсистем.

Эксплуатационные исследования показывают, что применение традиционных регуляторов температурных режимов без учета динамических характеристик объекта приводит к отклонениям теплового состояния расплава, что вызывает структурную неоднородность металла, увеличение остаточных напряжений и ухудшение качества медной катанки. Данные факторы непосредственно отражаются на стабильности диаметра, качестве поверхности и электрических характеристиках готовой продукции.

Дополнительным источником нестабильности является субъективный характер принятия решений при управлении производительностью ПРУ, при котором выбор режимных параметров осуществляется на основе опыта операционного персонала. Это приводит к отсутствию единой формализованной стратегии управления и снижению воспроизводимости показателей качества катанки.

В результате указанных факторов наблюдается увеличение себестоимости продукции, перерасход электроэнергии, снижение производительности линии НЛП, а также ухудшение качества медной катанки, проявляющееся в нестабильности геометрических размеров, повышенной овальности, неоднородности структуры и изменении электрических характеристик.

В этих условиях возникает научно-техническая задача разработки принципиально новой системы управления плавно-раздаточным участком линии НЛП, обеспечивающей не только повышение энергетической эффективности, но и улучшение качества медной катанки за счет стабилизации тепловых и деформационных режимов процесса.

Решение данной задачи предполагает проведение структурного анализа объекта управления, формализацию тепломассообменных процессов, разработку математических моделей подсистем линии НЛП и синтез системы оптимального управления по критерию минимизации энергозатрат при одновременном обеспечении требуемого уровня качества готовой продукции.

Особенностью рассматриваемого объекта является его сложная многокомпонентная структура с распределенными энергетическими потоками, в которой каждый технологический элемент характеризуется потоками энергии и массы. В рамках системного подхода процесс тепломассообмена может быть представлен в виде

последовательности взаимосвязанных звеньев с потоками тепла Q_i , массой металла m_i , а также внешними энергетическими воздействиями Q_n и потерями Q_p , что позволяет сформировать формализованную модель, ориентированную на управление как энергозатратами, так и качеством продукции.

Таким образом, поставленная задача заключается в разработке математически обоснованной модели и системы оптимального управления линией НЛП, обеспечивающей снижение энергозатрат, повышение стабильности технологических режимов, улучшение качества медной катанки и повышение эксплуатационной надежности оборудования в условиях длительной промышленной эксплуатации.

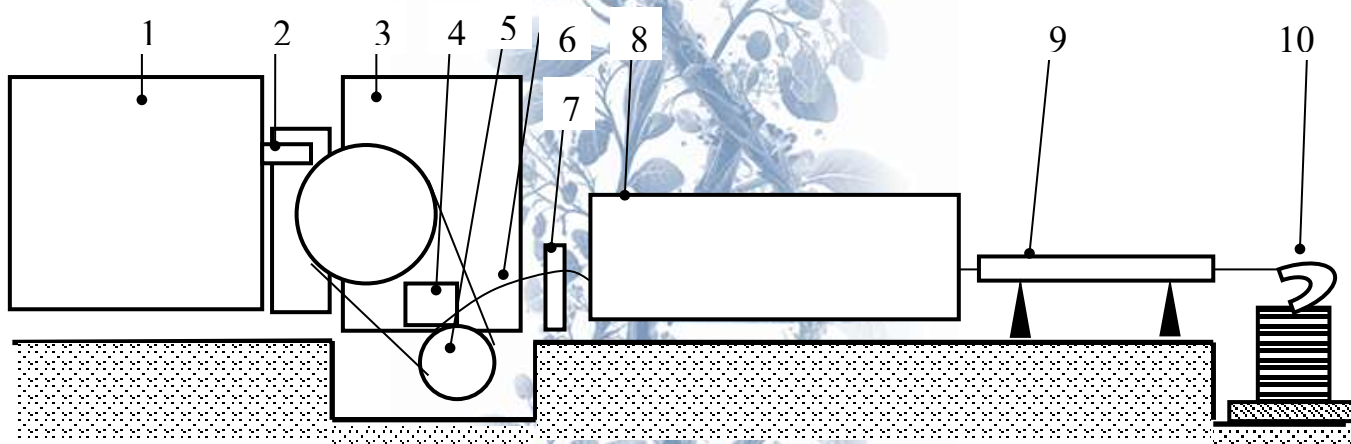


Рис.1 Сложный объект НЛП

1-плавильный агрегат; 2- желоб; 3 – миксер; 4 – промежуточная емкость; 5- кристаллизатор; 6-непрерывный медный слиток; 7- петлерегулятор; 8- прокатный стан; 9- система охлаждения катанки;

В процессе эксплуатационного наблюдения технологического объекта установлено наличие периодических отклонений температурного режима расплава, проявляющихся в виде локальных и циклических перегревов металла, а также эпизодических перегрузок прокатного стана. Данные режимные отклонения сопровождаются увеличением потребления электрической энергии и нарушением стабильности технологического процесса [2].

Расчётные оценки, выполненные по данным наблюдений за период эксплуатации 6000 часов, показывают, что средний перегрев металла и сопутствующий дополнительный расход электроэнергии составляют порядка $2,45 \cdot 10^5$ кВт·ч. При этом в условиях пересменок фиксируется систематический перегрев расплава, достигающий в среднем трёх крат за смену, при максимальной температуре порядка 1178 °С. Средняя продолжительность перегревного режима составляет около 0,4 часа при интервале его повторяемости 3,5 часа, что формирует дополнительный расход электроэнергии на уровне $1,55 \cdot 10^5$ кВт·ч.

Дополнительные энергетические затраты, обусловленные процессом прокатки, составляют $0,48 \cdot 10^5$ кВт·ч, что связано с увеличением потребляемой мощности привода прокатного стана (до 8 кВт) при обработке металла с пониженной температурой. В совокупности суммарный перерасход электрической энергии достигает порядка 25 % от нормативного уровня энергопотребления технологической линии.

Следует отметить, что приведённые энергетические оценки не учитывают комплекс сопутствующих эксплуатационных потерь, обусловленных нестабильностью температурного режима. К числу таких факторов относятся: увеличение расхода охлаждающей воды при перегреве оборудования, снижение ресурса футеровки и индукционных нагревательных элементов, ускоренный износ валков прокатного стана, интенсификация процессов окисления металла с последующим ухудшением качества продукции, а также вынужденные переходы оборудования в режим ручного управления вследствие снижения надежности автоматических систем.

Анализ эксплуатационного состояния парка технологического оборудования, находящегося в эксплуатации более 15 лет, позволяет сделать вывод о недостаточной эффективности существующих систем управления линиями непрерывного литья и прокатки. Основной причиной данного положения является ориентация применяемых систем управления на локальную стабилизацию отдельных технологических параметров без учета их взаимосвязей, нелинейности процессов и интегрального влияния на энергетические и качественные показатели производства.

Кроме того, традиционные подходы к управлению сложными технологическими объектами не обеспечивают оптимального соотношения между технологическими параметрами, что приводит к нарушению энергетического баланса и снижению общей эффективности функционирования системы. Следует подчеркнуть, что объект управления характеризуется высокой размерностью и включает более 170 контролируемых параметров, из которых порядка 25 относятся к критически важным.

В этих условиях возможности операторского управления оказываются существенно ограниченными вследствие высокой информационной нагрузки, временных ограничений на принятие решений и сложности обработки многомерных данных технологического процесса. Даже при распределении функций между несколькими операторами сохраняется вероятность несогласованности принимаемых решений, обусловленной различиями в интерпретации состояния объекта и выборе управляющих воздействий.

Таким образом, возникает объективная необходимость перехода к автоматизированным и интеллектуальным системам управления, способным обеспечивать формализованную оценку состояния технологического процесса, прогнозирование его динамики и выработку оптимальных управляющих воздействий.

При этом совершенствование системы управления должно рассматриваться не только как задача стабилизации технологических параметров, но и как комплексная задача оптимизации функционирования производственной системы в целом. Данное совершенствование может быть реализовано по двум взаимосвязанным направлениям: оптимизация организационно-производственных связей (внешний контур управления) и совершенствование алгоритмов управления технологическим процессом (внутренний контур управления).

Первое направление включает формализацию взаимодействия между технологическим процессом и вспомогательными подсистемами предприятия, такими как материально-техническое снабжение, энергоснабжение, контроль качества продукции и управление отходами производства. Второе направление предполагает построение оптимальных алгоритмов управления, обеспечивающих координацию работы всех элементов технологической системы в соответствии с заданными критериями эффективности.

Реализация указанных подходов невозможна без применения современных вычислительных средств, обеспечивающих обработку больших массивов технологической информации в реальном времени. В этом случае система управления должна включать аппаратно-программный комплекс, состоящий из технического, информационного, организационного и программного обеспечения, ядром которого является математическое обеспечение, реализующее алгоритмы оптимального управления и функционирования технологического процесса.

Полученные результаты исследования. В результате проведенного исследования разработана структурно-функциональная и математическая модель процесса непрерывного литья и прокатки (НЛП) медной катанки, учитывающая взаимосвязанные тепломассообменные, энергетические и деформационные процессы плавильно-раздаточного участка. Модель представлена в виде системы взаимосвязанных звеньев, описывающих перенос тепловой энергии, потоков расплава и массоперенос металла, что позволяет формализовать сложный технологический объект с распределенными параметрами и временными задержками.

Установлены закономерности влияния технологических режимов (температуры расплава, скорости транспортировки и прокатки, тепловых потерь) на формирование качественных характеристик медной катанки, включая стабильность диаметра, овальность поперечного сечения, однородность структуры и уровень остаточных напряжений. Показано, что нестабильность теплового режима приводит к ухудшению геометрических и физико-механических параметров продукции, а также к снижению электрических характеристик катанки.

Сформирован критерий оптимального управления технологическим процессом НЛП, ориентированный на одновременное обеспечение минимизации энергозатрат и

повышения качества готовой продукции. В рамках данного критерия учитываются отклонения температурных режимов, потери тепловой энергии, а также отклонения геометрических параметров катанки от заданных значений.

Показано, что применение системного подхода к управлению плавно-раздаточным участком позволяет обеспечить снижение энергетических затрат за счет устранения режимов перегрева и уменьшения тепловых потерь. Установлено, что рационализация тепловых режимов и стабилизация параметров прокатки способствуют повышению стабильности процесса и улучшению качества медной катанки.

В целом полученные результаты подтверждают, что разработанная информационно-математическая модель позволяет повысить эффективность управления линией НЛП, обеспечить улучшение эксплуатационных характеристик оборудования, а также достичь повышения качества медной катанки за счет стабилизации технологических режимов и оптимизации энергетического баланса системы.

Энергетические и эксплуатационные потери при функционировании линии НЛП

Таблица-2

№	Показатель	Условие возникновения	Количественное значение	Влияние на процесс
1	Перерасход электроэнергии при перегреве металла	Периодические температурные отклонения в плавильной зоне	$2,45 \cdot 10^5$ кВт·ч (за 6000 ч)	Рост энергозатрат, нестабильность теплового режима
2	Дополнительные затраты энергии при пересменках	Циклический перегрев расплава	$1,55 \cdot 10^5$ кВт·ч	Термическая неустойчивость, снижение качества расплава
3	Перерасход энергии при прокатке	Обработка «захоленной» заготовки	$0,48 \cdot 10^5$ кВт·ч	Увеличение нагрузки на привод стана
4	Суммарный перерасход электроэнергии	Комплекс режимных отклонений	~25 % от базового энергопотребления	Снижение энергетической эффективности линии

5	Перегрев расплава в смену	Нарушение теплового баланса печи	до 3 циклов/смена	Ускоренный износ оборудования
6	Максимальная температура расплава	Пиковые режимы работы	1178 °С	Риск разрушения футеровки
7	Среднее время перегрева	Циклические тепловые колебания	0,4 ч	Тепловая нестабильность процесса
8	Интервал повторяемости перегрева	Нестабильный режим управления	3,5 ч	Снижение устойчивости технологического режима
9	Снижение эксплуатационной надежности оборудования	Совокупность факторов перегрева и перегрузок	Качественная оценка	Рост аварийности и простоев
10	Ухудшение качества продукции	Термическая и механическая нестабильность	Качественная оценка	Окисление, дефекты структуры, снижение качества катанки

Вывод. Проведённый анализ эксплуатационного состояния линии непрерывного литья и прокатки (НЛП) медной катанки показал наличие устойчивых режимных отклонений, проявляющихся в виде периодических перегревов расплава, нестабильности температурного поля и перегрузок прокатного оборудования. Установлено, что данные явления носят системный характер и обусловлены недостаточной адаптивностью существующих систем управления, ориентированных преимущественно на локальную стабилизацию отдельных технологических параметров без учета их взаимосвязей и динамики изменения состояния объекта.

Расчётные оценки энергетических потерь свидетельствуют о значительном перерасходе электрической энергии, который формируется за счёт совокупного влияния тепловой нестабильности и неэффективных режимов прокатки. В частности, суммарный перерасход электроэнергии достигает порядка 25 % от базового уровня энергопотребления, что включает вклад перегрева металла ($2,45 \cdot 10^5$ кВт·ч за 6000 часов), дополнительных затрат в переходных режимах пересменок ($1,55 \cdot 10^5$ кВт·ч) и повышенного энергопотребления при прокатке «захожденной» заготовки ($0,48 \cdot 10^5$

кВт·ч). При этом фиксируются значительные тепловые отклонения технологического процесса: многократные перегревы расплава в течение смены, максимальные температуры до 1178 °С, средняя продолжительность перегрева около 0,4 часа и периодичность порядка 3,5 часа.

Комплекс указанных факторов приводит не только к увеличению энергозатрат, но и к существенному снижению эксплуатационной надёжности оборудования, включая ускоренный износ футеровки, индукционных нагревательных элементов и валков прокатного стана, а также к ухудшению качества готовой продукции вследствие интенсификации окислительных процессов и нестабильности структуры металла. Дополнительно отмечается рост эксплуатационных потерь, связанных с увеличением расхода охлаждающей воды, простоев оборудования и переходом технологического процесса в ручной режим управления.

Проведённая систематизация технологических факторов подтверждает, что существующие системы управления НЛП не обеспечивают требуемого уровня эффективности, поскольку не учитывают многомерный характер объекта управления, включающего более 170 контролируемых параметров. В результате операторское управление, основанное на субъективной оценке состояния процесса, не позволяет обеспечить устойчивые оптимальные режимы функционирования.

Таким образом, полученные результаты обосновывают необходимость разработки интеллектуализированной системы управления линией НЛП, основанной на формализованных математических моделях теплообменных и энергетических процессов. Реализация такой системы позволит обеспечить снижение энергопотребления, стабилизацию тепловых режимов, повышение надёжности оборудования и улучшение качества медной катанки за счёт минимизации температурных и технологических отклонений.

Литература:

1Список литературы

1. Арутюнов В.А. и др. *Металлургическая теплотехника*. — М.: Metallurgy, 1974.
2. Банный Н.П., Банный Д.Н. *Технико-экономические расчёты в чёрной металлургии*. — М.: Metallurgy, 1968.
3. Башенко В.В. и др. *Электроплавильные печи цветной металлургии*. — М.: Metallurgy, 1971.
4. Болтянский В.Г. *Математические методы оптимального управления*. — М.: Физматгиз, 1966.
5. Климовицкий Е.И. *Оптимизация работы непрерывных печей*. — М.: Metallurgy, 1965.

-
6. Тарасов В.А. *Автоматизация металлургических процессов.* — М.: Машиностроение, 2012.
 7. Петров А.П., Соколов В.А. *Системы автоматического управления технологическими процессами металлургии.* — М.: Инфра-Инженерия, 2018.
 8. Кузнецов Ю.А. *Моделирование и оптимизация тепловых процессов в металлургии.* — СПб.: Политехника, 2016.
 9. Иванов Д.А., Михайлов А.В. *Современные технологии непрерывного литья и прокатки цветных металлов.* — М.: Металлургиздат, 2020.
 10. Zhang W., Li X. *Continuous Casting and Rolling Processes: Modeling and Control.* — Springer, 2019.
 11. Rao P., Kumar S. *Advanced Process Control in Metallurgical Engineering.* — Elsevier, 2021.
 12. Smirnov S., et al. *Mathematical Modeling of Metal Forming Processes.* — Springer, 2020.
 13. World Steel Association. *Steel and Non-Ferrous Metal Production Technology Report.* — 2022.
- 