

Осколков Василий Михайлович

Аспирант,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: vm.oskolkov@outlook.com

Oskolkov Vasilii Mikhailovich

Post-graduate student,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: vm.oskolkov@outlook.com

Петрова Татьяна Олеговна

Кандидат физико-математических наук,
доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: to_87@bk.ru

Petrova Tatyana Olegovna

PhD in Physico-Mathematical Sciences,
Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: to_87@bk.ru

Варфоломеев Игорь Андреевич

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: igor.varf@gmail.com

Varfolomeyev Igor Andreyevich

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: igor.varf@gmail.com

Виноградова Людмила Николаевна

Кандидат технических наук, доцент,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: lnvinogradova@bk.ru

Vinogradova Lyudmila Nikolayevna

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: lnvinogradova@bk.ru

Ершов Евгений Валентинович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: ershov_ev@mail.ru

Ershov Evgeniy Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: ershov_ev@mail.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИ СУШКИ
ПОЛОСЫ С ПОЛИМЕРНЫМ
ПОКРЫТИЕМ**

**MATHEMATICAL
AND ALGORITHMIC SUPPORT
OF A MODEL OF DRYING A BAND
WITH POLYMERIC COATING**

Аннотация. Предложена математическая модель процесса производства оцинкованного проката с полимерным покрытием. Данная модель позволяет произвести моделирование обработки оцинкованной полосы с заданными установками агрегата для получения инфор-

Abstract. A mathematical model of the process of the production of a galvanized band with polymer coating is proposed. This model allows you to do modeling of galvanized strip processing with selected unit settings in order to get the information about strip heating and its in-

мации о нагреве полосы, ее попадании в требуемый температурный режим, оценки состояния взрывоопасности. Выполнена параметрическая адаптация модели.

Ключевые слова: предварительно окрашенный прокат, математическое моделирование, прогнозирование цветового отклонения, автоматическое управление агрегатом нанесения полимерного покрытия

gress into necessary temperature mode, to assess the risk of explosion. The parametric adaptation of the model is performed.

Keywords: coil-coating rolling, mathematical modeling, prediction color definition, automatic control of coil coating line

Введение

Холоднокатаный прокат с полимерным покрытием является одним из самых высоко маржинальных видов металлургической продукции [3]. Из-за высокой конкуренции металлургические компании ищут различные пути повышения качества продукции и снижения издержек. Одной из тенденций является широкое внедрение и использование систем поддержки принятия решений. В основе данных систем лежат методы математического моделирования, позволяющие оптимизировать параметры технологических процессов и совершенствовать алгоритмы управления агрегатами, что обеспечит увеличение производительности, сокращение затрат, предупреждение опасных ситуаций.

При производстве проката с полимерным покрытием математическая модель должна учитывать температурный режим сушки покрытия, который обеспечит температуру полимеризации лакокрасочного материала (ЛКМ), скорость обработки и безопасную концентрацию растворителя внутри печных зон.

Основная часть

Для определения параметров математической модели представим процесс сушки полосы с полимерным покрытием в виде «черного ящика» (рис. 1). Разработка математической модели начинается с определения входных и выходных параметров.

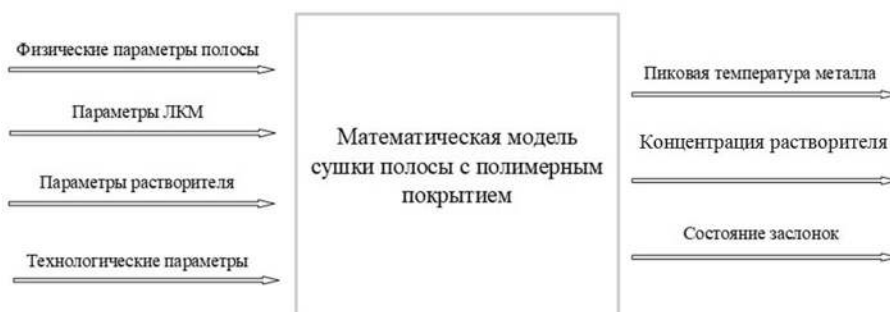


Рис. 1. Входные/выходные параметры математической модели, представленной в виде «черного ящика»

Входные параметры модели составляют внешние воздействия. К физическим параметрам полосы относятся: ее материал, ширина, толщина. К основным параметрам

ЛКМ относятся: используемые растворители и их доли, вес доли твердых частиц, удельный вес мокрого лака, температура полимеризации. Параметры растворителя определяются температурой самовоспламенения, нижним пределом взрывоопасности, температурой кипения, удельной теплотой сгорания. Технологическими параметрами агрегата являются: заданные значения температур в печных зонах для печей грунтовочного и отделочного слоя, скорость прохождения полосы через агрегат.

Выходы модели отражают ее целевое предназначение. Температура полимеризации представляет собой значение пиковой температуры металла. Концентрация растворителя в воздушно-газовой смеси каждой из печных зон моделируется для оценки взрывоопасности, определения положения заслонок и требуемой мощности вентиляторов отвода воздуха, содержащего частицы растворителя.

Одним из важнейших рассчитываемых с помощью модели параметров является пиковая температура металла, которая определяется максимальным значением температуры полосы в печи сушки. Для расчета температуры полосы в каждой печной зоне необходимо рассчитать получаемое полосой количество теплоты.

В печах сушки ЛКМ различают два способа переноса тепла: конвекционный и лучистый. Конвекционный перенос тепла осуществляется за счет движения нагретого воздушного потока на нагреваемое изделие. Интенсивный теплообмен происходит на поверхности изделия. Температура изделия и ЛКМ повышается за счет получения тепловой энергии от воздуха. Количество теплоты в печной зоне, получаемой с помощью конвективного теплообмена, определяется выражением:

$$Q_k = (Tb - Tz)k, \quad (1)$$

где Q_k – количество теплоты, получаемое через конвективный теплообмен; Tb – температура полосы на входе в печную зону; Tz – температура в печной зоне; k – коэффициент конвективного теплообмена.

Лучистый теплообмен использует для передачи энергии ИК-лучи, которые в зависимости от свойств облучаемой поверхности могут поглощаться или отражаться. Воздействие ИК-лучей зависит от степени черноты (коэффициент излучения) тела, поглощающего тепло. Светлые гладкие поверхности отражают большую часть облучения, шероховатые и темные поверхности – поглощают. Неотраженная часть облучения преобразуется в тепло, за счет чего повышается температура полосы и ЛКМ. Преимуществом сушки ИК-облучением является возможность переноса большого количества энергии за очень короткий промежуток времени. Это позволяет быстрее подготовить сушилку к работе, быстрее нагреть окрашиваемые изделия, а также значительно сэкономить рабочие площади благодаря более короткому пути изделий в процессе сушки [2]. Количество теплоты в печной зоне, получаемой с помощью лучистого теплообмена:

$$Q_r = \left(\left(\left(\frac{Tb_{in}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right) 4,96\varepsilon \right) / (Tb_{in} - T), \quad (2)$$

где Q_r – количество теплоты, получаемое через лучистый теплообмен; Tb_{in} – температура полосы перед входом в печную зону; T – температура в печной зоне, 4,96 – приведенный коэффициент излучения, ε – степень черноты.

Общее количество теплоты, получаемое полосой, определяется суммой конвективного (1) и лучистого (2) теплообмена:

$$Q = Q_k + Q_r. \quad (3)$$

Мощность нагрева в печной зоне определяется выражением [5]:

$$P_z = K (Q_z F_l + C' B (Tb_{out} - Tb_{in}) + Q_l), \quad (4)$$

где K – коэффициент запаса мощности; Q_z – удельный тепловой поток печной зоны; F_l – воспринимающая тепло поверхность полосы; C' – удельная теплоемкость полосы; B – масса полосы; Tb_{in} – температура полосы перед входом в печную зону; Tb_{out} – температура полосы в конце печной зоны; Q_l – суммарные тепловые потери печной зоны.

Температура воздуха в печной зоне после отдачи тепла определяется выражением:

$$T_a = T - \frac{P_z}{\alpha_{к.м.}}, \quad (5)$$

где T – начальная температура в печной зоне; P_z – мощность нагрева печной зоны; $\alpha_{к.м.}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией от газовой среды к металлу.

Для расчета скорости испарения или летучести растворителя (масса испарившегося растворителя в единицу времени с единицы площади поверхности) используется уравнение Ленгмюра-Кнудсена [4]:

$$W = \frac{1}{s} \frac{\partial m}{\partial \tau} = kp \sqrt{\frac{M}{2\pi T}}, \quad (6)$$

где W – скорость испарения; m – масса испарившейся жидкости; τ – продолжительность испарения; s – поверхность испарения; p – давление пара жидкости; M – молекулярная масса; T – температура поверхности испарения; $0 < k < 1$ – поправочный коэффициент. Величина p определяется с помощью пьезодатчиков, T – определяется по модели, описанной в предыдущем разделе, M – представлена в сертификате партии ЛКМ, поправочный коэффициент k определяется на основе экспериментальных данных, полученных с газоанализаторов, с помощью метода наименьших квадратов.

На основе уравнения (6) получим массу испарившегося растворителя:

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = skp \sqrt{\frac{M}{2\pi T}}. \quad (7)$$

Зная плотность растворителя (ρ), получим объем испарившихся газов в единицу времени (8).

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} = \frac{\partial m}{\partial \tau} / \rho. \quad (8)$$

На основе уравнения (8) определяется общий объем испарившегося растворителя за время сушки полимерного покрытия на поверхности полосы (V).

Зная объем печи ($V_{\text{печи}}$), рассчитаем концентрацию газов по формуле

$$\eta = \frac{V}{V_{\text{печи}}}. \quad (9)$$

Полученное значение должно быть ниже заданного значения предельно допустимой концентрации, указанного в сертификате партии ЛКМ.

В связи со сложностью формализации технологического процесса, полученная модель не учитывает некоторые факторы, и полученные с помощью модели значения температур отличаются от реально требуемых на некоторые значения. С целью адаптации введены настроечные коэффициенты, для нахождения которых было решено использовать алгоритм COBYLA (Constrained optimization by linear approximation). Алгоритм COBYLA используется для решения различных оптимизационных задач: ограниченной оптимизации черного ящика и серого окна с неосуществимой начальной точкой [1], меметического имитационного отжига [6], определения условных нелинейных оптимальных возмущений [7], гидродинамической оптимизации UGEN [8].

Поиск коэффициентов является задачей поиска локального минимума функции оценки. В качестве критерия оценки для поиска локального минимума использовалось среднеквадратическое отклонение температуры полимеризации полосы (10) на полном наборе ретроспективных данных. Чем меньше значение оценки, тем ближе к оптимальным значения коэффициентов:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}, \quad (10)$$

где S – стандартное отклонение, n – объем выборки, T_i – i -й элемент (значение температуры полосы) выборки, $\bar{T}$ – среднее арифметическое выборки.

Полученные коэффициенты были использованы при тестировании модели на реальном наборе технологических данных. Адаптация модели позволила уменьшить среднеквадратическое значение стандартного отклонения пиковой температуры металла (ПТМ) с 58,6 до 8,3 °С.

Обобщенный алгоритм (рис. 2 а) модели сушки полосы с полимерным покрытием состоит из следующих этапов.

1. Расчет информации о покрытии: расчет общей массы растворителя в ЛКМ на каждой из сторон полосы на единицу площади, расчет сухого остатка по весу для

ЛКМ, расчет суммарной удельной теплоты сгорания, расчет предела взрывоопасности.

2. Моделирование процессов в печи сушки грунтовочного или отделочного слоя выполняется в соответствии с алгоритмом (рис. 2 б).

3. Расчет температуры в печах после выхода полосы из агрегата.

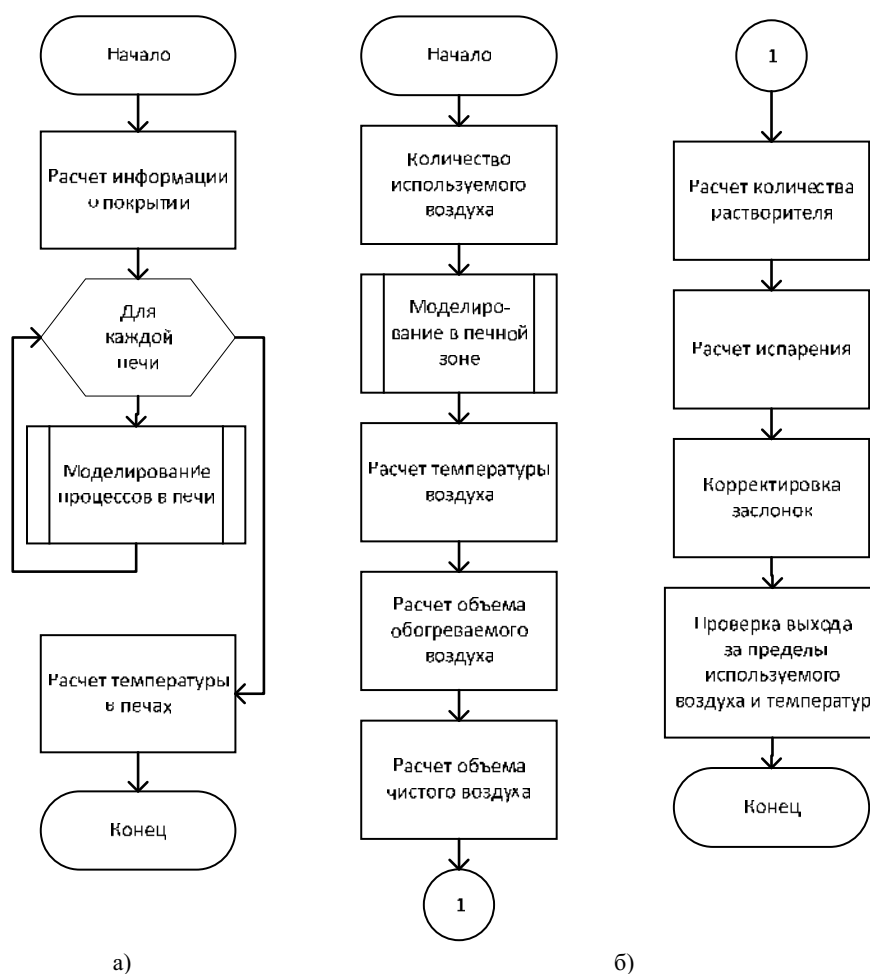


Рис. 2. Блок-схемы: а) обобщенный алгоритм математической модели; б) алгоритм моделирования процессов в печи

Алгоритм моделирования процессов в печи (рис. 2 б) состоит из следующих этапов:

1. Расчет используемого объема воздуха. Моделирование в печной зоне рассматривается далее (рис. 3 а).
2. Расчет температуры воздуха при проходе полосы.
3. Расчет объема нагреваемого воздуха.
4. Расчет объема чистого воздуха.

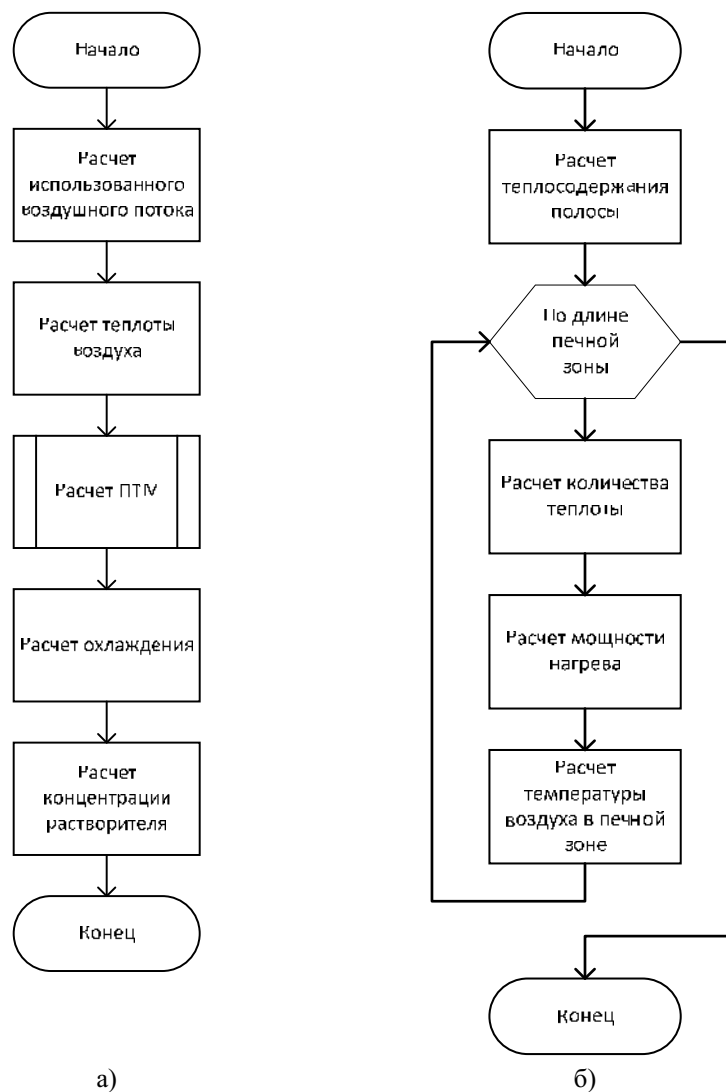


Рис. 3. Блок-схемы: а) алгоритма моделирования в печной зоне; б) расчета ПТВ

5. Расчет количества растворителя, проходящего через агрегат в единицу времени.
6. Расчет положения полного испарения растворителя. Выполнение проверки на наличие неиспарившегося растворителя к концу 4 зоны. В случае, если растворитель не испарился, выдается предупреждение.
7. Корректировка состояния заслонок в зависимости от концентрации растворителя в воздухе.
8. Проверка на превышение использования максимально возможного воздушного потока и проверка на попадание в температуру полимеризации. Если проверки не

будут пройдены, то обработка материала будет считаться выполненной с нарушением технологии, что является недопустимым.

Алгоритм моделирования в печной зоне (рис. 3 а) состоит из следующих этапов:

1. Расчет объема используемого воздуха печной зоной.
2. Расчет количества теплого воздуха в печной зоне после прохождения полосы и изменения ее температуры.

Расчет пиковой температуры металла и охлаждения рассматривается далее (рис. 3 б).

3. Расчет концентрации растворителя для оценки возможности взрывоопасности воздушно-газовой смеси (формулы 6–9).

Алгоритм расчета ПТМ (рис. 3 б) состоит из следующих этапов:

1. Расчет теплосодержания полосы.
2. Расчет количества теплоты, получаемого конвективным и лучистым теплообменом (1)–(3).
3. Расчет мощности нагрева (4).
4. Расчет температуры воздуха в печной зоне (5).

Выводы

Разработанная математическая модель и алгоритм сушки полимерного покрытия оцинкованной полосы реализованы программно.

Модель была адаптирована с помощью алгоритма COBYLA для описания работы агрегата полимерного покрытия. Программное обеспечение для адаптации модели было зарегистрировано в Роспатент, свидетельство № 2018617169 от 03.05.2018 «ПО параметрической идентификации модели сушки полимерного покрытия на основе алгоритма COBYLA». В результате тестирования алгоритмов было установлено, что среднеквадратическое отклонение пиковой температуры металла составляет 8,3 °С. Данное значение является приемлемым для использования.

Разработанная модель может быть применена для решения задачи повышения производительности агрегата путем увеличения скорости движения полосы. Модель позволит определить пиковую температуру металла в допустимом интервале для обеспечения качества лакокрасочного покрытия, обеспечит снижение уровня взрывоопасности в печных зонах.

Литература

1. Баджэдж И. Двухфазный алгоритм, основанный на доверительном управлении для ограниченной оптимизации черного ящика и серого окна с неосуществимой начальной точкой // Computers & Chemical Engineering. 2017. № 113.
2. Варфоломеев И. А. Метод и алгоритмы нейро-нечеткого управления многосвязными тепловыми объектами агрегата полимерных покрытий металла: дис. ... канд. техн. наук. Череповец: ЧГУ, 2013. 164 с.
3. Волкова А. В. Рынок плоского металлопроката. М.: Национальный исследовательский университет; Высшая школа экономики, 2016. 52 с.
4. Кинетика молекулярной адсорбции молекул из газовой среды на металлической поверхности. Методические разработки. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2004. 37 с.
5. Логачев М. В. Расчеты нагревательных устройств. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010. 131 с.

6. Люсера К. Меметический имитационный отжиг для приближения данных с использованием кривых локальной поддержки // *Procedia Computer Science*. 2017. №108. С. 1364–1373.
7. Оустервижек А. Бессопряженный метод определения условных нелинейных оптимальных возмущений // *Computers & Geosciences*. 2017. № 106. С. 190–199.
8. Рибейро э Силва С. Гидродинамическая оптимизация UGEN: преобразователь волновой энергии с U-образным внутренним колебательным водяным столбом // *International Journal of Marine Energy*. 2016. № 15. С. 112–126.

References

1. Bajaj I. A Trust Region-Based Two Phase Algorithm for Constrained Black-box and Grey-box Optimization with Infeasible Initial Point. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, vol. 113.
2. Varfolomeev I. A. *Metod i algoritmy neiro-nechetkogo upravleniya mnogovymennymi teplovymi objektami agregata polimernyh pokrytiy metalla* [The method and algorithms of neuro-fuzzy control of multivariable thermic objects of metal polymer-coating aggregate]. PhD dis. Cherepovets: Cherepovets State University, 2013.
3. Volkova A. V. *Rynok ploskogo metalloprokata* [The market of flat metal]. Moscow: Natsionalnyi issledovatel'skii universitet, vysshaia shkola ekonomiki, 2016. 52 p.
4. *Kinetika molekulyarnoj adsorbtsii molekul iz gazovoy sredy na metallicheskoj poverhnosti* [Kinetics of molecular adsorption of molecules from a gaseous medium on a metallic surface]. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University, 2004. 37 p.
5. Logachev M. V. *Raschety-nagrevatelnykh-ustroystv* [Heating device calculations]. Minsk: Belorusskiy natsionalnyi tekhnicheskiy universitet, 2010. 131 p.
6. Loucera C. Memetic Simulated Annealing for Data Approximation with Local-Support Curves. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 108, pp. 1364–1373.
7. Oosterwijk Aleid. An adjoint-free method to determine conditional nonlinear optimal perturbations. *Computers & Geosciences*, 2017, vol. 106, pp. 190–199.
8. S. Ribeiro e Silva. Hydrodynamic optimization of the UGEN: Wave energy converter with U-shaped interior oscillating water column. *International Journal of Marine Energy*, 2016, vol. 15, pp. 112–126.

Для цитирования: Осколков В. М., Петрова Т. О., Варфоломеев И. А., Виноградова Л. Н., Ершов Е. В. Математическое и алгоритмическое обеспечение модели сушки полосы с полимерным покрытием // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №6 (87). С. 19–27. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-6-87-2

For citation: Oskolkov V. M., Petrova T. O., Varfolomeyev I. A., Vinogradova L. N., Ershov E. V. Mathematical and algorithmic support of a model of drying a band with polymeric coating. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 6 (87), pp. 19–27. DOI: 10.23859/1994-0637-2018-6-87-2