

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В МИКСЕРАХ ЛИТЕЙНОГО ОТДЕЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

Е.А. Мартусевич, *science.nvkz@yandex.ru*

И.А. Рыбенко, *rybenkoi@mail.ru*

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены особенности технологического процесса производства алюминиевых сплавов различных марок в электрических миксерах сопротивления в литейном отделении промышленного предприятия. Процесс получения алюминиевых сплавов с заданным химическим составом является сложным физико-химическим процессом, который включает последовательное смешивание алюминия-сырца, полученного методом электролиза, и его взаимодействие с различными лигатурами и флюсами. На этой стадии происходит формирование необходимого химического состава и качества алюминиевых сплавов посредством рафинирования и дегазации расплава. Этот этап производства связан с наличием избыточного количества корректирующих воздействий из-за многозадачности и многофакторности металлургического процесса, что приводит к увеличению времени приготовления расплава, снижению производительности электрического миксера сопротивления и повышению затрат на единицу готовой продукции. Совершенствование технологического процесса формирования алюминиевых сплавов связано с затратностью проведения экспериментальных исследований. В связи с этим важное значение приобретает математическое моделирование с применением программно-инструментальных систем, обеспечивающее высокое качество алюминиевых сплавов в результате прогнозирования конечных параметров химического состава. Поэтому в рамках интенсивной цифровой трансформации металлургической отрасли актуальна разработка и промышленное применение программных средств, позволяющих оптимизировать технологический процесс получения алюминиевых сплавов, снизив энергетические и материальные затраты, а также повысить производительность миксеров литейных отделений.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, ресурсосбережение, электрический миксер сопротивления, лигатуры, флюсы, математическая модель, оптимизация, программный комплекс

Для цитирования: Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. Совершенствование технологии получения алюминиевых сплавов в миксерах литейного отделения с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 31–37. DOI: 10.14529/met220404

Original article
DOI: 10.14529/met220404

IMPROVEMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGY ALUMINUM ALLOYS IN THE MIXERS OF THE CASTING COMPARTMENT USING SOFTWARE AND INSTRUMENT SYSTEM FOR MODELING AND OPTIMIZATION

E.A. Martusevich, *science.nvkz@yandex.ru*

I.A. Rybenko, *rybenkoi@mail.ru*

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The article discusses the features of the technological process for the production of aluminum alloys of various grades in electric resistance mixers in the foundry department of an industrial enterprise. The process of obtaining aluminum alloys with a given chemical composition is a complex physical and chemical process that includes sequential mixing of raw aluminum obtained by electrolysis and its interaction with various master alloys and fluxes. At this stage, the formation of the required chemical

composition and quality of aluminum alloys occurs through refining and degassing of the melt. This stage of production is associated with the presence of an excessive number of corrective actions due to the multi-tasking and multifactorial nature of the metallurgical process, which leads to an increase in the melt preparation time, a decrease in the productivity of the electric resistance mixer and an increase in the cost per unit of finished product. Improving the technological process of forming aluminum alloys is associated with the cost of conducting experimental studies. In this regard, mathematical modeling with the use of software and instrumental systems is of great importance, which ensures the high quality of aluminum alloys as a result of predicting the final parameters of the chemical composition. Therefore, within the framework of the intensive digital transformation of the metallurgical industry, the development and industrial application of software tools that allow optimizing the technological process of producing aluminum alloys, reducing energy and material costs, as well as increasing the productivity of foundry mixers is relevant.

Keywords: aluminum alloys, resource saving, electric resistance mixer, ligatures, fluxes, mathematical model, optimization, software package

For citation: Martusevich E.A., Rybenko I.A. Improvement of production technology aluminum alloys in the mixers of the casting compartment using software and instrument system for modeling and optimization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(4):31–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220404

Введение

В настоящее время одной из стратегически важных и ресурсоемких отраслей промышленности является цветная металлургия, в частности производство алюминиевых сплавов. Так, за 2021 год выпущено более 67 млн т первичного алюминия, а за последние десять лет в мире произведено более 1 млрд т различных алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы являются одними из основных конструкционных материалов, применяемых в промышленности, так как отличаются легкостью, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и обладают рядом других важных эксплуатационных свойств.

Существующую в настоящее время технологию промышленного производства алюминия можно разделить на четыре основных этапа: добыча полезных ископаемых (бокситов); переработка бокситов в сухой глинозём (получение оксида алюминия Al_2O_3); электролиз глинозёма и получение первичного алюминия-сырца; формирование заданной марки алюминиевого сплава в миксере литейного отделения путем смешивания алюминия-сырца и присадок лигатур и флюсов [1–3]. На всех этапах имеются свои технологические сложности в управлении, обусловленные особенностями промышленных агрегатов и материальными ограничениями.

Заключительной стадией процесса получения готовой алюминиевой продукции является приготовление сплава с заданным химическим составом в миксере литейного отделения. На рис. 1 представлена функциональная схема литейного отделения АО «РУСАЛ

Новокузнецк», отражающая основные технологические операции формирования алюминиевых сплавов в миксере.

Основная сложность получения алюминиевых сплавов заключается в постоянно изменяющихся параметрах и химическом составе первичного алюминия-сырца. В связи с этим получение алюминиевых сплавов не имеет единого сценария приготовления и требует поэтапного доведения формируемого алюминиевого расплава в миксере до заданного химического состава в условиях многочисленных ограничений [4].

Основные этапы формирования алюминиевого расплава в миксере

Согласно ТИ 451.02.03-2014 ред. 4 «Производство литейных сплавов», для того чтобы получить заданный химический состав алюминиевого расплава в электрическом миксере сопротивления, необходимо выполнить ряд технологических операций, связанных с порционным смешиванием алюминия-сырца, который имеет различный химический состав и температуру, включая последующую обработку расплава лигатурами и флюсами [5]. При этом технологическая инструкция не регламентирует процедуру выбора необходимых литейных ковшей с алюминием-сырцом для добавления в миксер. Выбор литейных ковшей осуществляется технологическим персоналом литейного отделения, в частности шихтовщиком, который выполняет поставленный заказ на основании собственных знаний и трудового опыта. В результате имеет место избыточное количество корректирующих

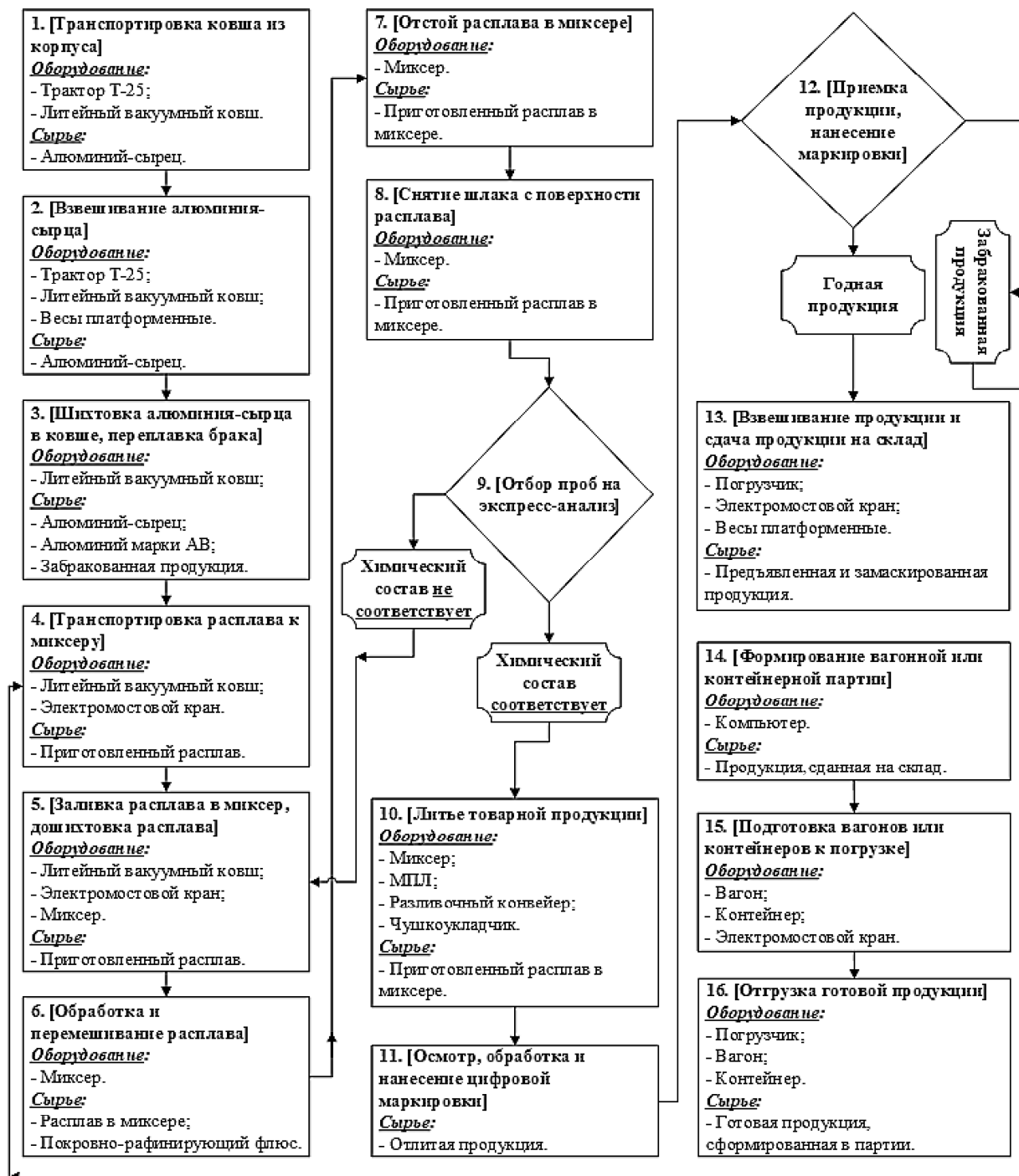


Рис. 1. Функциональная схема литейного отделения
Fig. 1. Functional diagram of the foundry department

воздействий из-за многозадачности и многофакторности процесса. Дозирование присадок лигатур и флюсов осуществляется вручную с помощью напольных весов, что также вносит дополнительную погрешность при приготовлении расплава. Поэтому результат напрямую зависит только от опыта технологического персонала, что приводит к увеличению времени приготовления расплава,

снижению производительности миксера и повышению затрат на единицу готовой продукции.

На рис. 2 представлен пример циклограммы процесса формирования алюминиевого сплава марки АЛ9М для электрического миксера емкостью 25 т. Среднее время приготовления сплава АЛ9М составляет 3–3,5 ч. При этом количество корректировок химиче-

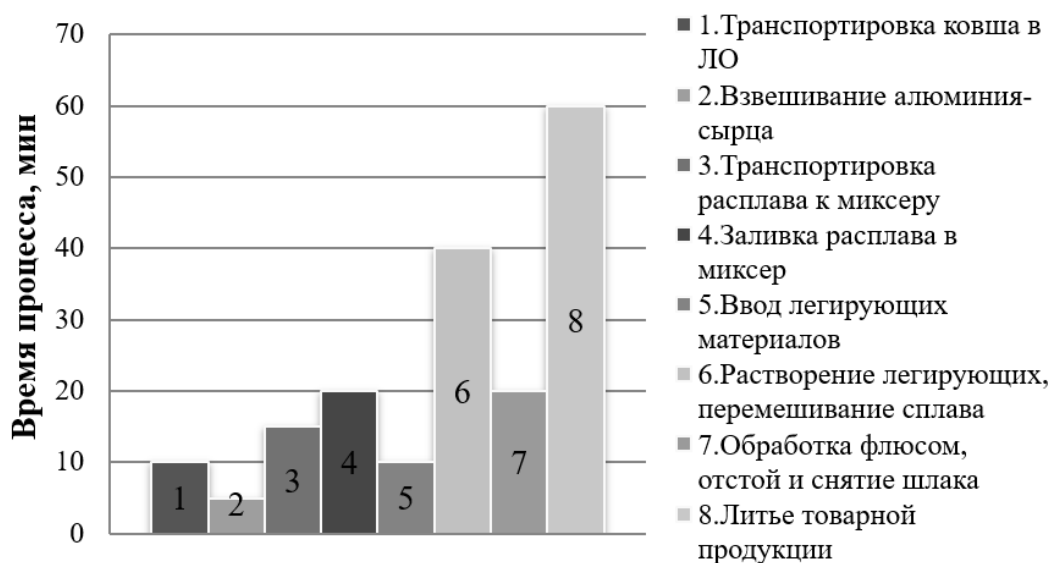


Рис. 2. Циклограмма процесса формирования сплава АЛ9М в миксере
Fig. 2. Cyclogram of the process of formation of AL9M alloy in a mixer

ского состава расплава на этапах 4 и 5 в худшем случае может достигать 4 раз.

Обзор литературных данных показал, что в настоящее время разработаны и программно реализованы только математические модели процесса получения первичного алюминия в электролизерах. Программных продуктов, связанных с моделированием технологических этапов получения алюминиевых расплавов в миксерах, на сегодняшний день не существует, в то время как именно этот этап определяет качество готовой продукции.

В настоящее время на предприятиях одного из наиболее крупных представителей алюминиевого производства, а именно компании «РУСАЛ», существует адаптированный набор взаимосвязанных информационных программ, в частности АРМ «Весовщик», АРМ «Шихтовщик», АРМ «Литейщик», АРМ «Резчик», АРМ «Технический контроль», который помогает технологическому персоналу осуществлять приготовление алюминиевых сплавов. Однако расчет параметров смешивания алюминия сырца, добавок лигатур и флюсов фактически осуществляется вручную на основе технологических инструкций, а также имеющихся знаний и трудового опыта шихтовщика.

Действующий вариант системы, в частности автоматизированное рабочее место сотрудника АРМ «Шихтовщик», на основе балансовых расчетов позволяет спрогнозировать лишь конечный химический состав формируемого расплава в миксере с учетом выбран-

ного шихтовщиком литейного ковша с алюминием-сырцом, но при этом не обеспечивает непрерывный мониторинг и моделирование процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, а также не предлагает оптимальный вариант шихтовки расплава с учетом исходного набора материалов и имеющихся ограничений.

В связи с этим актуальной задачей является разработка математической модели и ее программная реализация в виде программного комплекса, предназначенного для определения оптимальных технологических режимов процесса формирования алюминиевых сплавов в миксере в режиме интеллектуального помощника.

Инструменты для решения металлургической задачи

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель технологического процесса формирования алюминиевого расплава в миксере, позволяющая рассчитывать параметры смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере с учетом присадок лигатур и флюсов. Математическая модель включает в себя уравнения диффузии, материального и теплового балансов, динамические уравнения скоростей изменения масс и химического состава расплава при смешивании алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере, что позволяет определить необходимое количество алюминия-сырца из литейных ковшей с учетом расходов лигатур

и флюсов для формирования расплава с заданной массой, химическим составом и температурой.

Также разработан численный метод решения уравнения диффузии, отличающийся учетом распределения коэффициента диффузии компонентов формируемого расплава по объему миксера в диапазоне изменения значений при молекулярной и турбулентной диффузии под воздействием сил перемешивания различной степени интенсивности, что позволяет наиболее точно оценить время усреднения концентраций компонентов алюминиевого расплава в миксере.

Для определения оптимальных условий реализации процесса формирования алюминиевого расплава в миксере была поставлена и решена задача оптимизации, заключающаяся в минимизации затрат на получение необходимого количества алюминиевого расплава с заданным химическим составом и температурой при ограничениях на параметры входных-выходных потоков и технологические параметры. В связи с тем, что решение оптимизационной задачи невозможно получить формальными методами условной оптимизации из-за постоянно меняющихся начальных условий, для поиска решения предложен метод динамического программирования с использованием симплекс-метода ли-

нейного программирования. Разработан алгоритм решения задачи оптимизации расходов алюминия-сырца из литейных ковшей, а также лигатур и флюсов для получения алюминиевого расплава с заданной массой, химическим составом и температурой.

Математическая модель и метод расчета оптимальных параметров смешивания алюминия-сырца из литейных ковшей в миксере реализованы в программном комплексе «Алюминщик», который разработан с использованием высокоуровневого языка программирования C# и предназначен для исследований и оптимизации технологического процесса, проведения вычислительных экспериментов и обучения технологического персонала. Программный комплекс «Алюминщик» разработан в виде блоков, позволяющих в интерактивном режиме вводить исходные данные по расходам, температуре, химическому составу исходных материалов и технологическим параметрам процесса, рассчитывать материальный и тепловой балансы, параметры перемешивания металла в миксере и определять оптимальные условия реализации процесса. Интерфейс программы представлен на рис. 3.

Исследования, проведенные с использованием разработанных инструментов, показали, что рассчитанные с использованием про-

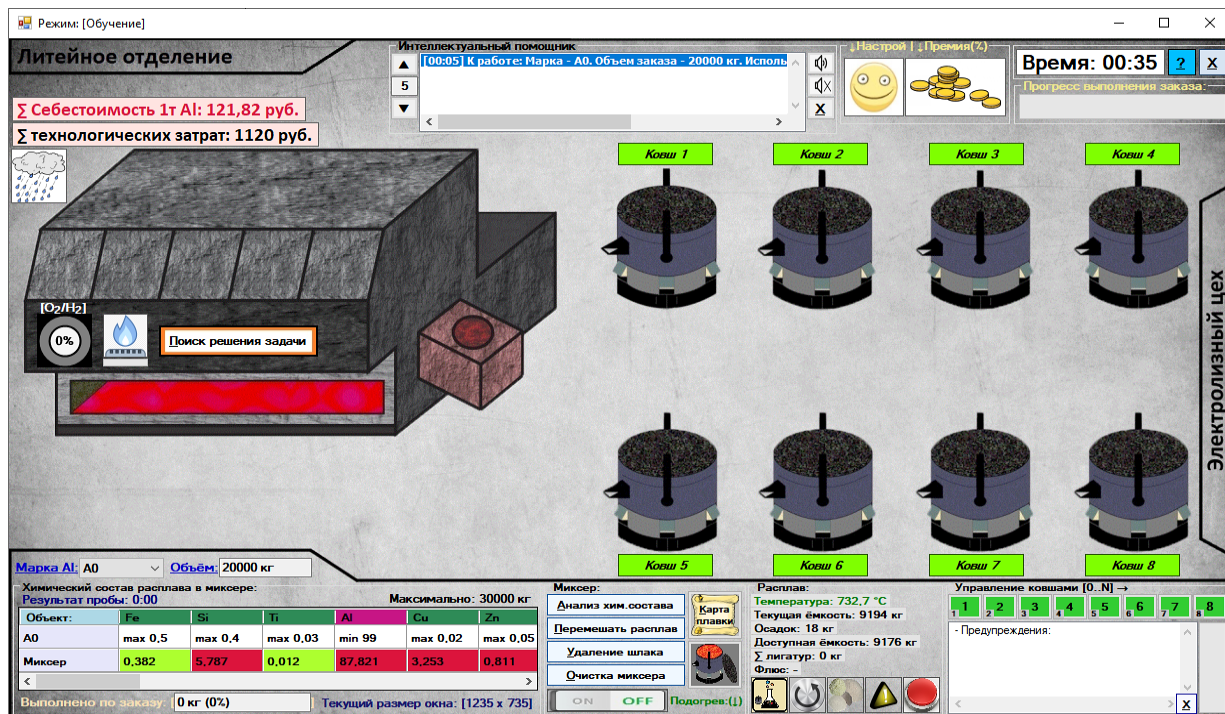


Рис. 3. Интерфейс программного комплекса «Алюминщик»
Fig. 3. Interface of the program complex "Аlyuminschchik"

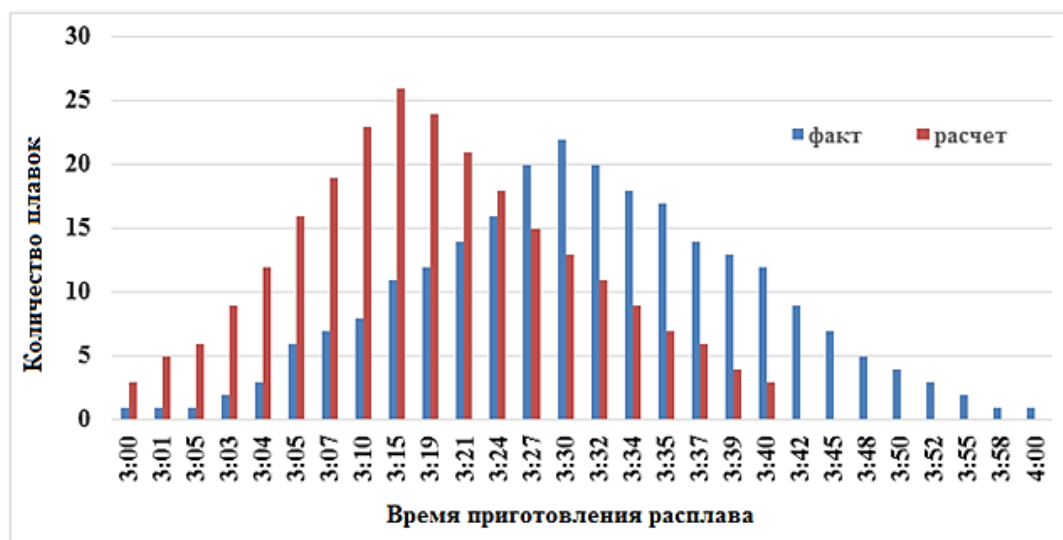


Рис. 4. Гистограмма распределения фактического и расчетного времени на реализацию технологической операции по результатам 250 плавков
Fig. 4. Distribution histogram of actual and estimated time for the implementation of a technological operation based on the results of 250 heats

граммного комплекса «Алюминщик» оптимальные режимы обеспечивают не только попадание в заданную марку, но и приводят к снижению затрат на единицу продукции. Также за счет уменьшения времени на корректирующие операции сокращается общая продолжительность технологического этапа формирования алюминиевого сплава в электрическом миксере сопротивления, в результате чего повышается производительность агрегата и всего литейного отделения.

Для анализа продолжительности процесса формирования алюминиевого расплава в миксере были использованы данные 250 плавков, реализованных на предприятии АО «РУСАЛ Новокузнецк», на основании которых были проведены расчеты оптимальных режимов с использованием программного комплекса «Алюминщик». На рис. 4 представлена гистограмма распределения фактического и расчетного времени на реализацию технологической операции для этих данных. Из рис. 4 следует, что оптимизация технологических

режимов процесса формирования алюминиевого сплава в миксере позволит сократить время на реализацию технологической операции примерно на 15 мин и повысить производительность литейного отделения с 39 360 до 44 936 т/год [6].

Заключение

Разработанные математические модели и метод оптимизации позволяют разрабатывать новые и совершенствовать существующие технологии производства алюминиевых сплавов в электрических миксерах сопротивления, обеспечивающие ресурсо- и энергосбережение, повышение производительности и качества алюминиевой металлопродукции. Программный комплекс «Алюминщик» предназначен для использования в качестве интеллектуального помощника технологического персонала, повышения квалификации работников алюминиевой промышленности, а также обучения студентов вузов и техникумов.

Список литературы

1. Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я. *Металлургия алюминия: мировое и отечественное производство: оценка, тенденции, прогнозы.* М.: Флинта, 2004. 278 с.
2. Янко Э.А. *Производство алюминия.* СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 305 с.
3. Горенский Б.М., Кирякова О.В., Лапина Л.А. *Информационные технологии в управлении технологическими процессами цветной металлургии.* Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. 148 с.
4. Степанов В.С. *Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ.* Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 380 с.

5. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. М.: Наука, 1971. 266 с.
6. Численный метод расчета параметров смешивания алюминия-сырца в миксере литейного отделения / С.Н. Калашников, Е.А. Мартусевич, Е.В. Мартусевич, В.Н. Буинцев // XII Международная научно-практическая конференция «Информация и образование: границы коммуникаций» INFO'20. 2020. С. 123–126.

References

1. Galevskiy G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya. *Metallurgiya alyuminiya: mirovoye i otechestvennoye proizvodstvo: otsenka, tendentsii, prognozy* [Aluminum metallurgy: world and domestic production: assessment, trends, forecasts]. Moscow: Flinta Publ.; 2004. 278 p. (In Russ.)
2. Yanko E.A. *Proizvodstvo alyuminiya* [Aluminum production]. St. Petersburg: St. Petersburg University Publ.; 2007. 305 p. (In Russ.)
3. Gorenskiy B.M., Kiryakova O.V., Lapina L.A. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii tekhnologicheskimi protsessami tsvetnoy metallurgii* [Information technologies in the management of technological processes in non-ferrous metallurgy]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ.; 2012. 148 p. (In Russ.)
4. Stepanov V.S. *Termodinamicheskiye issledovaniya metallurgicheskikh protsessov: energeticheskiye balansy, eksergeticheskiy analiz* [Thermodynamic studies of metallurgical processes: energy balances, exergy analysis]. Irkutsk: IrSTU Publ.; 2006. 380 p. (In Russ.)
5. Tikhonov V.N. *Analiticheskaya khimiya alyuminiya* [Analytical chemistry of aluminum]. Moscow: Nauka Publ.; 1971. 266 p. (In Russ.)
6. Kalashnikov S.N., Martusevich E.A., Martusevich E.V., Buintsev V.N. [Numerical method for calculating the mixing parameters of raw aluminum in a foundry mixer]. In: *XII International scientific-practical conference "Information and education: the boundaries of communication" INFO'20*. 2020. P. 123–126. (In Russ.)

Информация об авторах

Мартусевич Ефим Александрович, старший преподаватель кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; science.nvkz@yandex.ru.

Рыбенко Инна Анатольевна, д-р техн. наук, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия; rybenkoi@mail.ru.

Information about the authors

Efim A. Martusevich, Senior Lecturer of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; science.nvkz@yandex.ru.

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia; rybenkoi@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 01.08.2022

The article was submitted 01.08.2022