

УДК 536.24; 669.04

Василий Яковлевич Губарев

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Липецк, e-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Андрей Юрьевич Кири

ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», преподаватель – исследователь (закончил аспирантуру), руководитель проектов дирекции по управлению энергетическим комплексом, Россия, Липецк, e-mail: andrey-om3@mail.ru

Разработка рациональных режимов нагрева стальной полосы в агрегате непрерывного горячего цинкования

Авторское резюме

Состояние вопроса. На металлургических предприятиях прокатное производство является одним из наиболее энергоемких. Это связано с большими затратами энергоресурсов на нагрев прокатной полосы, вызванными некачественным регулированием процесса нагрева. Экспериментальные методы поиска рациональных режимов нагрева на металлургических предприятиях в условиях промышленного производства являются достаточно дорогостоящими и трудоемкими. В связи с этим актуальной задачей является поиск рациональных режимов нагрева, обеспечивающих заданное качество металла, методом математического моделирования.

Материалы и методы. В рамках данного исследования коэффициенты конвективной теплоотдачи определены методом компьютерного моделирования взаимодействия потоков продуктов сгорания с прокатной полосой с использованием программного обеспечения Ansys Fluent. Комплексная тепловая модель зоны прямого пламенного нагрева разработана с применением программного комплекса Microsoft Excel и методов регрессионного анализа данных. Показатели точности комплексной тепловой модели оценены путем сопоставления с опытными данными, полученными в условиях эксплуатации агрегата непрерывного горячего цинкования.

Результаты. На основании комплексной тепловой модели разработаны 23 рациональных режима нагрева стальной полосы в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования, которые повышают эффективный КПД печной части на 0,75 %. Установлено, что годовой технический эффект для всех режимов работы агрегата составляет 72,04 тыс. м³ природного газа, годовой экономический эффект – 504,3 тыс. руб.

Выводы. Методом математического моделирования решена актуальная задача поиска рациональных режимов нагрева стальной полосы в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования, обеспечивающих заданное качество металла. На основе разработанных 23 рациональных режимов нагрева проведены опытно-промышленные испытания на металлургическом предприятии в условиях промышленного производства. Фактические результаты опытно-промышленных испытаний совпадают с теоретическими результатами комплексной тепловой модели. В целях рационализации режимов нагрева и снижения затрат природного газа рекомендуется переход от зонного регулирования к погорелочному с адаптацией режимов в зависимости от обрабатываемого сортамента.

Ключевые слова: рациональные режимы нагрева, погорелочное регулирование, комплексная тепловая модель, прямой пламенный нагрев, непрерывное горячее цинкование

Vasily Yakovlevich Gubarev

Lipetsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Professor, Head of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Lipetsk, e-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Andrey Yuryevich Kirin

PJSC Novolipetsk Steel Works. Research Instructor. Project Manager of the Directorate for Energy Complex Management, Russia, Lipetsk, e-mail: andrey-om3@mail.ru

Development of rational modes of heating of a steel strip in a continuous hot-dip galvanizing unit

Abstract

Background. Rolling production is one of the most energy-consuming at iron and steel enterprise. This is due to the high energy costs of heating the rolling strip caused by poor regulation of the heating process. Experimental methods to search rational heating modes at iron and steel enterprises in industrial production conditions are quite expensive and time-consuming. Therefore, an urgent task is to find rational heating modes that ensure a given metal quality by mathematical modeling.

Materials and methods. In the framework of this study, the coefficients of convective heat transfer have been determined by the method of computer simulation of the interaction of combustion product flows with a rolling mill using the Ansys Fluent software. An integrated thermal model of the direct flame heating zone has been developed using the Microsoft Excel software package and regression data analysis methods. The accuracy indicators of the integrated thermal model have been estimated by comparing them with experimental data obtained under operating conditions of a continuous hot-dip galvanizing unit.

Results. 23 rational modes of heating of a steel strip in the direct flame heating zone of a continuous hot-dip galvanizing unit have been developed based on an integrated complex thermal model, which increase the effective efficiency of the furnace part by 0,75 %. It has been found that the annual technical effect of all modes of operation of the unit is 72,04 thousand m³ of natural gas, the annual economic effect is 504,3 thousand rubles.

Conclusions. The vital task of searching for rational heating modes of a steel strip in the direct flame heating zone of a continuous hot-dip galvanizing unit ensuring a given metal quality has been solved by mathematical modeling. Based on the developed 23 rational heating modes, pilot industrial tests have been carried out at an iron and steel enterprise in industrial production conditions. The actual results of the pilot tests coincide with the theoretical results of the integrated thermal model. In order to rationalize heating modes and reduce natural gas costs, it is recommended to switch from zone control to fire control with the adaptation of modes depending on the processed variety.

Key words: rational heating modes, fire control, integrated thermal model, direct flame heating, continuous hot-dip galvanizing

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.029-036

Введение. На металлургических предприятиях прокатное производство является одним из наиболее энергоемких. Это связано с большими затратами энергоресурсов на нагрев прокатной полосы, вызванными некачественным регулированием процесса нагрева [1, 2]. Экспериментальные методы поиска рациональных режимов нагрева на металлургических предприятиях в условиях промышленного производства являются достаточно дорогостоящими и трудоемкими. В связи с этим актуальной задачей

является поиск рациональных режимов нагрева, обеспечивающих заданное качество металла, методом математического моделирования.

Агрегат непрерывного горячего цинкования (АНГЦ) представляет собой технологическую линию для последовательного выполнения термической обработки движущейся стальной полосы и нанесения цинк-алюминиевого покрытия горячим способом. На рис. 1 представлена принципиальная схема компоновки оборудования АНГЦ.

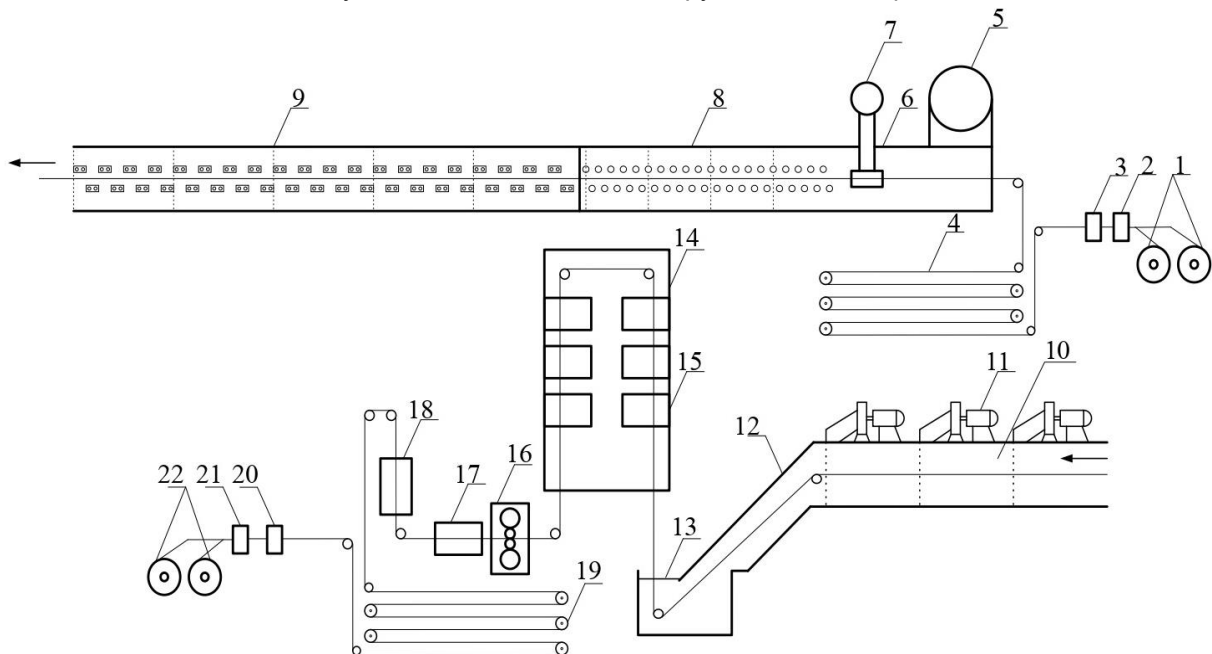


Рис. 1. Принципиальная схема компоновки оборудования АНГЦ: 1 – размотыватели; 2 – ножницы; 3 – стыковочная машина; 4 – входной петлевой накопитель; 5 – трубопровод продуктов сгорания; 6 – зона рекуперации; 7 – система подачи компенсационного воздуха; 8 – зона прямого пламенного нагрева; 9 – зона восстановительного нагрева; 10 – зона струйного охлаждения; 11 – «джет»; 12 – шнохель; 13 – ванна цинкования; 14 – башня охлаждения; 15 – вентилятор охлаждения; 16 – дрессировочная клеть; 17 – ванна нанесения пассивирующего раствора; 18 – печь сушки после пассивации; 19 – выходной петлевой накопитель; 20 – кромкообрезные ножницы; 21 – ножницы; 22 – моталки

Зона прямого пламенного нагрева (ЗППН) состоит из четырех идентичных тепловых секций, каждая из которых оснащена:

1) десятью длиннопламенными горелочными устройствами с оптимизированной системой смешения природного газа и воздуха;

2) охлаждаемыми печными роликами с замкнутой системой водяного охлаждения;

3) многослойной огнеупорной и теплоизоляционной футеровкой.

В ЗППН организована система противотока движения продуктов сгорания относительно стальной полосы.

Разработка рациональных режимов нагрева стальной полосы в ЗППН требует создания комплексной тепловой модели, учитывающей все виды теплообмена в рабочем пространстве печи, взаимодействие газовых потоков с металлом и теплофизические характеристики конструкции [3].

Методы исследования. В рамках настоящего исследования коэффициенты конвективной теплоотдачи были определены методом компьютерного моделирования процесса взаимодействия потоков продуктов сгорания с прокатной полосой с использованием программного обеспечения Ansys Fluent. В [4–6] представлена математическая модель конвективного теплообмена в ЗППН АНГЦ, обеспечивающая расчет коэффициентов теплоотдачи на границе «продукты сгорания – металлическая полоса» для различных технологических режимов работы печи. В дальнейшем эти результаты были использованы при разработке комплексной тепловой модели печной части агрегата.

В [7] предложена методика расчета теплообменных процессов в зоне рекуперации (ЗР) и ЗППН АНГЦ, основанная на системе из 40 уравнений. Комплексная тепловая модель печной части разработана с применением программного комплекса Microsoft Excel и с использованием методов регрессионного анализа данных. Показатели точности комплексной тепловой модели оценены путем сопоставления их с опытными данными, полученными в условиях эксплуатации АНГЦ.

Результаты исследования. Комплексная тепловая модель [7] обеспечивает точный расчет температур металла, атмосферы и футеровки печи по всей длине ЗР и ЗППН в зависимости от заданных технологических параметров. На основе данной модели в настоящем исследовании разработаны и апробированы рациональные режимы нагрева стальной полосы.

В настоящее время на АНГЦ применяется зонное регулирование расхода природного газа. Для рационализации режимов нагрева и снижения затрат природного газа рекомендуется переход от зонного регулирования к погорелочному с адаптацией режимов в зависимости от обрабатываемого сортамента.

На основе статистических данных работы агрегата установлены максимальные расходы природного газа на одну горелку с запасом 2 м³/ч:

1) ЗППН-1 отключена;

2) ЗППН-2: 50,5 м³/ч – при числе работающих горелок $N = 10$; 56,5 м³/ч – при $N = 9$; 62 м³/ч – при $N \leq 8$;

3) ЗППН-3 и ЗППН-4: 57,5 м³/ч – при $N = 10$; 62 м³/ч – при $N \leq 9$.

Поскольку зоны ЗППН-2, 3, 4 не всегда загружены на максимум, существуют возможные варианты селективного отключения горелок на определенное время (в часах) в течение календарного года:

1) отключение одной горелки на 3995 ч;

2) отключение двух горелок на 2695 ч;

3) отключение трех горелок на 1022 ч;

4) отключение четырех горелок на 521 ч.

Эти интервалы определены на основе годовой статистики работы АНГЦ с учетом установленных максимальных расходов газа.

Всего определено 23 основных режима работы печной части АНГЦ. Для демонстрации перехода с зонного на погорелочное регулирование рассмотрен режим №1 работы АНГЦ. Обрабатываемый сортament (прокатная полоса) имеет следующие параметры: толщина – 0,454 мм; ширина – 1340 мм; скорость – 141,8 м/мин; производительность – 40,33 т/ч; конечная температура – 706,5 °С. Восстановительная атмосфера из зоны восстановительного нагрева (ЗВН) имеет следующие характеристики: температура смеси – 762 °С; расход водорода – 219 м³/ч; расход азота – 2002 м³/ч. Параметры природного газа: расход в ЗППН-2 – 0 м³/ч; расход в ЗППН-3 – 484 м³/ч; расход в ЗППН-4 – 507 м³/ч. Параметры воздуха горения: температура – 324 °С; расход компенсационного воздуха в ЗР для дожигаания – 2343 м³/ч; расход в ЗППН-2 – 0 м³/ч; расход в ЗППН-3 – 4522 м³/ч; расход в ЗППН-4 – 4559 м³/ч.

Результаты численного моделирования для режима №1 представлены на рис. 2–6. Сравнительный анализ характеристик существующего и рационального режимов работы приведен на рис. 7–10.

На рис. 2–10 вертикальными пунктирными линиями изображены границы раздела зон по ходу движения металла:

1) 0,0 м – начало зоны рекуперации;

2) 16,3 м – начало ЗППН-1;

3) 19,9 м – начало ЗППН-2;

4) 23,5 м – начало ЗППН-3;

5) 27,1 м – начало ЗППН-4;

6) 30,7 м – начало ЗВН.

При зонном регулировании природный газ в каждой зоне распределяется условно равномерно по горелочным устройствам.

При погорелочном регулировании природный газ подается в номинальном количестве на каждое горелочное устройство. В этом случае ненагруженные горелочные устройства в первой работающей зоне селективно отключаются по ходу движения прокатной полосы. Включенными остаются горелочные устройства, которые максимально удалены от входа прокатной полосы в печное пространство агрегата.

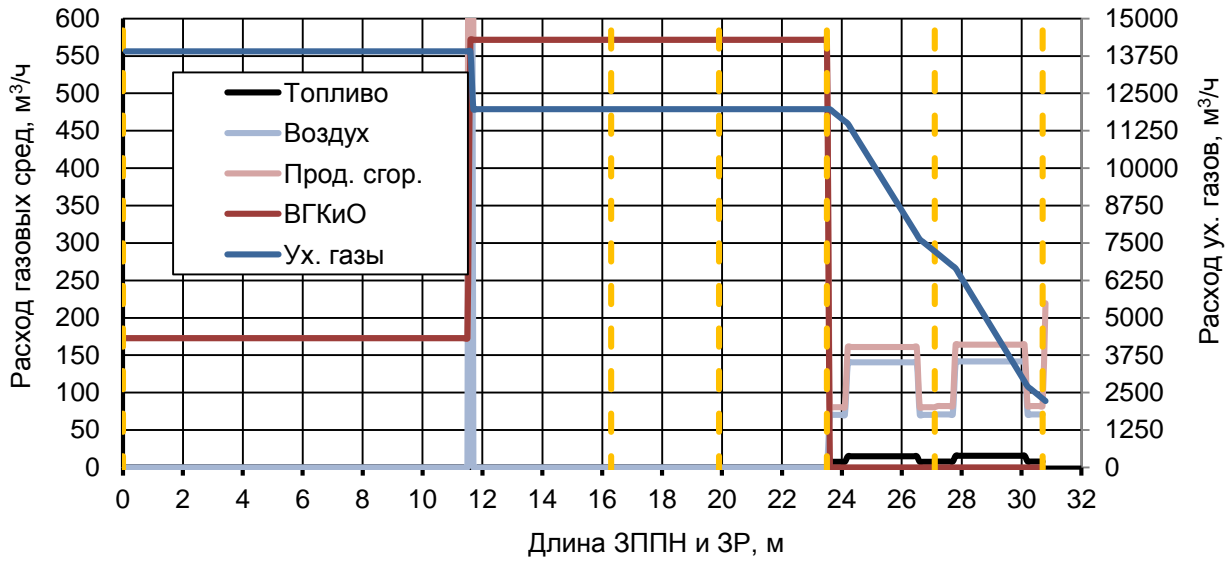


Рис. 2. Входные и расчетные расходы газовых сред для режима №1

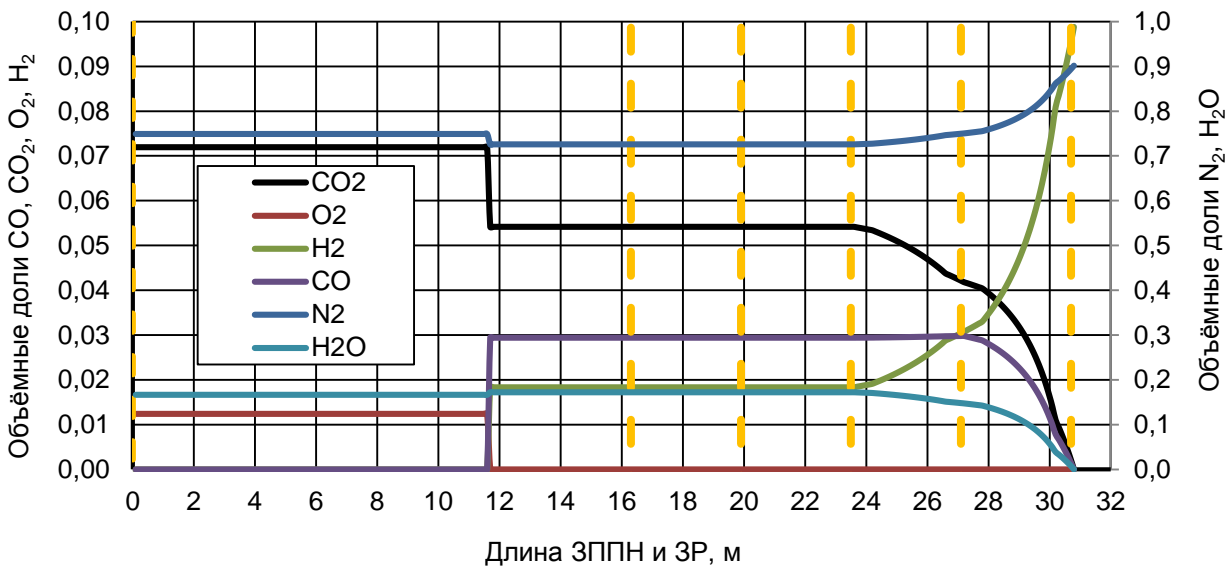


Рис. 3. Расчетные объемные доли компонентов в уходящих газах для режима №1

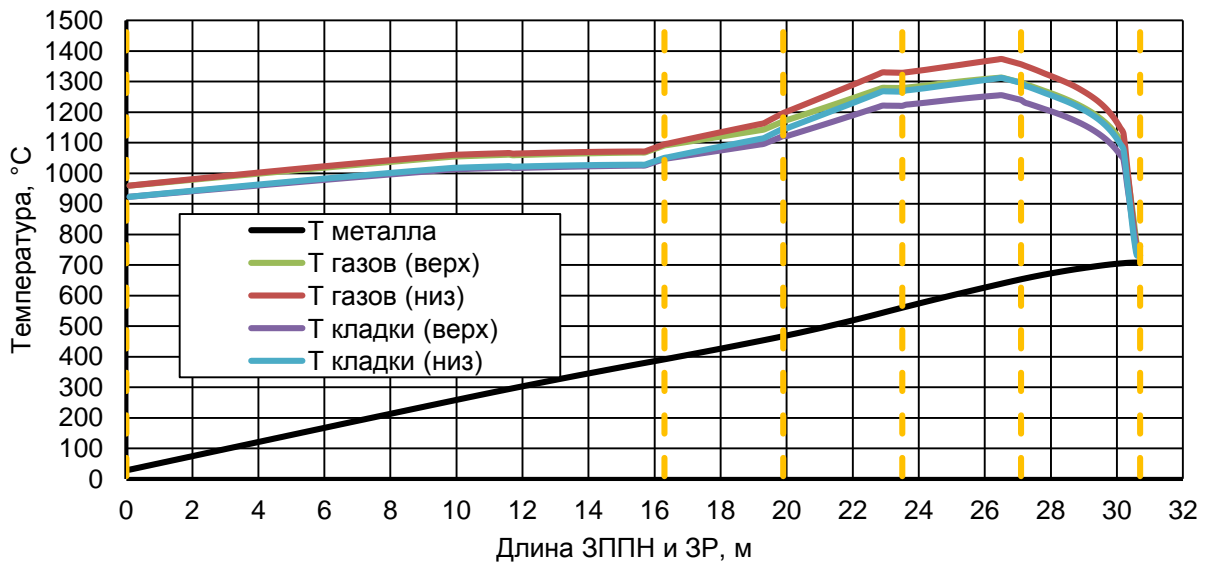


Рис. 4. Расчетные температуры металла, газов и кладки для режима №1

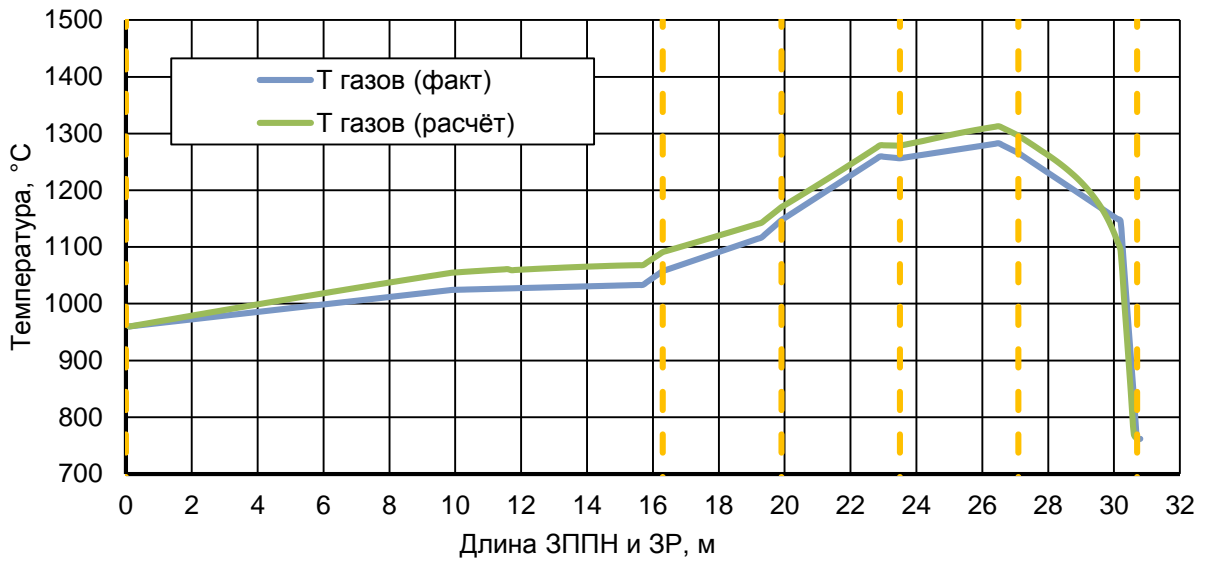


Рис. 5. Фактические и расчетные температуры газов для режима №1

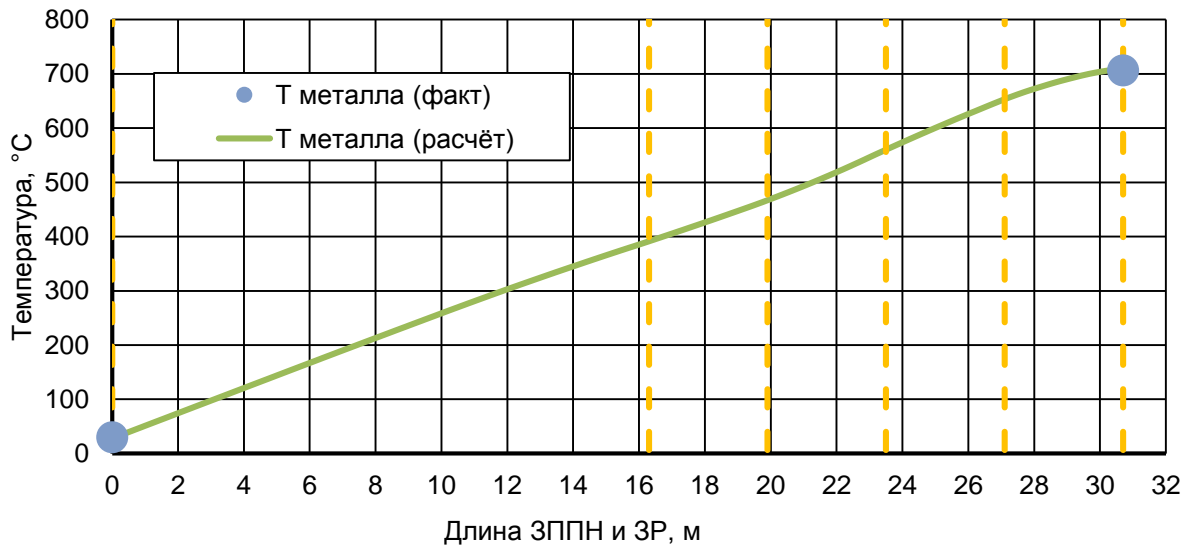


Рис. 6. Фактические и расчетные температуры металла для режима №1

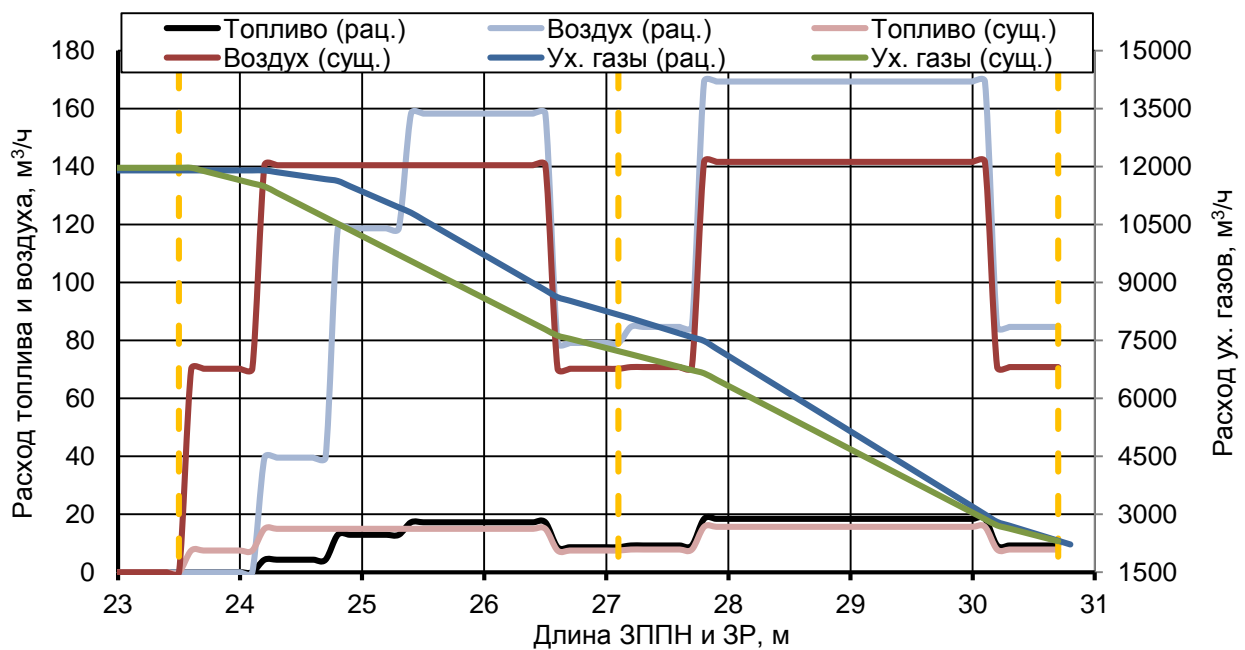


Рис. 7. Расходы газовых сред для режима №1 (сущ.) и рационального режима (рац.)

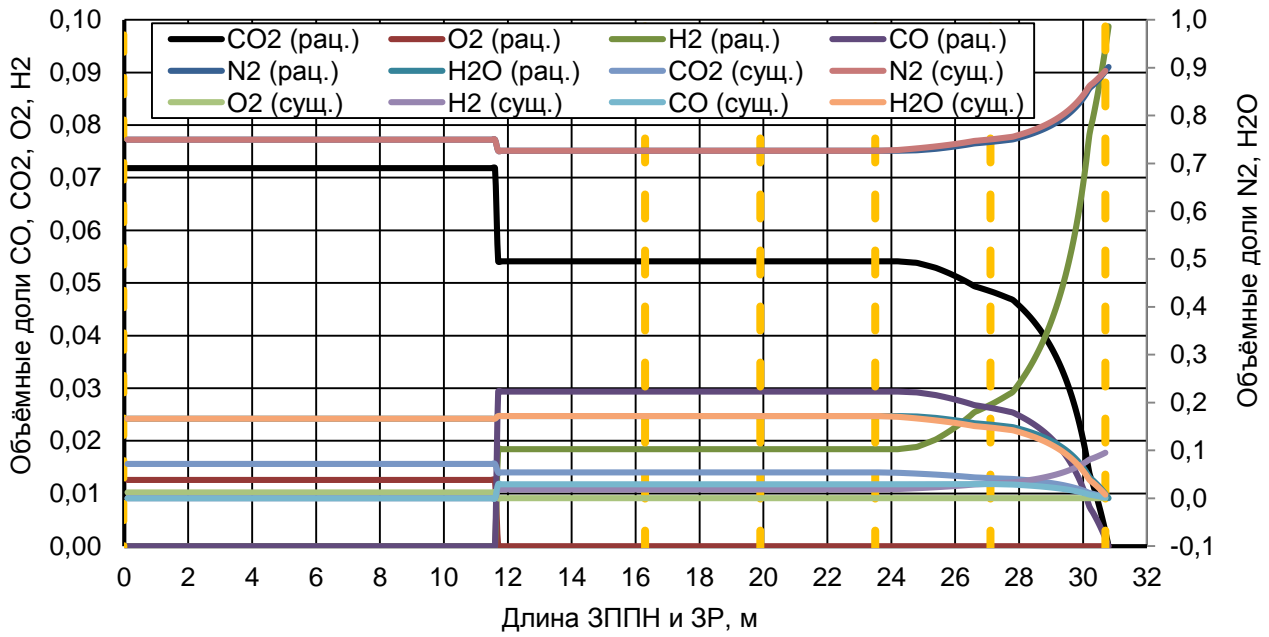


Рис. 8. Объемные доли компонентов в входящих газах для режима №1 (сущ.) и рационального режима (рац.)

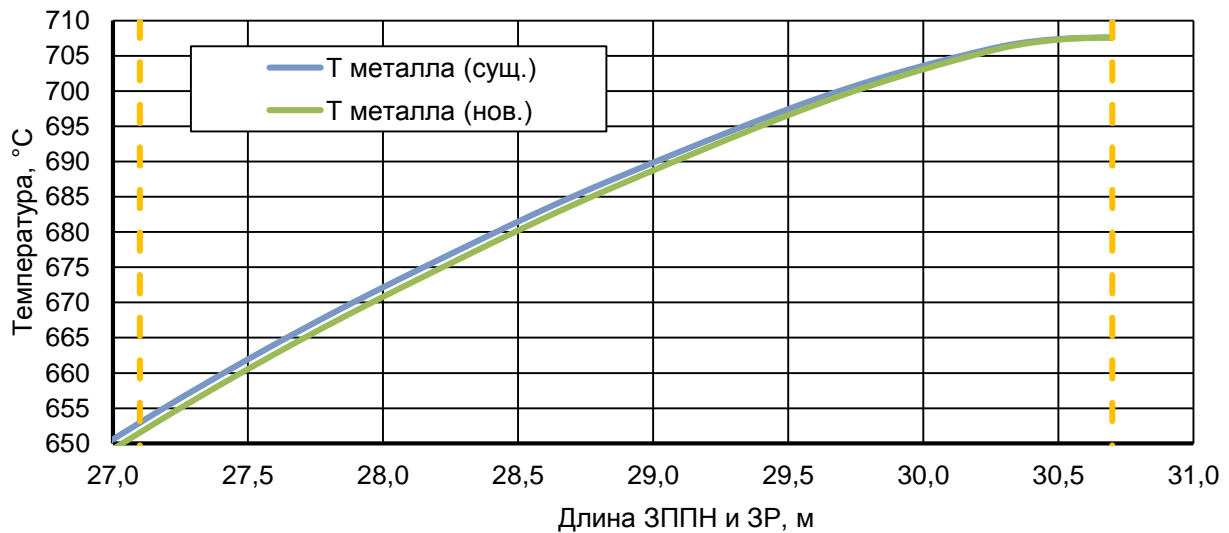


Рис. 9. Температуры металла для режима №1 (сущ.) и рационального режима (рац.)

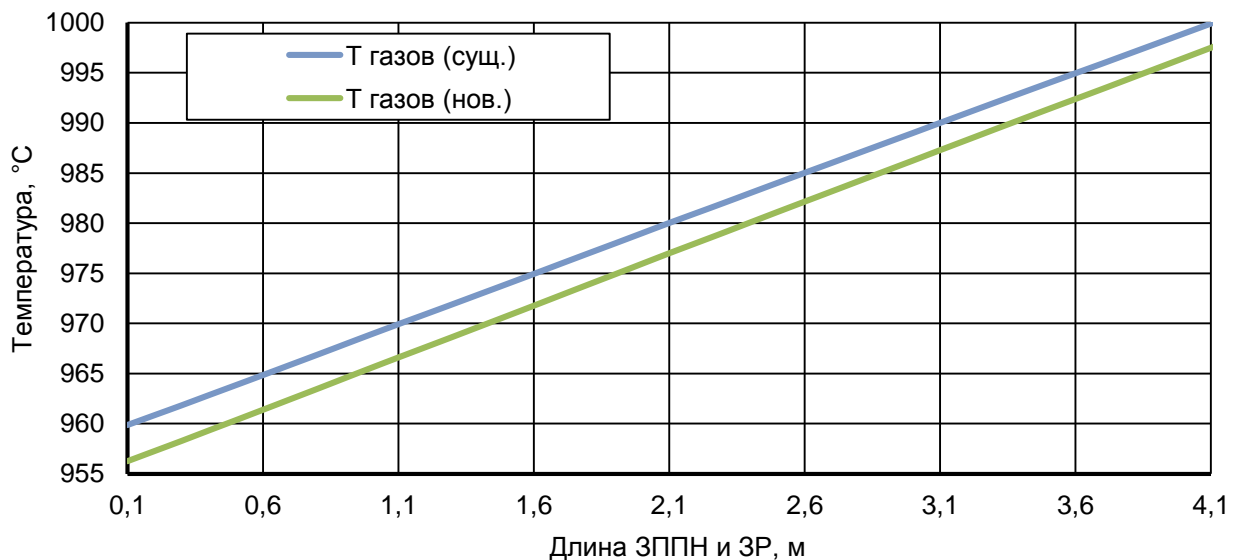


Рис. 10. Температуры газов для режима №1 (сущ.) и рационального режима (рац.)

Погорелочное регулирование по сравнению с зонным предпочтительнее ввиду следующих недостатков последнего: снижение среднего температурного напора по длине печи; снижение суммарного теплового потока, расходуемого на нагрев прокатной полосы; и, как следствие, повышение расхода природного газа на нагрев прокатной полосы.

Во время реализации погорелочного регулирования в режиме №1 расходы природного газа и воздуха были перераспределены максимально возможным образом в конец печной части АНГЦ (рис. 7). При снижении расхода природного газа на 6,866 м³/ч (рис. 7) температура металла на выходе из ЗППН-4 не изменилась (рис. 9), а температура дымовых газов на выходе из ЗР снизилась с 959,9 до 956,3 °С (рис. 10).

На основании комплексной тепловой модели были разработаны 23 рациональных режима нагрева стальной полосы в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования, которые повышают эффективный КПД печной части на 0,75 %. Годовой технико-экономический эффект для всех режимов работы агрегата составляет 72,04 тыс. м³ природного газа, годовой экономический эффект – 504,3 тыс. руб.

Выводы. Методом математического моделирования решена актуальная задача поиска рациональных режимов нагрева стальной полосы в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования, обеспечивающих заданное качество металла.

На основе разработанных 23 рациональных режимов нагрева были проведены опытно-промышленные испытания на металлургическом предприятии в условиях промышленного производства. Фактические результаты опытно-промышленных испытаний совпадают с расчётными результатами комплексной тепловой модели.

В целях рационализации режимов нагрева и снижения затрат природного газа рекомендуется переход от зонного регулирования к погорелочному с адаптацией режимов в зависимости от обрабатываемого сортамента.

Список литературы

1. **Анников М.В., Киринов А.Ю., Губарев В.Я.** Анализ теплового баланса камеры безокислительного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования // Сборник материалов областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук. – Липецк, 2020. – С. 20–23.
2. **Annikov M.V., Kirin A.Yu., Gubarev V.Y.** Investigation of the influence of the flow turbulence system on the heat transfer in the recuperator tube // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – Lipetsk, 2021. – 4 s.
3. **Каюмова В.Э., Мухина Е.Ю.** Анализ математических моделей многозонных протяжных печей // Международный научный журнал «Символ науки». – 2016. – № 12-2. – С. 69–71.

4. **Губарев В.Я., Бавыкин М.А., Киринов А.Ю.** Изучение конвективного теплообмена в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования // Вестник МЭИ. – 2024. – № 6.

5. **Бавыкин М.А., Киринов А.Ю.** Определение коэффициентов теплоотдачи при взаимодействии потока газа с полосой в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования // Молодежная секция: материалы VIII Российской национальной конференции по теплообмену «РНКТ-8», 17–22 октября 2022 года. – М.: НИУ «МЭИ», 2022. – Т. 2. – С. 329–330.

6. **Бавыкин М.А., Губарев В.Я.** Исследование конвективного теплообмена в секции прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего оцинкования // Радиотехника, электротехника и энергетика: XXIX Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп., 16–18 марта 2023 г., Москва: тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2023. – С. 958.

7. **Губарев В.Я., Киринов А.Ю.** Моделирование тепловых процессов в зоне прямого пламенного нагрева агрегата непрерывного горячего цинкования // Вестник МЭИ. – 2025. – № 1.

8. **Равич М.Б.** Топливо и эффективность его использования. – М.: Наука, 1971.

9. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

10. **Рябчиков М.Ю., Самарина И.Г.** Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига // Новые материалы и технологии производства. – 2013. – № 1(73). – С. 43–49.

11. **Рябчиков М.Ю., Барков Д.С.-Х., Рябчикова Е.С.** Управление нагревом металла в методических печах с учетом распределения внешних тепловых потерь по длине печи // Металлообработка. – 2016. – № 6(96). – С. 38–47.

References

1. Annikov, M.V., Kirin, A.Yu., Gubarev, V.Ya. Analiz teplovogo balansa kamery bezokislitel'nogo nagreva agregata nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya [Analysis of the heat balance of the non-oxidizing chamber of a continuous hot-dip galvanizing unit]. *Sbornik materialov oblastnogo profil'nogo seminara «Shkola molodykh uchenykh» po problemam tekhnicheskikh nauk* [Proceeding of regional specialized seminar "School of Young Scientists" on problems of technical sciences]. Lipetsk, 2020, pp. 20–23.
2. Annikov, M.V., Kirin, A.Yu., Gubarev, V.Y. Investigation of the influence of the flow turbulence system on the heat transfer in the recuperator tube. *3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*. Lipetsk, 2021, 4 p.
3. Kayumova, V.E., Mukhina, E.Yu. Analiz matematicheskikh modeley mnogozonnykh protyazhnykh pechey [Analysis of mathematical models of multi-zone continuous furnaces]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Simvol nauki»*, 2016, no. 12-2, pp. 69–71.
4. Gubarev, V.Ya., Bavykin, M.A., Kirin, A.Yu. Izuchenie konvektivnogo teploobmena v zone pryamogo plamennogo nagreva agregata nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya [Study of convective heat transfer in the direct flame heating zone of a continuous hot-dip galvanizing unit]. *Vestnik MEI*, 2024, no. 6.

5. Bavykin, M.A., Kirin, A.Yu. Opredelenie koefitsientov teplootdachi pri vzaimodeystvii potoka gaza s polosoy v zone pryamogo plamennogo nagreva agregata nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya [Determination of heat transfer coefficients during the interaction of a gas flow with a strip in the direct flame heating zone of a continuous hot-dip galvanizing unit]. *Molodezhnaya sektsiya: Materialy VIII Rossiyskoy natsional'noy konferentsii po teploobmenu «RNKT-8», Moskva, 17–22 oktyabrya 2022 goda* [Youth Section: Proceedings of the VIII Russian National Conference on Heat Transfer “RNCT-8”, October 17–22, 2022]. Moscow: NIU «MEI», 2022, vol. 2, pp. 329–330.

6. Bavykin, M.A., Gubarev, V.Ya. Issledovanie konvektivnogo teploobmena v seksii pryamogo plamennogo nagreva agregata nepreryvnogo goryachego otsinkovaniya [Study of convective heat transfer in the direct flame heating section of a continuous hot-dip galvanizing unit]. *Tezisy dokladov XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika», Moskva, 16–18 marta 2023 g.* [Proceedings of the XXIX International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates “Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering”, Moscow, March 16–18, 2023]. Moscow: OOO «Tsentr poligraficheskikh uslug “Raduga”», 2023, p. 958.

7. Gubarev, V.Ya., Kirin, A.Yu. Modelirovanie teplovykh protsessov v zone pryamogo plamennogo nagreva agregata nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya [Modeling of thermal processes in the direct flame zone]. *Vestnik MEI*, 2025, no. 1.

8. Ravich, M.B. *Toplivo i effektivnost' ego ispol'zovaniya* [Fuel and its efficiency]. Moscow: Nauka, 1971.

9. Vargaftik, N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids]. Moscow: Nauka, 1972. 720 p.

10. Ryabchikov, M.Yu., Samarina, I.G. Izuchenie rezhimov nagreva stal'noy polosy v protyazhnoy pechi bashennogo tipa dlya svetlogo otzhiga [Study of heating modes of steel strip in a tower-type draw furnace for bright annealing]. *Novye materialy i tekhnologii proizvodstva*, 2013, no. 1(73), pp. 43–49.

11. Ryabchikov, M.Yu., Barkov, D.S.-Kh., Ryabchikova, E.S. Upravlenie nagrevom metalla v metodicheskikh pechakh s uchetom raspredeleniya vneshnikh teplovykh poter' po dline pechi [Control of metal heating in continuous furnaces taking into account the distribution of external heat losses along the length of the furnace]. *Metalloobrabotka*, 2016, no. 6(96), pp. 38–47.