

# ВЕСТНИК

**Липецкого государственного технического университета**  
(Вестник ЛГТУ)

№ 2 (40). 2019 г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

---

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-57003.  
Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор) 25.02.2014г.

ISSN 2304-9235

# ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета  
(Вестник ЛГТУ)

№ 2 (40). 2019 г.

Научно-технический журнал

Регистрационный номер ПИ № ФС77-57003

**Главный редактор**

д-р техн. наук, проф.

**Шмырин Анатолий Михайлович**

**Зам. главного редактора**

д-р техн. наук, проф.

**Володин Игорь Михайлович**

Редакционная коллегия:

**Информатика, вычислительная техника и управление**

д-р техн. наук, проф. Погодаев А.К. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Сараев П.В. (Россия)

д-р физ.-мат. наук, проф. Блюмин С.Л. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Кудинов Ю.И. (Россия)

д-р физ.-мат. наук, проф. Пеньков В.Б. (Россия)

**Металлургия**

д-р техн. наук, проф. Кнапински М. (Польша)

д-р техн. наук, проф. Коршиков В.Д. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Михайлов Е. (Болгария)

д-р техн. наук, проф. Найзабеков А.Б.  
(Казахстан)

д-р техн. наук, проф. Шкатов В.В. (Россия)

**Машиностроение**

д-р техн. наук, доц. Абмросимов С.К. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Козлов А.М. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Мазур И.П. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Сосенушкин Е.Н. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Хейфец М.Л. (Беларусь)

**Транспорт и логистика**

д-р техн. наук, проф. Корчагин В.А.  
(Россия)

д-р техн. наук, проф. Клявин В.Э. (Россия)

д-р техн. наук, проф. Ли Р.И. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ляпин С.А. (Россия)

д-р техн. наук, доц. Ризаева Ю.Н. (Россия)

*Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.*

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

---

Учредитель: © ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30. E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И  
УПРАВЛЕНИЕCOMPUTER SCIENCES,  
COMPUTER ENGINEERING AND  
CONTROL

СТР.

- |                       |   |  |  |
|-----------------------|---|--|--|
| 5                     | <b>Кузнецова Е.В., Хабибуллина Е.Л., Чалаури Я. К.</b><br>Решение задачи коммивояжера: сравнение классических и эвристических методов   | <b>Kuznetsova E.V., Khabibullina E.L., Chalauri Ya.K.</b><br>A solution of the traveling salesman problem: a comparison of classical and heuristic methods   |  |
| 10                    | <b>Кудинов Ю.И., Дуванов Е.С., Келина А.Ю., Гвозденко Н.П.</b><br>Разработка и исследование моделей управления тепловым режимом работы инкубационного шкафа   | <b>Kudinov Yu.I., Duvanov E.S., Kelina A.Yu., Gvozdenko N.P.</b><br>Development and research of models for controlling the incubation cabinet thermal mode   |  |
| 16                    | <b>Лубенец Ю.В.</b><br>Транспортные задачи с заявками в диапазоне значений  | <b>Lubenets Yu.V.</b><br>Transport tasks with requests in the range of values  |  |
| 21                    | <b>Седых И.А., Тимирязев А.В.</b><br>Использование байесовской нейронной сети как классификатора  | <b>Sedykh I.A., Timiryazev A.V.</b><br>An application of the Bayesian neural network as a classifier   |  |
| <b>МАШИНОСТРОЕНИЕ</b> |   | <b>MACHINE-BUILDING</b>  |  |
| 28                    | <b>Клевцов П.Н., Неверов В.В., Лебедев С.В.</b><br>Технологические особенности сварки труб и фасонных частей из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом   | <b>Klevtsov P.N., Neverov V.V., Lebedev S.V.</b><br>Technological features of welding pipes and fittings of high-strength cast iron with spherical graphite  |  |
| 33                    | <b>Жильцов А.П., Костров Ю.К., Курило П.В.</b><br>Оценка влияния условий нагружения на работоспособность элементов привода моталки полос на непрерывном травильном агрегате   | <b>Zhiltsov A. P., Kostrov Yu.K., Kurilo P.V.</b><br>Assessing the influence of loading conditions on the performance of the strip coiler drive elements on a continuous pickling unit   |  |
| 41                    | <b>Амбросимов С.К., Грибков Р.В.</b><br>Деформирующе-режущее протягивание со смещением режущих кромок относительно поверхности резания  | <b>Ambrosimov S.K., Gribkov R.V.</b><br>Deforming-cutting broaching with cutting edge displacement against the cutting surface   |  |
| 46                    | <b>Володин А.И., Пугачев И.А.</b><br>Применение компьютерного моделирования при разработке технологии термообработки высокомарганцовистых сталей аустенитного класса типа стали гадфильда на примере отливки «било шредера» | <b>Volodin A.I., Pugachev I.A.</b><br>The application of computer modeling for heat treatment technology development of high manganese austenite Gadfield type steels on the example of the <i>shredder plant hammer casting</i> |  |

## ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА

- 51 **Жилин И.В.**  
Имитационное моделирование функционирования автосервисного предприятия
- 58 **Гринченко А.В., Антонова Т.Р.**  
Моделирование городского автобусного маршрута в Anylogic
- 64 **Бутин А.В., Ковырялова О.А.**  
Новый полимерный композиционный наноматериал повышенной ударной прочности для восстановления деталей автотракторной техники
- 67 **Попов А.Т., Сулова О.А., Толчеев Ю.В., Катаев В. Ю.**  
Определение оптимального числа деления состава на части при расформировании состава на вытяжных путях методом осаживания с помощью динамического программирования

## МЕТАЛЛУРГИЯ

- 73 **Титов В.Н., Куприянова И.В., Кравченко Т.В.**  
О влиянии оксида марганца на свойства доменного шлака
- 76 **Слесарев М.Э., Жильцов А.П.**  
Анализ эксплуатационных показателей оборудования технологических зон установки непрерывной разливки стали
- 82 **Роготовский А.Н., Шипельников А.А., Скаков С.В., Глебов В.П., Тюленев Е.Н.**  
Особенности моделирования движения расплава в 50-тонном промежуточном ковше при использовании аргона
- 87 **Москалев Д.Н., Цыганов И.А.**  
Сравнение двух методик определения химического состава латунированной проволоки для производства металлокорда

## TRANSPORT AND LOGISTICS

- Zhilin I.V.**  
Simulation of car service station operation
- Grinchenko A.V., Antonova T.R.**  
Simulation of an urban bus route in Anylogic
- Butin A.V., Kovyryalova O. A.**  
A new polymer composite nanomaterial of increased impact strength for automotive part reconditioning
- Popov A.T., Suslova O. A., Tolcheev Yu.V., Kataev V.Yu.**  
Determining the optimum number of train division at train splitting on sorting tracks via backing on the basis of dynamic programming

## METALLURGY

- Titov V.N., Kupriyanova I.V., Kravchenko T.V.**  
On the influence of manganese oxide on blast furnace slag properties
- Slesarev M.E., Zhiltsov A.P.**  
A performance indicators analysis of continuous caster process zones
- Rogotovskiy A.N., Shipelnikov A.A., Skakov S.V., Glebov V.P., Tyulenev E.N.**  
Features for the computational modelling of melt movement in a 50-ton tundish with argon blowing
- Moskalyov D.N., Tsyganov I.A.**  
A comparison of two methods for determining the chemical composition of brass plated wire for metal cord production

УДК 519.854.2

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА: СРАВНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ  
И ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

Липецкий государственный технический университет

Е.В. Кузнецова, Е.Л. Хабибуллина, Я.К. Чалаури

Данная статья посвящена проблеме динамического построения маршрутного листа. Было предположено, рассмотрено и доказано, что можно и нужно использовать эвристические методы для построения маршрутного листа в режиме реального времени. Сначала были рассмотрены классические и эвристические методы решения транспортной задачи, затем выбраны лучшие из своего подвида, и проведено их сравнение друг с другом.

Согласно приказу Минтранса РФ от 18 сентября 2008 г. N 152 «Об утверждении обязательных реквизитов и порядка заполнения путевых листов» [1], сотрудник каждой фирмы, занимающейся перевозкой грузов, должен иметь при себе путевой лист во время доставки заказов. Путевой лист является очень важным документом для служебного транспорта. Если владельцем автомобиля является организация, данный документ подтверждает право управления, если автомобиль частный, но используется в рабочих целях, то с помощью данного документа производится расчет затрат. Проверяют путевые листы следующие службы: ФНС, ГИБДД и трудовая инспекция.

Чтобы минимизировать затраты на бензин и оплату труда, требуется перед транспортировкой составить путевой лист, опираясь на состояние дорог и пробок. В некоторых случаях (например, ремонт дорог, аварии и т.д.) возникает необходимость изменить задание водителю в режиме реального времени, что приводит к необходимости разработки приложения для обеспечения возможности во время доставки грузов изменять задания водителю. Всё это необходимо автоматизировать, применив математические методы, и разработав программу, которая сможет заполнять путевой лист.

Так как классические математические методы решения транспортных задач имеют ряд недостатков и ограничений на использование при расчётах в режиме реального времени, необходимо использовать эвристические алгоритмы. Учитывая недостатки существующих методов, было решено разработать метод построения путевого листа с использованием эвристических алгоритмов, позволяющий определить задание водителю, оптимальное по затратам на транспортировку, а также предоставить возможность скорректировать его в режиме реального времени при необходимости.

**Методы**

Перейдём к обзору методов решения транспортной задачи.

**Классические методы решения транспортной задачи.** Согласно [2], транспортная задача – это одна из задач линейного программирования, основной идеей которой является поиск оптимального разделения одинаковых или похожих предметов с минимальными затратами на перемещение. В статье [3] описаны следующие существующие виды транспортных задач:

– классическая транспортная задача, (транспортировка товара от поставщиков к заказчикам);

- задача коммивояжера (нахождение лучшего маршрута, который лежит через все требуемые точки и возвращается в место отправления);
- задача о назначениях (заключается в распределении работ таким образом, чтобы закончить работы с минимальными затратами).

Основные методы, с помощью которых решаются эти задачи: метод Фогеля, метод ветвей и границ, метод потенциалов.

Примеры применения данных методов рассмотрены в работах [4-7].

**Методы мягких вычислений - Soft Computing Methods (SCM) - и их применение в транспорте и логистике.** «Мягкие вычисления» – это неточные, приближённые методы решения задач, включающие в себя нечёткую логику, нейронные вычисления, генетические алгоритмы, вероятностный вывод с добавлением интеллектуального анализа данных и теории хаоса. В отличие от традиционных методов моделирования, Soft Computing Methods позволяют получить неполные или неточные результаты. Обзор методов мягких вычислений представлен в [8]. В [9] рассматривается применение данных методов в логистике. Рассматривается два вида алгоритмов подобного рода: генетические алгоритмы и метод муравьиных колоний.

Генетические алгоритмы – это семейство вычислительных алгоритмов поиска, вдохновленных процессами эволюции и используемых для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, подобных естественному отбору в природе. Обзор генетических алгоритмов представлен в [10]. Эти алгоритмы применяются для решения широкого круга задач, в том числе и в логистике. Например, в статье [11] описано применение генетического алгоритма для планирования расходов топлива.

Метод муравьиных колоний - Ant Colony Optimization(ACO) – один из эффективных алгоритмов для нахождения приближённых решений задачи коммивояжера, а также решения аналогичных задач поиска маршрутов на графах. В [12-13] подробно рассмотрена оптимизация с помощью этого метода. Метод муравьиных колоний – это метаэвристика, вдохновленная прокладкой феромонного следа и последующим поведением некоторых видов муравьев. Искусственные муравьи в ACO – это стохастические процедуры построения решений, которые строят потенциальные решения для рассматриваемого варианта задачи, используя (искусственную) информацию о феромонах, адаптированную на основе опыта поиска муравьев и, возможно, на основе доступной эвристической информации. С момента предложения Ant System, первого алгоритма ACO, было получено много значимых результатов исследований. Например, в [14] алгоритм оптимизации муравьиных колоний предложен для определения способа выделения рабочих мест и средств планирования с целью минимизации длительности обработки планов в гибкой производственной системе.

## **Результаты**

На первом этапе исследования проведено сравнение классических методов решения транспортных задач на основе реальных данных предприятия, расположенного в г. Липецк. Было принято решение построить оптимальный маршрут и провести расчеты каждым из следующих методов: метод Фогеля, метод ветвей и границ, метод потенциалов.

Постановка задачи. Имеется склад с товаром и 7 магазинов, в которые этот товар надо доставить. Адрес склада: 1 – ул. Юношеская, 8;. Адреса магазинов: 1 – ул. Филипченко 15; 2 – проспект Победы, 47; 3 – ул. Космонавтов, 9; 4 – ул. Космонавтов, 38; 5 – ул. Терешковой, 10/3; 6 – ул. Плеханова, 41; 7 – проспект Мира, 5(рис 1). Перед нами типичная задача коммивояжера.

Результаты расчета оптимального маршрута по каждому методу представлены в табл.

1.

**Результаты расчета оптимального маршрута**

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Метод построения маршрута | Длина маршрута, км |
| Метод Фогеля              | 40                 |
| Метод ветвей и границ     | 33.8               |
| Метод потенциалов         | 37.6               |

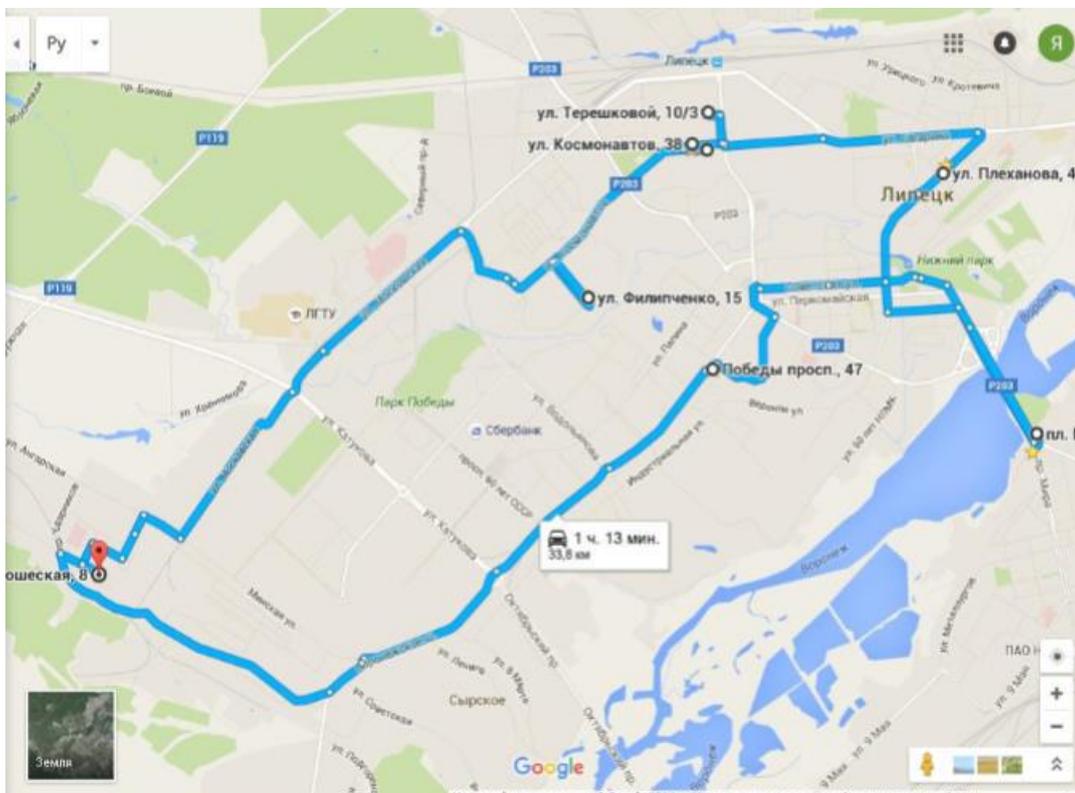


Рис. 1. Объекты предприятия на Google карте

Результаты сравнения методов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методов

| Методы                | Число итераций | Время решения | Длина маршрута | Время доставки товара |
|-----------------------|----------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Метод ветвей и границ | ☆☆☆            | ☆☆            | ☆☆☆            | ☆☆☆                   |
| Метод Фогеля          | ☆              | ☆☆☆           | ☆              | ☆                     |
| Метод потенциалов     | ☆☆             | ☆             | ☆☆             | ☆☆                    |

Трём звёздам соответствуют лучшие показатели, двум – средние, и одной – худшие. Следовательно из классических методов наиболее оптимальным является метод ветвей и границ. После проведения расчетов эвристическими методами был выбран генетический метод.

При применении генетического метода к транспортной задаче, в качестве родителей берутся маршруты от склада до каждого из магазинов, и маршруты от этих магазинов, до всех остальных магазинов. Между ними выбираются лучшие родители, и с помощью скрещивания определяется первый цикл потомства. Из него выбираются лучшие особи, и они становятся родителями для нового цикла. Так продолжается, пока весь маршрут не будет построен. Была написана программа, привязанная к google maps, вычисляющая кратчайший маршрут с помощью метода ветвей и границ и генетического метода.

С помощью программы сравним реальные маршруты и затраты фирмы на доставку заказов за период 17.04.17 – 21.04.17 и результаты, полученные посредством применения Метода ветвей и границ а также Генетического метода. Результаты расчетов представлены в табл. 3

Таблица 3

Сравнение статистики фирмы с расчётами программы

| Дата     | Статистика фирмы |            | Генетический метод |            | Метод ветвей и границ |            |
|----------|------------------|------------|--------------------|------------|-----------------------|------------|
|          | км               | затраты, р | км                 | затраты, р | км                    | затраты, р |
| 17.04.18 | 38               | 234        | 36                 | 221        | 34                    | 213        |
| 17.04.18 | 52               | 322        | 48                 | 299        | 46                    | 288        |
| 17.04.18 | 30               | 184        | 28                 | 172        | 23                    | 145        |
| 18.04.18 | 34               | 209        | 32                 | 199        | 31                    | 190        |
| 18.04.18 | 44               | 271        | 41                 | 252        | 39                    | 240        |
| 18.04.18 | 48               | 298        | 45                 | 277        | 45                    | 279        |
| 19.04.18 | 26               | 160        | 24                 | 150        | 23                    | 141        |
| 19.04.18 | 72               | 447        | 67                 | 412        | 64                    | 394        |
| 19.04.18 | 37               | 227        | 34                 | 209        | 34                    | 213        |
| 20.04.18 | 38               | 234        | 36                 | 221        | 34                    | 213        |
| 20.04.18 | 34               | 209        | 32                 | 199        | 31                    | 190        |
| 20.04.18 | 44               | 271        | 41                 | 252        | 39                    | 240        |
| 21.04.18 | 38               | 234        | 36                 | 221        | 34                    | 213        |
| 21.04.18 | 34               | 209        | 32                 | 199        | 31                    | 190        |
| 21.04.18 | 44               | 271        | 41                 | 252        | 39                    | 240        |
| Итоги    | 614              | 8984       | 575                | 7293       | 551                   | 6897       |

Как видно в последней строке, лучше всего себя показал метод ветвей и границ: общая протяженность пробега равна 551 км, затраты 6897. На втором месте генетический метод: пробег 575 км, затраты 7293. Способ, которым фирма выбирала маршрут на доставку своего товара: пробег 614 км, затраты 8984.

Таким образом, длина пробега, рассчитанная методом ветвей и границ почти на четверть меньше реального и всего на 6% лучше генетического метода.

Но так как метод ветвей и границ является полным перебором всех вариантов путей, то чем длиннее маршрут, тем больше шагов требуется для поиска решения. Поэтому при необходимости динамического решения задачи лучший вариант – генетический метод.

Проанализировав результаты применения двух методов, и составление маршрута с помощью карт google, которым пользуются в фирме, можно сделать вывод, что применение математических методов дает лучший результат. Таким образом за рассмотренный период

затраты на доставку товара фирмой «МегаТорг-Л» можно было сократить на 2087 рублей (24%). Внедрение данного метода в фирму позволит экономить 108 524 рублей в год.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Минтранса РФ от 18 сентября 2008 г. N 152"Об утверждении обязательных реквизитов и порядка заполнения путевых листов" [Текст: Электрон.]. URL: <http://base.garant.ru/194042/#ixzz5aP1XcXAo> (дата обращения 27.01.2019).
2. **Коннел, М.Д.** Основы современных алгоритмов / М.Д. Коннел. - Москва: Техносфера, 2014. - 360 с.
3. **Шувалов, В.П.** Классификация методов многопутевой маршрутизации / В.П. Шувалов, И.Ю. Вараксина // Т-СОММ: Телекоммуникации и транспорт. - 2014. - Т.8. - №1. - С. 29-32. – Текст : непосредственный.
4. **Уваров, Д.В.** Построение дерева кратчайших путей в графе на основе данных о парных переходах / Д.В. Уваров, А.И. Перепелкин, В.П. Корячко – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. - 2004. - Т. 16. - №4. - С. 93-96.
5. **Сорокин, А.А.** Применение графа видимости при решении задач поиска пути / А.А. Сорокин, К.Т. Чан, Т.Х.Ч. Во. – Текст : непосредственный // Успехи современной науки и образования. 2017. - Т 4. - №4. - С. 66-69.
6. **Курейчик, В.М.** Обзор состояния проблемной области по теме решение задачи коммивояжера / В.М. Курейчик, Ю.А. Логунова, А.С. Игнатьева – Текст : непосредственный // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. - 2017. - № 3 (31). - С. 39-59.
7. **Банина, Н.В.** Решение одной задачи оптимизации перевозки грузов железнодорожным транспортном как задачи о назначениях / Н.В. Банина, А.И. Ерофеева – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту. - 2016. - №2. - С. 8-12.
8. **Turunen, E.** Soft Computing Methods / E. Turunen, K. Raivio, T. Mantere Text : ... // Mathematical Modelling. - Springer, 2016. - P. 79-112.
9. Soft Computing Methods in Transport and Logistics / J. Brito, D. Castellanos-Nieves, A. Expósito, J.A. Moreno Text : ... // Soft Computing Based Optimization and Decision Models. Studies in Fuzziness and Soft Computing vol 360. – Springer, 2018. – P. 45-61.
10. **Haupt, R.L.** Practical genetic algorithms / R.L. Haupt, S.E. Haupt. – John Willey & Sons Inc., 2004. – 253 p. – Text : ...
11. Fuel optimization strategy for hydrogen fuel cell range extender vehicles applying genetic algorithms / R.Á. Fernández, S.C. Caraballo, F.B. Cilleruelo, J.A. Lozano Text : ... // Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81(P1). – Elsevier, 2018. – p. 655-668.
12. **Dorigo, M.** The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances / M. Dorigo, T. Stützle Text : ... // Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, vol 57. – Springer, 2003. – P. 252-285.
13. **Dorigo, M.** Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances / M. Dorigo, T. Stützle Text : ... // Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, vol 272. – Springer, 2019. – P. 311-351.
14. An integrated ant colony optimization algorithm to solve job allocating and tool scheduling problem / X. Zhang, S. Wang, L. Yi, L., [et al.] Text : ... // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 232. – 2018. – P. 172–182. doi:10.1177/0954405416636038.

Ключевые слова: транспортная задача, оптимизация, генетические алгоритмы.

Сведения об авторах:

Кузнецова Елена Васильевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики Липецкого государственного технического университета.

Хабибуллина Елена Леонидовна, старший преподаватель кафедры прикладной математики Липецкого государственного технического университета.

Чалаури Якоб Кобович, магистрант кафедры прикладной математики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: eva351@yandex.ru, e.shterenberg@gmail.com

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30

## **A SOLUTION OF THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM: A COMPARISON OF CLASSICAL AND HEURISTIC METHODS**

E.V. Kuznetsova, E.L. Khabibullina, Ya.K. Chalauri

This article is devoted to the problem of the dynamic construction of the route sheet. It was suggested, considered and proved that the application of heuristic methods to build a route sheet in real time yields the best results. First, classical and heuristic methods of solving the transport problem were considered, then the best of their subspecies were chosen, and then they were compared with each other.

Key words: transport problem, optimization, genetic algorithms.

УДК 681.5

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ИНКУБАЦИОННОГО ШКАФА**

Липецкий государственный технический университет

Ю.И. Кудинов, Е.С. Дуванов,  
А.Ю. Келина, Н.П. Гвозденко

В работе анализируется эффективность построенных в программном комплексе Matlab трех моделей регуляторов температуры инкубационного шкафа: нечеткого логического FLC, линейно-квадратического LQR и комбинированного нечеткого квадратического FQR.

Промышленное птицеводство в Российской Федерации является одной из ведущих специализированных отраслей в агропромышленном комплексе, которая направлена на производство продукции мяса птицы в значительных объемах и в сжатые сроки.

Инкубационный шкаф - аппарат для искусственного вывода молодняка сельскохозяйственной птицы из яиц. Поддержание необходимой температуры и влажности воздуха, воздухообмен и поворачивание яиц производятся автоматически. Инкубационные шкафы бывают кабинетные и шкафные.

В частности, наиболее распространенный в Российской Федерации шкафной инкубатор, произведенный компанией Pas Reform (Нидерланды), состоящий из нескольких модулей SmartSet 19. Общая вместимость инкубатора SmartSet 19 000 – 19 200 яиц. Инкубатории сооружаются в составе птицеводческих ферм, птицефабрик, племзаводов, инкубаторно-птицеводческих станций.

Параметры объекта управления определяют с помощью переходной характеристики, которую получают из разгонной характеристики при единичном ступенчатом воздействии. Для получения переходной характеристики в частном случае используют метод площадей Симою.

В настоящей работе предлагается исследовать и сравнить качество систем автоматического управления (САУ) с линейно–квадратическим регулятором (LQR, Linear Quadratic Regulator), нечетким логическим (FLC, Fuzzy Logic Controller) и комбинированным нечетким квадратическим (FQR, Fuzzy Quadratic Regulator) регуляторами, используя передаточную функцию объекта

$$W(s) = \frac{13}{406.96s^2 + 61.40s + 1}, \quad (1)$$

полученную в работе [1].

## 1. Постановка задачи LQ оптимизации и её классическое решение

В основу синтеза LQ регулятора, являющегося оптимальным регулятором, положен метод решения матричного уравнения Риккати. Пусть имеется линейный непрерывный объект, который можно описать векторно-матричным уравнением следующего вида:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (2)$$

где  $x \in R^n$  – вектор координат объекта,  $A \in R^{n \times n}$  – матрица параметров объекта,  $B \in R^{n \times m}$  – матрица управления,  $u \in R^m$  – вектор управления.

В случае, если непрерывный объект представлен системой матричных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{aligned} \quad (3)$$

то в уравнении  $y(t)$  матрица  $A$  – матрица системы,  $B$  – матрица входа,  $C$  – матрица управления и  $D$  – сквозная матрица.

Критерием оптимальности LQ управления является выражение

$$J(u(t)) = \min \int_0^{\infty} [x^T Qx + u^T Ru] dt, \quad (4)$$

где  $Q$  и  $R$  – симметричные положительные полуопределенные матрицы, использующие вектор состояния  $x$  и входной вектор  $u$ , соответственно.

В таком случае LQR – это алгоритм, минимизирующий критерий оптимальности (4) при наличии ограничения типа равенства - модели объекта (3). Тогда оптимальное управление можно задать в следующем виде:

$$u^*(t) = -K^* x(t),$$

где  $K^* = R^{-1} B^T S^*$ .

## 2. Построение модели САУ с LQ регулятором

Построим в MATLAB схему системы автоматического управления (САУ) (рис. 1), содержащую объект (State-Space), реализующий систему уравнений в пространстве состояний, и LQ регулятор.

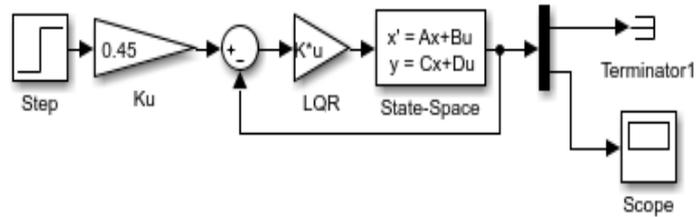


Рис. 1. Схема САУ с традиционным LQR регулятором

Объект управления, имеющий передаточную функцию (2), представлен в пространстве состояний моделью (4) и блоком **State-Space**, в котором матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  определяются функцией `tf2ss` в программе пр. 1, записанной в командной строке MATLAB. Кроме того, в программе пр. 1 предусматривается проверка управляемости и наблюдаемости функциями `ctrb` и `obsv` и определение в *LQR* регуляторе коэффициентов обратных связей  $K$  функцией `lqr`.

```

Пр. 1
num = [13]; den = [406.96 61.40 1];
% параметры ПФ объекта
G = tf(num, den) % получение ПФ
[A, B, C, D] = tf2ss(num, den)
% преобразование передаточной
% функции в матрицы
co = ctrb(A, B);
ob = obsv(A, C);
Controllability = rank(co)
Observability = rank(ob)
Q = diag([1, 1]);
R = 0.1 * diag([1]);
K = lqr(A, B, Q, R); % функция
% LQ регулятора

```

При нанесении ступенчатого возмущения в окне **Scope** получим на рис. 2 в виде сплошной линии - 1 график переходного процесса в САУ с традиционным *LQR* регулятором.

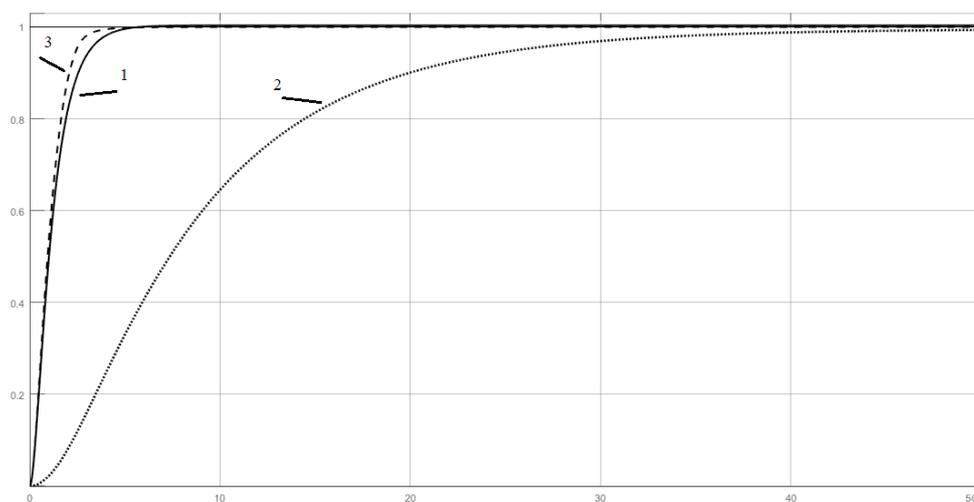


Рис. 2. Графики переходных процессов

### 3. Построение модели САУ с нечетким логическим регулятором FLC

Краткое описание используемого нечеткого регулятора FLC изображено на рис. 3. Нечеткий дискретный регулятор имеет два входа: ошибку регулирования  $e(k)$  и её изменение  $de(k) = e(k) - e(k - 1)$  и один выход - управление  $u(k)$  в моменты времени  $kdt$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , где  $dt$  - шаг дискретизации.

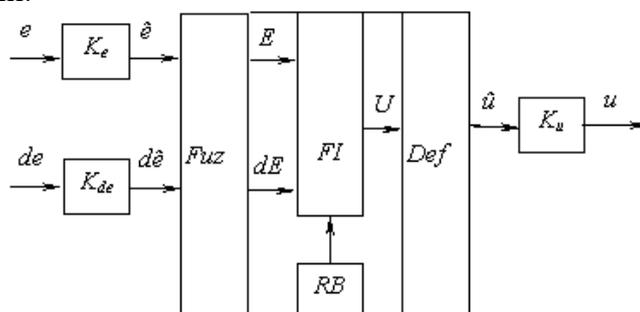


Рис. 3. Схема нечеткого регулятора FLC

Действительные значения входов  $e$ ,  $de$  с помощью нормализующих коэффициентов  $K_e$ ,  $K_{de}$  преобразуются в нормализованные  $\hat{e}$ ,  $\hat{de} \in [-1, 1]$ , после чего выполняются операции фазификации  $Fuz$ , нечеткого вывода  $FI$  и дефазификации  $Def$ .

Операция фазификации  $Fuz$  (*Fuzzification*) преобразует нормализованные входы  $\hat{e}$ ,  $\hat{de}$  в нечеткие  $E$ ,  $dE$ .

Нечеткий вывод  $FI$  (*Fuzzy Inference*) методом Мамдани (Mamdani), находит нечеткий выход  $dU$  на основании нечетких входов  $E$ ,  $dE$  и базы правил  $RB$  (*Rule Base*) вида

$$R_c^\theta : \text{если } \hat{e} \text{ есть } E^\theta, \hat{de} \text{ есть } dE^\theta, \text{ то } \hat{u} \text{ есть } dU^\theta, \theta = 1, 2, \dots, q, \quad (5)$$

где  $E^\theta$ ,  $dE^\theta$ ,  $dU^\theta$  - нечеткие множества, имеющие терм-множества  $T_e$ ,  $T_{de}$ ,  $T_{du}$  с элементами, характеризующими значения соответствующих переменных  $\hat{e}$ ,  $\hat{de}$ , ( $N$  – отрицательное,  $Z$  – нулевое,  $P$  – положительное) и  $d\hat{u}$  ( $NB$  – большое отрицательное,  $NM$  – среднее отрицательное,  $ZE$  – близкое к нулевому,  $PM$  – среднее положительное,  $PB$  – большое положительное).

Операция дефазификации выхода  $Def$  (*Defuzzification*) преобразует нечеткий выход  $U$ , например методом медианы (*Bisector*) или центра тяжести (*Centroid*), в нормализованное значение  $\hat{u} \in [L, -L]$ ,  $L = 1, 2$ , которое умножением на коэффициент  $K_{du}$  превращается в действительное  $u$ . Ниже на рис. 4 приводятся колоколообразные функции принадлежности (ФП) входных нечетких множеств  $N$ ,  $Z$ ,  $P$ , характеризующие нормированные значения ошибки  $\hat{e}$  и ее изменения  $\hat{de}$ , обозначенные в *MATLAB* как  $e1$  и  $de1$ .

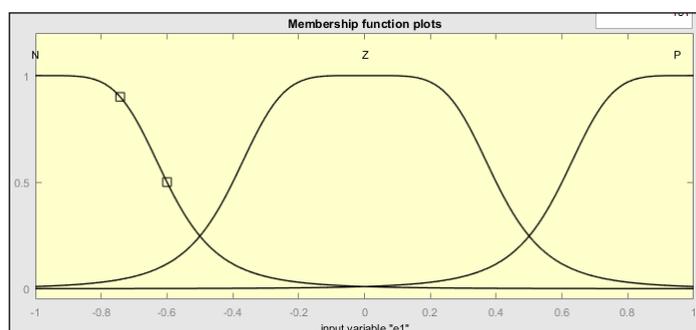


Рис. 4. Входные ФП для  $e1$  и  $de1$

Функции принадлежности выходных нечетких множеств (рис. 5)  $NB$ ,  $NM$ ,  $ZE$ ,  $PM$ ,  $PB$ , характеризующие нормированные значения управления  $d\hat{u}$ , обозначены в *MATLAB* как  $u1$ .

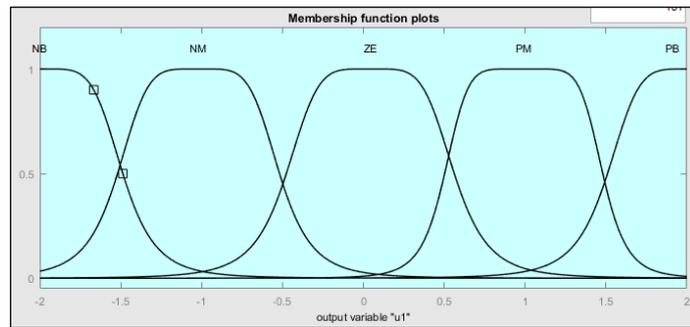


Рис. 5. Выходные ФП для  $u_1$

Ниже на рис. 6 приводятся нечеткие правила, реализованные в *MATLAB*.

```

1. If (e1 is N) and (de1 is N) then (u1 is NB) (1)
2. If (e1 is N) and (de1 is Z) then (u1 is NM) (1)
3. If (e1 is N) and (de1 is P) then (u1 is ZE) (1)
4. If (e1 is Z) and (de1 is N) then (u1 is NM) (1)
5. If (e1 is Z) and (de1 is Z) then (u1 is ZE) (1)
6. If (e1 is Z) and (de1 is P) then (u1 is PM) (1)
7. If (e1 is P) and (de1 is N) then (u1 is ZE) (1)
8. If (e1 is P) and (de1 is Z) then (u1 is PM) (1)
9. If (e1 is P) and (de1 is P) then (u1 is PB) (1)

```

Рис. 6. Нечеткие правила

Схема модели САУ с нечетким логическим регулятором *FLC* изображена на рис. 7.

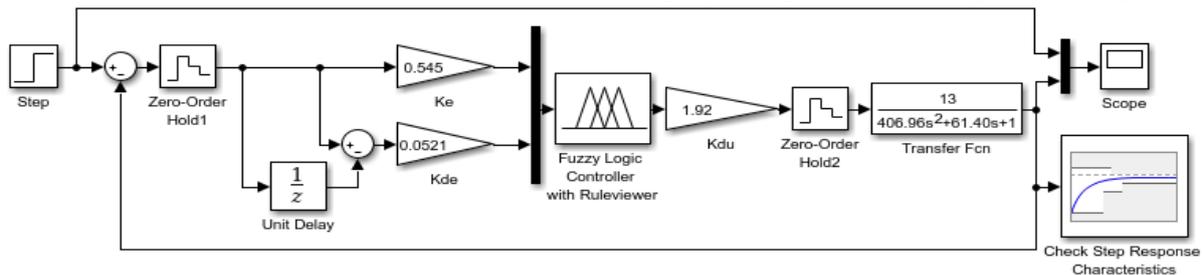


Рис. 7. Схема САУ с нечетким логическим регулятором *FLC*

Оптимизатором - блоком Check Step Response Characteristics определяется такое значение коэффициентов  $K_e$ ,  $K_{de}$ ,  $K_{du}$  при котором в системе будет получен оптимальный переходный процесс, удовлетворяющий следующим ограничениям: отсутствию перерегулирования и статической ошибки. При нанесении ступенчатого возмущения в схеме на рис. 7 был получен график переходного процесса, показанный короткой пунктирной линией 2 на рис. 2.

#### 4. Описание модели САУ с комбинированным нечетким регулятором *FQR*

Схема модели САУ с комбинированным нечетким регулятором *FQR* изображена на рис. 8.

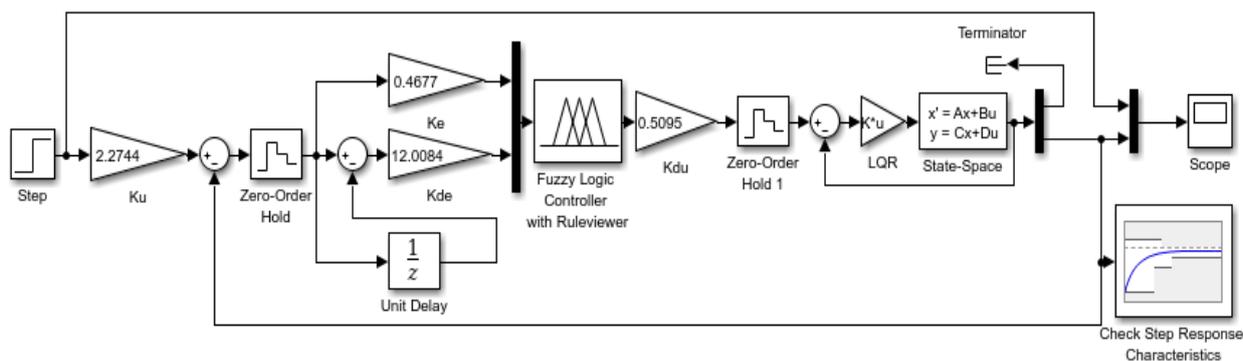


Рис. 8. Схема САУ с комбинированным нечетким регулятором FQR

Она получена путем добавления к схеме на рис. 7 коэффициентов  $K$ ,  $K_{du}$ , а также State-Space. Оптимизатором - блоком Check Step Response Characteristics определяется значение коэффициентов  $K_u$ ,  $K_e$ ,  $K_{de}$ ,  $K_{du}$  при котором в системе будет получен оптимальный переходный процесс, удовлетворяющий следующим ограничениям: отсутствию перерегулирования и статической ошибки. При нанесении ступенчатого возмущения в схеме на рис. 8 был получен график переходного процесса, показанный короткой пунктирной линией 3 на рис. 2.

Характеристики всех систем управления и соответствующих переходных процессов приводятся в нижеследующей табл.

Таблица

Характеристики систем управления и переходных процессов

| Тип регулятора | Коэффициенты     |        |        |          |          | Характер процесса | Время переходного процесса (Тп, с) | Время нарастания (Тр, с) | Перерегулирование (σ, %) |
|----------------|------------------|--------|--------|----------|----------|-------------------|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                | K                | $K_u$  | $K_e$  | $K_{de}$ | $K_{du}$ |                   |                                    |                          |                          |
| LQR            | 3.8917<br>3.1598 | 0.45   | -      | -        | -        | Устойчивый        | 8.5                                | 6                        | 0                        |
| FLC            | -                | -      | 0.545  | 0.0521   | 1.92     | Устойчивый        | 50                                 | 35                       | 0                        |
| FQR            | 3.8917<br>3.1598 | 2.2744 | 0.4677 | 12.0084  | 0.5095   | Устойчивый        | 5                                  | 2.45                     | 0                        |

В ходе выполнения данной работы были построены модели систем управления объекта, содержащие традиционный линейно-квадратический, нечеткий логический и комбинированный нечеткий регулятор. Как видно из рис. 2 и табл. 1, у всех регуляторов отсутствует перерегулирование и статическая ошибка. Линейно-квадратический и комбинированный нечеткий регуляторы обеспечивают малое время переходного процесса и нарастания, следовательно, можно говорить о высоком качестве управления в системах с этими регуляторами. Отличительной особенностью комбинированного нечеткого квадратического регулятора является большое число коэффициентов, что делает его более гибким в настройке.

## БИблиографический список

1. Построение и исследование моделей динамики теплового режима работы инкубационного шкафа / Ю.И. Кудинов, Е.С. Дуванов, А.Ю. Келина, С.А. Сулова – Текст :

непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. - 2019. - № 2.

2. **Веремей, Е.И.** Линейные системы с обратной связью: учебное пособие / Е.И. Веремей:– Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2013. – 448 с. – Текст : непосредственный

3. Нечеткие модели и системы управления / Ю.И. Кудинов [и др.] под ред. Пашенко Ф.Ф. – Москва: Ленанд, 2017. – 328 с. – Текст : непосредственный

Ключевые слова: нечеткий логический регулятор, линейно-квадратический регулятор, комбинированный квадратический регулятор.

Сведения об авторах:

Кудинов Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики Липецкого государственного технического университета.

Дуванов Евгений Сергеевич, магистрант группы М-УТ-17 факультета автоматизации и информатики Липецкого государственного технического университета.

Келина Анастасия Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики Липецкого государственного технического университета.

Гвозденко Николай Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kudinov.yi@mail.ru; evgenyduvanov@yandex.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30

## **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODELS FOR CONTROLLING THE INCUBATION CABINET THERMAL MODE**

Kudinov Yu.I., Duvanov E.S.,  
Kelina A.Yu., Gvozdenko N.P.

The paper analyzes the efficiency of three models of incubation cabinet temperature controllers constructed in the Matlab software package: fuzzy logical FLC, linear-quadratic LQR and combined fuzzy quadratic FQR.

Keywords: fuzzy logical FLC, linear-quadratic LQR, combined fuzzy quadratic FQR.

УДК 519.852.33

## **ТРАНСПОРТНЫЕ ЗАДАЧИ С ЗАЯВКАМИ В ДИАПАЗОНЕ ЗНАЧЕНИЙ**

Липецкий государственный технический университет

Ю.В. Лубенец

Рассматриваются транспортные задачи, в которых заявки могут изменяться в некотором диапазоне. Показывается, что такие задачи могут быть сведены к обычным транспортным задачам.

Транспортные задачи, в которых запасы или заявки могут варьироваться в определенном диапазоне значений, могут встречаться, например, при распределении некоторых работ определенной продолжительности среди работников, которые могут их выполнить в определенном некоторым диапазоном объеме и с определенной эффективностью. Показано, что такие задачи могут быть сведены к обычным транспортным задачам с фиксированными заявками. Аналогичная ситуация имеет место и для запасов. Кроме того, в таких задачах могут рассматриваться возможности изменения эффективностей при увеличении объемов работ, например, их снижения из-за увеличения нагрузок на работников. Известны некоторые способы сведения транспортных задач со специальными условиями на эффективности и фиксированными заявками к обычным транспортным задачам [1].

Рассмотренный метод может применяться и к другим транспортным задачам как с максимизацией, так и с минимизацией целевой функции.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается транспортная задача с максимизацией целевой функции. Имеется  $m$  работ  $A_1, A_2, \dots, A_m$ , которые должны быть выполнены  $n$  работниками  $B_1, B_2, \dots, B_n$ . Известны время выполнения каждой работы  $A_i$ , которое составляет  $a_i$  часов; объем работ, который может быть выполнен работником  $B_j$ , который содержится в диапазоне от  $b_j$  часов до  $d_j$  часов включительно, эффективность выполнения работы  $A_i$  работником  $B_j$  составляет  $c_{ij}$  единиц. Требуется определить распределение работ по работникам, при котором общая эффективность, определяемая как сумма произведений эффективностей на часы, будет максимальной. При этом допускается выполнение одной работы несколькими работниками.

Через  $x_{ij}$  обозначается объем выполнения работы  $A_i$  работником  $B_j$ . Получается задача линейного программирования следующего вида:

$$L = c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + \dots + c_{mn}x_{mn} \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} = a_1, \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n} = a_2, \\ \dots \\ x_{m1} + x_{m2} + \dots + x_{mn} = a_m. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} \geq b_1, \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2} \geq b_2, \\ \dots \\ x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} \geq b_n. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} \leq d_1, \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2} \leq d_2, \\ \dots \\ x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} \leq d_n. \end{cases}$$

$$x_{11} \geq 0, x_{12} \geq 0, \dots, x_{mn} \geq 0.$$

Решение этой задачи общими методами линейного программирования, такими как симплекс-метод, может быть связано с большим объемом вычислений. Поэтому здесь предлагается более простой способ решения, сводящий эту задачу к обычной транспортной задаче.

Содержательный смысл диапазонов заявок будет в случае выполнения неравенства  $\sum_{j=1}^n b_j < \sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n d_j$ . При выполнении неравенства  $\sum_{i=1}^m a_i \leq \sum_{i=1}^m b_j$  или  $\sum_{i=1}^m a_i \geq \sum_{j=1}^n d_j$  получится обычная транспортная задача, в случае строго неравенства открытая.

Последовательное распределение сначала минимальных объемов работникам, а затем оставшейся части работ не дает оптимального решения этой задачи.

### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Данные представляются в виде следующей таблицы (табл. 1), аналогичной [2]. Отличие заключается в дополнительной строке.

Таблица 1

Исходная таблица для решения задачи

|       |          |          |     |          |       |
|-------|----------|----------|-----|----------|-------|
|       | $B_1$    | $B_2$    | ... | $B_n$    | $a_i$ |
| $A_1$ | $c_{11}$ | $c_{12}$ | ... | $c_{1n}$ | $a_1$ |
| $A_2$ | $c_{21}$ | $c_{22}$ | ... | $c_{2n}$ | $a_2$ |
| ...   | ...      | ...      | ... | ...      | ...   |
| $A_m$ | $c_{m1}$ | $c_{m2}$ | ... | $c_{mn}$ | $a_m$ |
| $b_j$ | $b_1$    | $b_2$    | ... | $b_n$    |       |
| $d_j$ | $d_1$    | $d_2$    | ... | $d_n$    |       |

Каждый работник  $B_j$  представляется в виде  $B'_j$  и  $B''_j$ , заявки  $b_j$  и  $d_j - b_j$  соответственно. Эффективности  $c'_{ij}$  и  $c''_{ij}$ , положим равными  $c_{ij}$ . Кроме того, в таблицу вводится дополнительная работа  $A_{m+1}$ , которой назначается время выполнения  $\sum_{j=1}^n d_j - \sum_{i=1}^m a_i$ , эффективности  $c'_{ij}$  и  $c''_{ij}$  равны  $-\infty$  и 0 соответственно (табл. 2).

Таблица 2

Преобразованная таблица для решения задачи

|           |           |             |           |             |     |           |             |                                       |
|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----|-----------|-------------|---------------------------------------|
|           | $B'_1$    | $B''_1$     | $B'_2$    | $B''_2$     | ... | $B'_n$    | $B''_n$     | $a_i$                                 |
| $A_1$     | $c_{11}$  | $c_{11}$    | $c_{12}$  | $c_{12}$    | ... | $c_{1n}$  | $c_{1n}$    | $a_1$                                 |
| $A_2$     | $c_{21}$  | $c_{21}$    | $c_{22}$  | $c_{22}$    | ... | $c_{2n}$  | $c_{2n}$    | $a_2$                                 |
| ...       | ...       | ...         | ...       | ...         | ... | ...       | ...         | ...                                   |
| $A_m$     | $c_{m1}$  | $c_{m1}$    | $c_{m2}$  | $c_{m2}$    | ... | $c_{mn}$  | $c_{mn}$    | $a_m$                                 |
| $A_{m+1}$ | $-\infty$ | 0           | $-\infty$ | 0           | ... | $-\infty$ | 0           | $\sum_{j=1}^n d_j - \sum_{i=1}^m a_i$ |
| $b_j$     | $b_1$     | $d_1 - b_1$ | $b_2$     | $d_2 - b_2$ | ... | $b_n$     | $d_n - b_n$ |                                       |

Таким образом, получается закрытая транспортная задача с таблицей, в которой  $m+1$  строка и  $2n$  столбцов. При решении этой задачи методом потенциалов или другими

известными способами, а затем, исключая из итоговой таблицы строку с работой  $A_{m+1}$  и объединяя столбцы  $B'_j$  и  $B''_j$  в столбцы  $B_j$ , получается окончательное решение задачи.

#### ПРИМЕР

Рассматривается следующий пример. Имеются 4 работы фиксированного объема в часах, которые требуется распределить по 3 работникам. При этом первому работнику можно выделить работы в объеме от 750 до 800 часов, второму – от 800 до 950 часов, третьему – от 800 до 950 часов. Представляются данные в виде таблицы (табл.3).

Таблица 3

Исходная таблица для решения задачи

|       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $a_i$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 2     | 4     | 5     | 600   |
| $A_2$ | 4     | 3     | 6     | 620   |
| $A_3$ | 3     | 2     | 2     | 650   |
| $A_4$ | 5     | 1     | 3     | 680   |
| $b_j$ | 750   | 800   | 800   |       |
| $d_j$ | 800   | 900   | 950   |       |

Преобразуется исходная таблица к таблице для решения обычной транспортной задачи (табл. 4).

Таблица 4

Преобразованная таблица для решения задачи

|       | $B'_1$    | $B''_1$ | $B'_2$    | $B''_2$ | $B'_3$    | $B''_3$ | $a_i$ |
|-------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-------|
| $A_1$ | 2         | 2       | 4         | 4       | 5         | 5       | 600   |
| $A_2$ | 4         | 4       | 3         | 3       | 6         | 6       | 620   |
| $A_3$ | 3         | 3       | 2         | 2       | 2         | 2       | 650   |
| $A_4$ | 5         | 5       | 1         | 1       | 3         | 3       | 680   |
| $A_5$ | $-\infty$ | 0       | $-\infty$ | 0       | $-\infty$ | 0       | 100   |
| $b_j$ | 750       | 50      | 800       | 100     | 800       | 150     |       |

В результате решения получается следующая таблица (табл. 5).

Вспомогательная таблица с решением задачи

|       | $B'_1$    | $B''_1$ | $B'_2$    | $B''_2$ | $B'_3$    | $B''_3$ | $a_i$ |
|-------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-------|
| $A_1$ | 2         | 2       | 270 4     | 4       | 330 5     | 5       | 600   |
| $A_2$ | 4         | 4       | 3         | 3       | 470 6     | 150 6   | 620   |
| $A_3$ | 70 3      | 50 3    | 530 2     | 2       | 2         | 2       | 650   |
| $A_4$ | 680 5     | 5       | 1         | 1       | 3         | 3       | 680   |
| $A_5$ | $-\infty$ | 0       | $-\infty$ | 100 0   | $-\infty$ | 0       | 100   |
| $b_j$ | 750       | 50      | 800       | 100     | 800       | 150     |       |

Объединяя  $B'_j$  и  $B''_j$  в столбцы  $B_j$ , и исключая  $A_5$  из таблицы, получается окончательное решение задачи (табл. 6).

Таблица 6

Итоговая таблица с решением задачи

|       | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $a_i$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| $A_1$ | 2     | 270 4 | 330 5 | 600   |
| $A_2$ | 4     | 3     | 620 6 | 620   |
| $A_3$ | 120 3 | 530 2 | 2     | 650   |
| $A_4$ | 680 5 | 1     | 3     | 680   |
| $b_j$ | 750   | 800   | 800   |       |
| $d_j$ | 800   | 900   | 950   |       |

Эффективность составляет 11270 единиц. Последовательное распределение сначала минимальных объемов, а затем оставшейся части работ даст эффективность только 11120 единиц.

Предложенный метод можно применять и в случаях изменения коэффициентов эффективности работ после выполнения их минимального объема. Более того, подобным способом можно решать задачи, в которых происходят изменения эффективностей выполнения работ после достижения определенных объемов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бережная, Е.В.** Математические методы моделирования экономических систем / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – Москва: Финансы и статистика, 2006. – 432 с. – Текст : непосредственный
2. **Вентцель, Е.С.** Исследование операций / Е.С. Вентцель. – Москва: Сов. радио, 1972. – 552 с. – Текст : непосредственный

Ключевые слова: транспортная задача, заявки в диапазоне значений.

Сведения об авторе:

Лубенец Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: yvr11@mail.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **TRANSPORT TASKS WITH REQUESTS IN THE RANGE OF VALUES**

Yu.V. Lubenets

Transport tasks are considered in which requests may vary in some range. It is shown that such tasks can be reduced to common transport tasks.

Keywords: transport tasks, requests in the range of values.

УДК 004.852

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ КАК КЛАССИФИКАТОРА**

Липецкий государственный технический университет

И.А. Седых, А.В. Тимирязев

В работе дано понятие байесовской нейронной сети, описан алгоритм обучения таких сетей. Приведен практический пример работы алгоритма обучения байесовской нейронной сети в программе Microsoft Excel на случайно сгенерированной выборке. По результатам проверки на тестовой выборке сделан вывод, что обученная сеть правильно выполняет классификацию данных.

Байесовские нейронные сети [1] – графовая вероятностная модель, представляющая собой множество переменных и их вероятностных зависимостей по Байесу. Формально, байесовская сеть – это направленный ациклический граф [2], каждой вершине которого соответствует случайная переменная, а дуги графа кодируют отношения условной независимости между этими переменными. Вершины могут представлять переменные любых типов, быть взвешенными параметрами, скрытыми переменными или гипотезами.

В таких сетях целевые переменные, объекты и параметры рассматриваются как случайные величины. Нейронная сеть образует зависимость  $P(c|x)$  [3]. Априорная вероятность  $P(c)$  – предположение о вероятности гипотезы  $c$  до учета экспериментальных данных – задает известные данные о параметрах. Процесс обучения заключается в поиске апостериорных вероятностей  $P(c|x)$  попарно не совместимых гипотез  $c$ , при условии, что известны данные после проведения опыта. Байесовская нейронная сеть основана на использовании формулы Байеса:

$$P(c | x) = \frac{P(x | c)P(c)}{P(x)}, \quad (1)$$

где  $c$  – гипотеза,

$x$  – событие,

$P(c|x)$  – вероятность гипотезы  $c$  при наступлении события  $x$ ,

$P(x|c)$  – вероятность наступления события  $x$  при истинности гипотезы  $c$ ,

$P(c)$  – априорная вероятность гипотезы  $c$ ,

$P(x)$  – полная вероятность наступления события  $x$ .

Исходные данные делятся на несколько классов, каждому из которых соответствует нейрон в промежуточном слое байесовской нейронной сети.

Байесовские нейронные сети являются сетями прямого распространения [4] и используются как классификаторы, так как синапсы между нейронами сети имеют не дискретные веса, а вероятности, и такие сети не имеют проблем переобученности [5]. Также в таких сетях нет возможности изменения вероятностей в синапсах, вручную не меняя параметры сети или входные данные. Байесовские сети отличаются быстротой обучения, что позволяет быстро изменять обучающие данные.

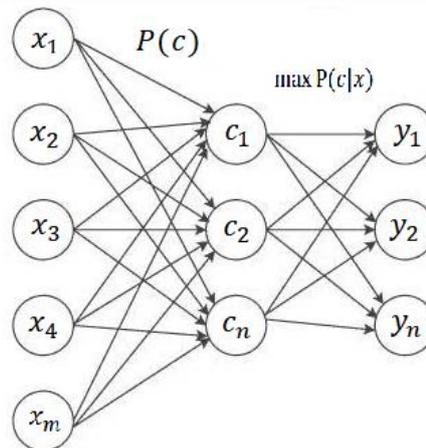


Рис.1. Схема байесовской нейронной сети

На рисунке 1 показана схема байесовской нейронной сети, где синапсы имеют веса в виде вероятностных распределений [6]. После попадания входных данных в сеть рассчитывается вероятность  $P(c)$  гипотезы  $c$ , затем вероятность гипотезы  $c$  при наступлении события  $x$   $P(c|x)$  и выбирается максимальное значение, что должно соответствовать выходному значению  $y_1, \dots, y_n$ .

#### АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ БАЙЕСОВСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В байесовской нейронной сети используется принцип обучения с учителем. Так как имеются знания о том, к какому классу относятся данные и сколько их, высчитывается вероятность класса или полная вероятность события  $x$ :

$$P(x) = \frac{1}{K}, \quad (2)$$

где  $K$  – это количество классов.

Априорная вероятность попадания данных в класс

$$P(c) = \frac{N}{M}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество данных в классе,  $M$  – общее количество данных.

Затем находится условная вероятность

$$P(x | c) = \prod_{i=1}^L P(x_{ij} | c), \quad (4)$$

где  $x_{ij}$  –  $j$ -я переменная в  $i$ -й строке обучающих данных,

$j = 1 \dots L$ ,

$i = 1 \dots N$ ,

$N$  – количество строк данных в группе,

$L$  – количество переменных в строке данных.

Условная вероятность  $P(x_i | c)$  [10] вычисляется по формуле

$$P(x_{ij} | c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_{ij} - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

где  $\mu_i$  – математическое ожидание  $i$ -й переменной,

$\sigma_i^2$  – дисперсия по  $i$ -й переменной.

Математическое ожидание и дисперсия высчитываются по формулам (6) и (7)

соответственно:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad (6)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \mu)^2. \quad (7)$$

В конце рассчитывается апостериорная вероятность по формуле (1).

### ПРИМЕР ОБУЧЕНИЯ БАЙЕСОВСКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Для приведения примера обучения и тестирования в программе Microsoft Excel были сгенерированы обучающая и проверочная выборки, состоящие из 200 и 50 строк соответственно. Исходные данные имеют 3 входных переменных и разбиваются на 5 классов. Значения всех входных переменных  $x_1, x_2, x_3$  были получены с помощью сочетания команд:

= СЛЧИС( ) \* (кон. отрезка – нач. отрезка) + нач. отрезка,

где = СЛЧИС( ) – команда, генерирующая случайное число в пределах [0;1],

конец отрезка – начало отрезка – из конца отрезка, определяющего принадлежность к классу, вычитается начало отрезка.

В качестве выходных значений переменных используется номер группы, к которой относятся переменные с общими признаками. Фрагмент обучающих данных показан в таблице 1.

Фрагмент обучающих данных

|           |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|
| 1-й класс | x1 (0;1) | x2 (0;2) | x3 (0;3) |
|           | 0,188    | 0,086    | 2,569    |
|           | 0,527    | 0,715    | 0,514    |
|           | 0,082    | 0,915    | 2,102    |
| 2-й класс | 0,834    | 1,651    | 1,108    |
|           | x1 (2;3) | x2 (2;4) | x3 (2;5) |
|           | 2,196    | 3,537    | 3,155    |
|           | 2,114    | 3,698    | 4,867    |
| 3-й класс | 2,102    | 3,415    | 4,102    |
|           | 2,148    | 3,739    | 3,544    |
|           | x1 (3;5) | x2 (3;6) | x3 (3;7) |
|           | 4,691    | 3,388    | 6,097    |
|           | 4,116    | 3,162    | 5,689    |
|           | 3,849    | 3,993    | 6,651    |
|           | 3,989    | 3,606    | 5,083    |
|           |          |          |          |

После того как обучающие данные сгенерированы и распределены по классам, находятся математическое ожидание  $\mu_{jk}$ ,  $k = 1 \dots 5$ ,  $j = 1 \dots 3$  и дисперсия  $\sigma_{jk}^2$  для каждой переменной в каждом классе по формулам (6), (7), где  $k$  – номер класса.

Следующим шагом высчитывается вероятность класса по формуле (2)  $P(x) = \frac{1}{5}$  и априорная вероятность попадания данных в класс по формуле (3). Например, для первого класса:  $P(c_1) = \frac{30}{200}$ .

Фрагмент рассчитанных математических ожиданий и дисперсий приведен в таблице 2.

Таблица 2

Фрагмент рассчитанных математических ожиданий и дисперсий

|          |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
| 1 группа | 0,568 | 0,586 | 2,694 |
|          | 0,368 | 1,267 | 0,963 |
|          | 0,529 | 1,533 | 2,794 |
|          | 0,088 | 0,724 | 2,527 |
|          | 0,208 | 1,207 | 1,725 |
|          | 0,981 | 1,104 | 2,869 |
|          | 0,454 | 1,851 | 2,009 |
| мю       | 0,458 | 1,031 | 1,868 |
| дисп     | 0,081 | 0,334 | 0,576 |

Таблица 3

Фрагмент значений условных вероятностей для каждой переменной

| Группы |       |       |         |         |       |         |         |       |
|--------|-------|-------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|
| первая |       |       | вторая  |         |       | третья  |         |       |
| 0,893  | 0,182 | 0,343 | 1,8E-13 | 1,6E-06 | 0,228 | 1,8E-09 | 1,7E-06 | 0,029 |
| 1,361  | 0,595 | 0,107 | 7,6E-10 | 0,00019 | 0,002 | 5,3E-08 | 5E-05   | 3E-05 |
| 0,583  | 0,677 | 0,501 | 9,6E-15 | 0,00068 | 0,115 | 5,8E-10 | 0,00013 | 0,009 |
| 0,588  | 0,387 | 0,319 | 4,4E-07 | 0,03019 | 0,012 | 8,5E-07 | 0,00291 | 3E-04 |
| 0,782  | 0,583 | 0,374 | 1,2E-07 | 0,00827 | 0,208 | 4,7E-07 | 0,00095 | 0,024 |
| 1,351  | 0,419 | 0,504 | 9,1E-10 | 2,9E-05 | 0,047 | 5,7E-08 | 1,3E-05 | 0,002 |
| 1,233  | 0,163 | 0,149 | 4,1E-09 | 1,2E-06 | 0,003 | 1,1E-07 | 1,3E-06 | 5E-05 |
| 0,408  | 0,67  | 0,516 | 1,3E-15 | 0,00058 | 0,098 | 2,7E-10 | 0,00012 | 0,007 |
| 1,363  | 0,268 | 0,286 | 7,4E-10 | 0,05922 | 0,009 | 5,2E-08 | 0,00541 | 2E-04 |
| 1,399  | 0,298 | 0,152 | 1,1E-10 | 7,8E-06 | 0,003 | 2,4E-08 | 5,1E-06 | 5E-05 |

В таблице 3 показан фрагмент рассчитанных условных вероятностей  $P(x_i|c)$  для каждой переменной обучающих данных по формуле (5). Фрагмент содержит вероятностное распределение всех значений 1-го класса с параметрами математического ожидания и дисперсии для 3-х классов. Аналогично происходит расчет по остальным классам.

Таблица 4

Фрагмент результатов значений условных вероятностей

| 1-й   | 2-й     | 3-й     | 4-й | 5-й      |
|-------|---------|---------|-----|----------|
| 0,056 | 6,5E-20 | 8,7E-17 | 0   | 2,4E-302 |
| 0,087 | 2,4E-16 | 7,2E-17 | 0   | 9,1E-303 |
| 0,198 | 7,5E-19 | 6,6E-16 | 0   | 3,1E-275 |
| 0,073 | 1,5E-10 | 7,9E-13 | 0   | 1,7E-254 |
| 0,171 | 2,1E-10 | 1,1E-11 | 0   | 6,5E-246 |
| 0,285 | 1,2E-15 | 1,6E-15 | 0   | 5,3E-296 |

В таблице 4 показан фрагмент конечных результатов значений условных вероятностей  $P(c|x)$ , рассчитанных по формуле (4) со значениями математического ожидания и дисперсии всех 5-ти классов.

После полученные значения подставляются в формулу Байеса (1), и рассчитываются апостериорные вероятности принадлежности значений к классам.

Таблица 5

Апостериорные вероятности

| $P(c x)$ 1 | 2        | 3        | 4 | 5        | максимум  |
|------------|----------|----------|---|----------|-----------|
| 0,042      | 4,86E-20 | 6,5E-17  | 0 | 1,8E-302 | 0,0418086 |
| 0,065      | 1,82E-16 | 5,42E-17 | 0 | 6,8E-303 | 0,0650582 |
| 0,148      | 5,62E-19 | 4,94E-16 | 0 | 2,3E-275 | 0,1482835 |
| 0,054      | 1,16E-10 | 5,96E-13 | 0 | 1,2E-254 | 0,0544208 |
| 0,127      | 1,55E-10 | 8,15E-12 | 0 | 4,9E-246 | 0,1278921 |
| 0,214      | 9,33E-16 | 1,22E-15 | 0 | 4E-296   | 0,2140088 |

В таблице 5 показаны апостериорные вероятности всех значений 1-го класса, а в столбце «максимум» выбран максимум из этих вероятностей. Он соответствует 1-му классу данных, что означает, что нейронная сеть обучена.

Аналогичные результаты получены для остальных классов.

Проверка происходит по тестовым данным, не использованным при обучении. Проводится расчет апостериорной вероятности тестовых данных с использованием формул (1), (4) и (5), в которых используются значения математических ожиданий и дисперсий, полученных при обучении.

Таблица 6

Проверка обученной нейронной сети

| кл. 3 | кл. 1   | кл. 2   | кл. 4   | кл. 5   | 3      |
|-------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 0,022 | 1,8E-47 | 1,2E-09 | 2,1E-90 | 1,4E-81 | 0,0224 |
| 0,038 | 3,5E-41 | 1,3E-07 | 4,9E-94 | 3,5E-88 | 0,0381 |
| 0,055 | 5,6E-42 | 1,3E-07 | 1,2E-95 | 3,8E-88 | 0,0551 |
| 0,042 | 3,3E-59 | 8,3E-16 | 7E-92   | 5E-102  | 0,042  |
| 0,035 | 2,8E-34 | 3,7E-05 | 5E-118  | 7E-114  | 0,0353 |
| 0,01  | 5,9E-35 | 1,9E-05 | 8E-114  | 7E-91   | 0,0099 |

В таблице 6 показана проверка работы обученной нейронной сети. После расчета по всем формулам и нахождения максимальных вероятностей видно, что они соответствуют классу, в котором были проведены расчеты, что подтверждает обученность сети.

Таким образом, в работе рассмотрены и обучены на случайно сгенерированной выборке байесовские нейронные сети. Выполнена проверка результатов обучения, показавшая, что обученная сеть правильно выполняет классификацию тестовых данных. Байесовские нейронные сети удобно использовать для классификации данных и распознавания образов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bayes classifier and Naive Bayes tutorial. Режим доступа WWW.URL:<https://lazyprogrammer.me/bayes-classifier-and-naive-bayes-tutorial-using/> Дата обращения – 11.05.2019. – Текст : непосредственный

2. **Седых, И.А.** Гибридный алгоритм с подбором коэффициента обучения для радиально-базисных нейронных сетей в программе Mathcad / И.А. Седых, В.А. Истомина – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2018. – №2 (36). – С. 20-25.

3. **Сараев, П. В.** Развитие нейросетевого моделирования сложных систем на основе нейроструктурного подхода / П.В. Сараев – Текст : непосредственный // Вести ВУЗов Черноземья. – 2012. – № 2(28). – С. 30–35.

4. **Галушкин, А.И.** Нейронные сети: история развития теории: Учебное пособие для вузов. / А.И. Галушкин, Я.З. Цыпкин. – Москва: Альянс, 2015. – 840 с. – Текст : непосредственный

5. **Седых, И.А.** Сравнение обучения радиально-базисной нейронной сети в STATISTICA и блоке программирования MATHCAD /И.А. Седых, В.А. Истомина – Текст :

непосредственный //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. –2019. – Т.8. №1(45). – С.68-72.

б. **Демахин, Д.С.** Использование кластеризации в нейросетевом моделировании / Д.С. Демахин, И.А. Седых – Текст : непосредственный // Физика и технологии. Тенденции развития современной науки: материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, 14-18 апреля 2018 г. - Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2018 – С. 52-55.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-48-480007 p\_a).

Ключевые слова: нейронные сети, вероятность, формула Байеса, байесовская нейронная сеть, алгоритм обучения.

Сведения об авторах:

Седых Ирина Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

Тимирязев Анатолий Вячеславович, студент группы САУ-15 кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **AN APPLICATION OF THE BAYESIAN NEURAL NETWORK AS A CLASSIFIER**

I.A. Sedykh, A.V. Timiryazev

The paper defines the Bayesian neural network. An algorithm for training such networks is described. A practical example of an algorithm for training the Bayesian neural network in Microsoft Excel on a randomly generated sample is given. According to the test results on the test sample, it was concluded that the trained network correctly performs the data classification.

Keywords: neural networks, probability, Bayes formula, Bayesian neural network, training algorithm

УДК 621.791

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ТРУБ И ФАСОННЫХ ЧАСТЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

Липецкий государственный технический университет

П.Н. Клевцов, В.В. Неверов, С.В. Лебедев

Рассматриваются основные технологические приёмы сварки деталей из трубных заготовок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Указаны основные затруднения, возникающие при сварке деталей из таких материалов, применяемые способы сварки, сварочные материалы и их основные характеристики.

В последние годы в промышленности применяют чугуны новых промышленных марок высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ), для которых характерны одновременно высокие показатели прочности (до 1000 МПа) и пластичности (до 20%). Такие чугуны широко применяют в машиностроении и других отраслях промышленности, они перспективны при изготовлении литосварных изделий и комбинированных сварных узлов из чугуна и стали [1-3]. В этой связи разработка технологии изготовления сварных узлов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом остается актуальной задачей в наше время.

В зависимости от ряда факторов (термообработки, химического состава и т.п.) металлическая основа чугуна может быть ферритной, ферритно-перлитной или перлитной (рис. 1). Чугуны марок ВЧ 35, ВЧ 40 имеют ферритную основу, ВЧ 45 и ВЧ 50 - перлитно-ферритную, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80 - перлитную. Требуемая структура металлической основы формируется в процессе литья и последующей термообработки.

Шаровидная форма графита придает такому чугуну высокие механические свойства. Отливки из высокопрочного чугуна могут быть любой толщины и формы [2].

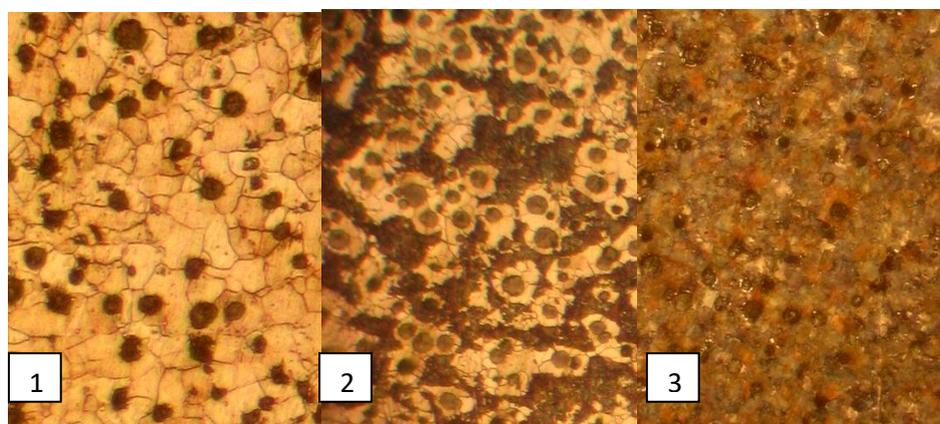


Рис. 1. Типичные структуры матрицы высокопрочных чугунов:  
1 – ферритная; 2 – ферритно-перлитная; 3 – перлитная

Основными легирующими элементами ВЧШГ являются: углерод, кремний, марганец, фосфор, сера, магний (или другой сфероидизирующий элемент). Каждый из перечисленных элементов оказывает влияние на структуру и свойства чугуна, однако влияние каждого из этих элементов различно. Химический состав основных марок ВЧШГ приведён в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ГОСТ 7293-85)

| Марка чугуна | Массовая доля чугуна, %    |               |         |         |               |         |          |        |       |      |      |        |
|--------------|----------------------------|---------------|---------|---------|---------------|---------|----------|--------|-------|------|------|--------|
|              | Углерод                    |               |         | Кремний |               |         | Марганец | Фосфор | Сера  | Хром | Медь | Никель |
|              | Толщина стенки отливки, мм |               |         |         |               |         |          |        |       |      |      |        |
|              | до 50                      | св. 50 до 100 | до 100  | до 50   | св. 50 до 100 | до 100  |          |        |       |      |      |        |
| ВЧ 35        | 3,3-3,8                    | 3,0-3,5       | 2,7-3,2 | 1,9-2,9 | 1,3-1,7       | 0,8-1,5 | 0,2-0,6  | 0,01   | 0,02  | 0,05 | -    | -      |
| ВЧ 40        | 3,3-3,8                    | 3,0-3,5       | 2,7-3,2 | 1,9-2,9 | 1,2-1,7       | 0,5-1,5 | 0,2-0,6  | 0,01   | 0,02  | 0,1  | -    | -      |
| ВЧ 45        | 3,3-3,8                    | 3,0-3,5       | 2,7-3,2 | 1,9-2,9 | 1,3-1,7       | 0,5-1,5 | 0,3-0,7  | 0,01   | 0,02  | 0,1  | -    | -      |
| ВЧ 50        | 3,2-3,7                    | 3,0-3,3       | 2,7-3,2 | 1,9-2,9 | 2,2-2,6       | 0,8-1,5 | 0,3-0,7  | 0,01   | 0,02  | 0,15 | -    | -      |
| ВЧ 60        | 3,2-3,6                    | 3,0-3,3       | -       | 2,4-2,6 | 2,4-2,8       | -       | 0,4-0,7  | 0,01   | 0,02  | 0,15 | 0,3  | 0,4    |
| ВЧ 70        | 3,2-3,6                    | 3,0-3,3       | -       | 2,6-2,9 | 2,6-2,9       | -       | 0,4-0,7  | 0,01   | 0,015 | 0,15 | 0,4  | 0,6    |
| ВЧ 80        | 3,2-3,6                    | -             | -       | 2,6-2,9 | -             | -       | 0,4-0,7  | 0,01   | 0,01  | 0,15 | 0,6  | 0,6    |
| ВЧ 100       | 3,2-3,6                    | -             | -       | 3,0-3,8 | -             | -       | 0,4-0,7  | 0,01   | 0,01  | 0,15 | 0,6  | 0,8    |

Чугуны относят к числу трудносвариваемых конструкционных материалов из-за высокой склонности сварных соединений к образованию неустраняемых дефектов (в основном, холодных и горячих трещин, пор), трудности получения плотных, равнопрочных основному металлу, а также как легкообрабатываемых сварных соединений [4, 5].

Особенности и трудности сварки чугунов обуславливаются следующими факторами:

- высокое содержание углерода в составе основного металла;
- склонность к образованию цементита и ледебурита при кристаллизации, а также к закалке при ускоренном охлаждении;
- малой пластичностью основного металла и зоны термического влияния (ЗТВ);
- относительно низкое значение температуры кристаллизации по сравнению с этой характеристикой металла сварочной ванны на железной и железоникелевой основе;
- высокая газонасыщенность, а также наличие в чугуне микропустот и даже рыхлот, в которых концентрируются газы[3].

Дополнительная проблема возникает при необходимости получить герметичное, равнопрочное сварное соединение, способное воспринимать нагрузки на изгиб и обладающее коррозионной стойкостью на уровне основного металла.

Существует два основных способа сварки чугуна – холодная и горячая, отличающиеся принципом устранения основной трудности сварки чугуна – склонности к образованию хрупких структур отбела(выделения ледебуритной прослойки), в процессе термического цикла сварки [4, 5].

Высокий предварительный подогрев при горячей сварке чугуна (до 800 °С) обеспечивает замедленное охлаждение сварного соединения и таким образом снижает количество хрупких структур и уменьшает сварочные напряжения. Высокий предварительный подогрев применяется для формирования однородного соединения (в шве

– чугуна, в случае применения сварочных материалов на чугунной основе) и позволяет получить соединение без трещин. Однако такая сварка неприемлема для тонкостенных конструкций, в частности для соединения труб из ВЧШГ по причине жидкотекучести чугуна и не технологичности процесса.

При холодной сварке чугуна (подогрев до 250 °С) сварной шов формируется из цветных сплавов на основе меди, никеля и их сплавов с железом. Никель и медь используются для сварки чугуна, так как имеют неограниченную растворимость в железе, образуя твердый раствор замещения при любых концентрациях, не образуют химических соединений как с самим железом, так и с углеродом. Указанные свойства никеля и меди позволяют сохранить пластичность металла шва. Подплавленный в процессе сварки чугун кристаллизуется с образованием хрупких структур ледебурита и цементита. Образование карбидных фаз из жидкого чугуна идет со значительной усадкой (до 6%), что приводит к высоким сварочным напряжениям. Использование цветных сплавов в значительной степени сокращает объем хрупких структур, которые образуются только в зоне сплавления, и таким образом способствуют снижению сварочных напряжений. Сварочные напряжения, возникающие при термическом цикле сварки, компенсируются высокопластичным, вязким никелевым или медным сварным швом.

Использование меди для сварки чугуна имеет один существенный недостаток. Электрохимический потенциал меди (+0,3 В) значительно отличается от потенциала железа (-0,55 В), а чем больше разница потенциалов, тем интенсивнее идет процесс коррозии. В случае применения сварочных материалов на медной основе возникает опасность появления локальных коррозионных повреждений в зоне сплавления и в ЗТВ. В этой связи наибольшее распространение для сварки чугуна с повышенными требованиями к качеству соединения получили материалы на никелевой и железоникелевой основе.

Из целого ряда способов получения сварного соединения наиболее пригодными для сварки труб из ВЧШГ являются ручная дуговая, ручная покрытыми электродами и полуавтоматическая сварка (табл. 2.) [2, 61].

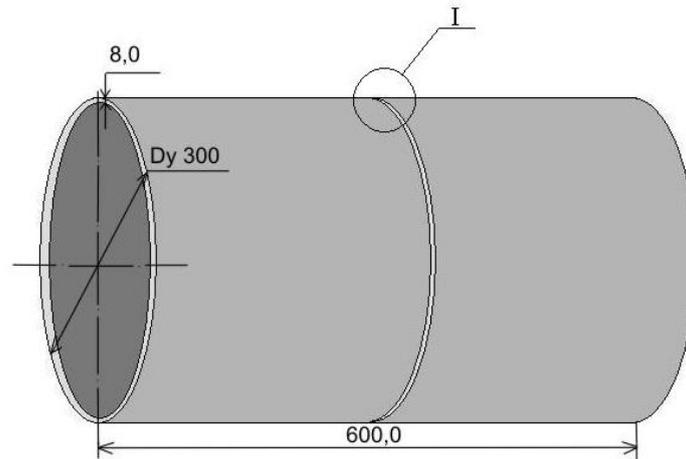
Таблица 2

Характеристика наиболее распространенных способов холодной сварки чугуна

| Основные способы холодной сварки чугуна     | Сварочные материалы  | Характерные особенности способа сварки  |
|---|--|---|
| Ручная аргодуговая сварка                   | на никелевой основе: ПАНЧ-11, НП-2, НМц5;<br>на железоникелевой основе: Св-08Н50 | 1. Возможность качественного формирования сварного соединения во всех положениях и всех типов сварных соединений (стыковое, нахлесточное, угловое)<br>2. Требуется невысокий подогрев до 250°С<br>3. Требуется специальное сварочное оборудование |
| Ручная дуговая сварка покрытыми электродами | на медной и медноникелевой основе: ОЗЧ-2, ОЗЧ-6, МНЧ-2                           | 1. Высокая дефектность сварных швов (пористость)<br>2. Низкая стойкость сварного соединения к электрохимической коррозии<br>3. Низкая прочность сварного соединения   |
|   | на никелевой и железоникелевой основе: ОЗЧ-3, ОЗЧ-4, ОЗЖН-1                      | 1. Возможна сварка без подогрева<br>2. Возможность сварки во всех положениях<br>3. Высокая прочность и пластичность соединения<br>4. Сложность выполнения сварки встык  |

|                           |                                 |   |
|---------------------------|---------------------------------|---|
| Полуавтоматическая сварка | на никелевой основе:<br>ПАНЧ-11 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Требуется невысокий подогрев до 250°C</li> <li>2. Сварка только в нижнем положении</li> <li>3. Сварка только угловых соединений</li> <li>4. Высокие механические свойства сварного соединения</li> <li>5. Высокая производительность</li> </ol> |
|---------------------------|---------------------------------|---|

Наиболее распространённые стыковые сварные соединения трубных заготовок приведены на рис. 2.



Вид I

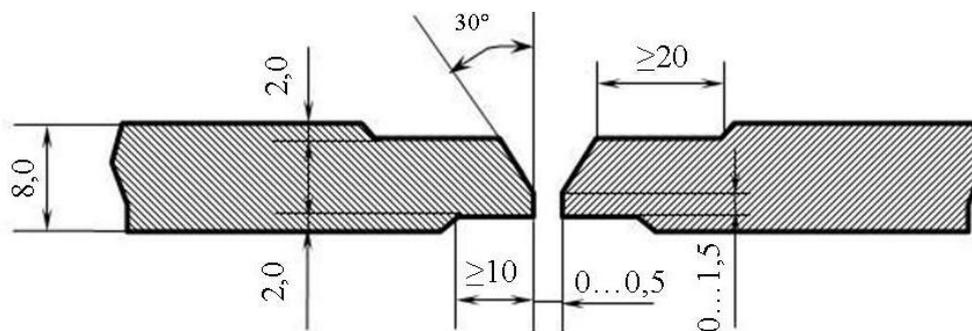


Рис. 2. Общий вид стыкового сварного соединения трубной заготовки из ВЧШГ диаметром 300 мм

Таким образом, применяя указанные технологические приёмы и соответствующие сварочные материалы, возможно осуществлять качественную сварку деталей из ВЧШГ. Данные технологии разработаны, апробированы и используются при изготовлении сварных изделий (фланцевых соединений, составных частей трубной арматуры и т.п.) из труб производства ЛМЗ «Свободный сокол» из ВЧШГ, изготовленных методом центробежного литья липецкими предприятиями ООО НПП «Валок-Чугун», ООО «ЧугунСпецСтрой». При этом получаемые сварные соединения соответствуют требованиям по механическим свойствам и геометрическим размерам ТУ 1468-041-50254094.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Акулов, А. И.** Технология и оборудование сварки плавлением/ А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – Москва: Машиностроение, 1977. – 432 с. – Текст : непосредственный
2. **Иванов, Б. Г.** Сварка и резка чугуна / Б. Г. Иванов, Ю. И. Журавицкий, В. И. Левченков. – Москва: Машиностроение, 1977. – 208 с. – Текст : непосредственный
3. **Грецкий, Ю. Я.** Металлография сварных соединений чугуна / В.Ф.Грабин [и др.] –Киев,1987. – 192 с. – Текст : непосредственный
4. Причины возникновения дефектов сварных соединений при изготовлении теплообменников газовых котлов и способы их устранения / Т.В. Редичкина [и др.] – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 2018.–№ 3. – С. – 33-37
5. **Неверов, В.В.** Прогнозирование работоспособности паровых котлов на основе результатов дефектоскопии сварных соединений / В.В. Неверов, П.Н. Клевцов – Текст : непосредственный // Сварка и диагностика. – 2016. – № 5. – Москва: НАКС Медиа. – С. 50-54.

Ключевые слова: высокопрочный чугун с шаровидным графитом, ледеburит, графит, трубная заготовка, дефекты при сварке.

Сведения об авторах:

Клевцов Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Оборудования и процессов машиностроительных производств Липецкого государственного технического университета

Неверов Виктор Валентинович - кандидат технических наук, доцент кафедры Оборудования и процессов машиностроительных производств Липецкого государственного технического университета

Лебедев Сергей Викторович - доктор технических наук, профессор кафедры Оборудования и процессов машиностроительных производств Липецкого государственного технического университета

E-mail: svarka\_lip@mail.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30

## TECHNOLOGICAL FEATURES OF WELDING PIPES AND FITTINGS OF HIGH-STRENGTH CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

P.N. Klevtsov, V.V. Neverov, S.V. Lebedev

The basic technological methods of welding parts from pipe billets from high-strength cast iron with spherical graphite are considered. The main difficulties arising at welding parts from such materials, the applied welding methods, welding materials and their main characteristics are specified.

Key words: high-strength cast iron with spherical graphite, ledeburite, graphite, pipe billet, welding defects.

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА МОТАЛКИ ПОЛОС НА НЕПРЕРЫВНОМ ТРАВИЛЬНОМ АГРЕГАТЕ**

Липецкий государственный технический университет

А.П. Жильцов, Ю.К. Костров, П.В. Курило

Проведен анализ факторов и негативных воздействий на элементы привода моталок. Рассмотрены условия динамического нагружения. Предложены конструктивные методы по снижению вибраций в элементах привода.

В условиях производства холоднокатаных полос для реализации технологических процессов применяются различные технологические агрегаты: агрегат подготовки горячекатаных полос, дрессировочный стан, непрерывный травильный агрегат, оснащенные однотипными электромеханическими приводами для разматывания и смотки рулонов.

Применительно к оборудованию данных производств и перечисленных агрегатов важными являются факторы, характеризующиеся показателями долговечности, безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости, качества, так как данные производства являются завершающими в полном металлургическом цикле. При этом эффективность производства обеспечивается не только производительностью, но и качеством холоднокатаных полос. Важнейшим условием является применение систем по оценке состояния оборудования с использованием показателей надежности [1].

К оборудованию моталок и разматывателей и их приводам в условиях технологических агрегатов при обработке полос предъявляются высокие требования по обеспечению стабильности процессов разматывания и смотки рулонов [2, 3, 4].

Применительно к моталкам к данным требованиям относятся:

- обеспечение натяжения полосы между подающими роликами и барабаном моталки;
- наличие индивидуального привода с электродвигателем и системой плавного регулирования скорости для работы в 3-х режимах: режим разгона до номинальной скорости смотки, заправочный режим при захвате полосы барабаном моталки, режим стабилизации в период смотки;
- обеспечение плотности рулона без телескопичности (центрирование);
- обеспечение минимального прогиба барабана введением дополнительной (консольной) опоры концевой части барабана;
- наличие двух моталок однотипной конструкции для реализации непрерывности технологического процесса;
- обеспечение надежной работы элементов привода моталки с минимизацией отказов вследствие нарушений работоспособности.

В связи с вышеизложенным разработана технологических и технических решений, направленных на повышение эффективной и надежной работы моталок и их приводов, является актуальной задачей.

### **Анализ условий нагружения элементов привода**

Конструктивная схема привода и воздействующих на элементы привода энергосиловых и скоростных параметров приведена на рис. 1.

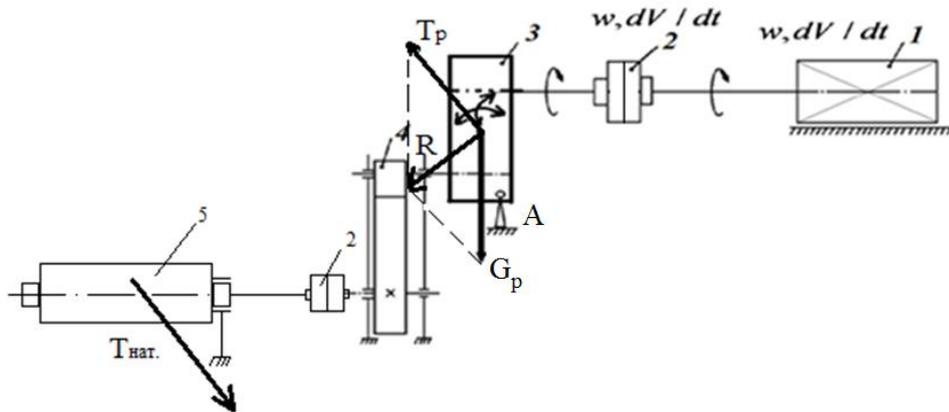


Рис. 1. Схема нагружения редуктора привода моталки:

1 - электродвигатель, 2 - зубчатая муфта, 3 - редуктор, 4 - зубчатая передача, 5 - барабан моталки

Особенностью конструктивной схемы привода является применение односторонней жесткой опоры «А» редуктора, при этом под второй опорой подразумевается трансмиссия, обеспечивающая передачу крутящего момента от выходного вала редуктора через зубчатую пару 4 к барабану моталки 6 (см. рис. 1).

«Анализ эксплуатационных параметров при эксплуатации приводов моталок показывает, что при воздействии энергосиловых и скоростных параметров наблюдаются негативные явления, связанные с возникновением вибраций в элементах привода. Это приводит к расцентровке валов в зубчатой муфте, возможному разрушению зубьев зубчатых передач редуктора. Практика эксплуатации свидетельствует о частых заменах редукторов и составляющих элементов, а также заменах зубчатых муфт привода» [4].

Установка редуктора на одностороннем кронштейне приводит к возникновению кратковременных вибрационных нагрузок при пуске и остановке электродвигателя, что является корневой причиной расцентровки валов, выхода из строя зубчатой муфты, разрушения зубьев вала-шестерни и зубчатого колеса редуктора [4]. При этом динамическое нагружение, следствием которого является, в том числе, возникновение вибрационных нагрузок, приводит к изменению условий натяжения полосы и снижению качеству смотки [5, 6].

Источником вибрационных возмущений и действующих дополнительных динамических нагрузок на консольно закрепленный редуктор является пусковой момент электродвигателя, например, модели ENCO, серии SHF с типом двигателя SHC450VL2, мощностью 288 кВт и передаваемым крутящим моментом - 6200 Нм, током - 750 А и рабочей скоростью - 1643 об/мин.

В течение переходного режима от пуска до заправочного режима и в дальнейшем перехода к стабильной смотке максимальный пусковой момент, определяемый величиной номинального момента  $M_{ном}$  - и коэффициентом кратности  $k_n$  по формуле:

$$M_{пуск} = M_{ном} \cdot k_n,$$

за время разгона  $\tau_p$  стабилизируется до величины номинального момента  $M_{ном}$  в течение времени стабилизации  $\tau_c$ .

При реализации режима разгона, характеризующегося возникновением неустойчивого процесса, необходимо учесть динамические воздействия на редуктор как одномассовую систему. В данном случае коэффициент кратности  $k_n$ , который составляет величину 2,0-2,2 (см. рис. 6), можно характеризовать как условный коэффициент динамичности. При этом нагрузка  $Q_{дин}$ , действующая на редуктор, определяется по следующему выражению:

$$Q_{дин} = k_n \cdot G_p.$$

Наряду с динамической нагрузкой  $Q_{дин}$  на редуктор действует реактивный момент со стороны барабана моталки. Это связано с тем, что в процессе смотки происходит прогиб

барабана во взаимно- перпендикулярных плоскостях, что оказывает через трансмиссию негативное воздействие момента натяжения  $M_{нат}$  на элементы привода: зубчатую пару и редуктор, т.е. возникает реактивная нагрузка  $T_{реакт}$  на редуктор, определяемая по выражению:

$$T_{реакт} = k_k \cdot T_{нат.}$$

где  $k_k$  - коэффициент коррекции передачи усилия натяжения  $T_{нат.}$ , через трансмиссию на редуктор. Коэффициент  $k_k$  принят равным 0,5. Воздействие на редуктор нагрузок  $T_{реакт}$  и  $Q_{дин}$  приводит к упругой податливости редуктора в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Этот процесс характерен для периода разгона электродвигателя ( $\tau_p \approx 15c$ ). Но при этом упругая податливость  $IP'$  редуктора приводит к смещению ведущего вала редуктора, что, в свою очередь, воздействует на радиальное и угловое смещение валов в зубчатой муфте (рис. 2).

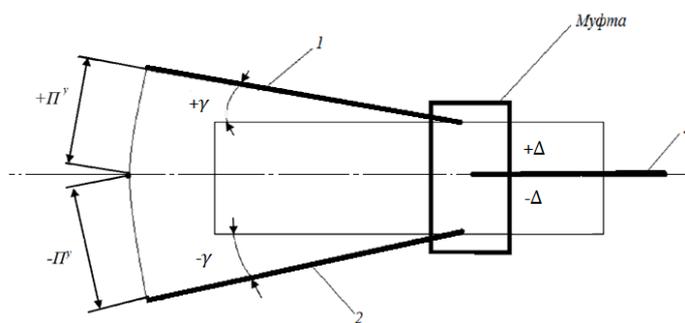


Рис. 2. Схема взаимного положения валов в зубчатой муфте за время разгона электродвигателя

В соответствии со схемой (см. рис. 2) суммарная упругая податливость, равная  $|2IP'|$ , приводит к угловому смещению ведущего вала (положения 1 и 2) на величину  $\pm\gamma$  и радиальному смещению  $\pm\Delta$  относительно вала 3 от электродвигателя.

В соответствии с требованиями ГОСТ [7] для зубчатых муфт с передаваемым крутящим моментом  $M_{кр} = 10 - 30 \text{ кН} \cdot \text{м}$  допусковое смещение  $\Delta$  составляет 0,4-0,6 мм, допусковое смещение  $\gamma = 0^\circ 30' - 1^\circ 15'$ .

Поэтому необходимо определить диапазон величин упругой податливости редуктора, который может характеризовать нормальный режим эксплуатации при соблюдении требований ГОСТа по величинам  $\Delta$  и  $\gamma$ , и критический режим, для которого параметры  $\Delta$  и  $\gamma$  превышают допусковые значения в соответствии с требованиями ГОСТ и разработать конструктивные решения по снижению величины упругой податливости редуктора в период разгона двигателя.

### Методика и результаты расчетов

В соответствии с рассмотренным выше силовым анализом установлено, что корневой причиной отказов зубчатой муфты в составе привода является силовое воздействие наконсольно закреплённый редуктор, со стороны привода в виде динамической нагрузки  $Q_{дин}$  и со стороны барабана моталки в виде реактивной нагрузки  $T_{реакт}$ . На рис. 3 показана расчётная схема нагружения редуктора.

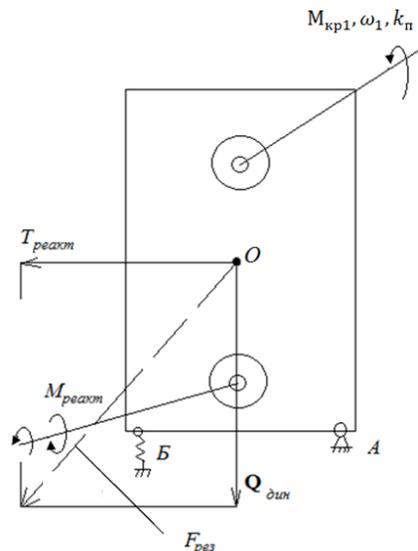


Рис. 3. Расчетная схема редуктора:  
 O - центр масс редуктора; A - условно жесткая опора;  
 Б - условно податливая опора

Редуктор, как элемент нагружения, можно охарактеризовать как одномассовую систему, воспринимающую перечисленные выше энергосиловые и скоростные параметры. Механическая модель данной одномассовой системы приведена на рис. 4.

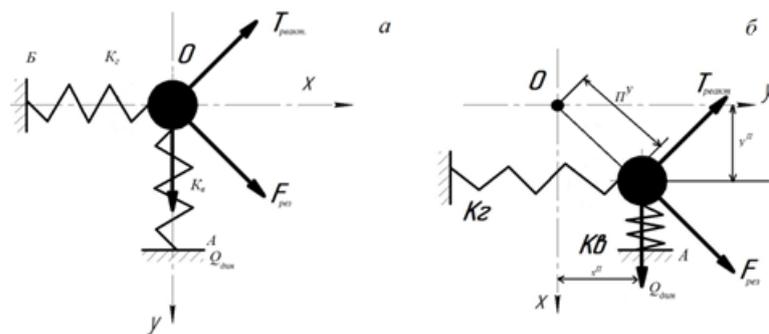


Рис. 4. Механическая модель редуктора как одномассовой системы:  
 а - начальное положение; б - рабочее положение (в период разгона)

В данном случае механическая модель (см. рис. 4) динамической системы представляет собой материальную точку "0" массой  $m$  на условно жесткой опоре А и упруго-податливой опоре Б с жесткостями  $K_2$  и  $K_2$ , движущуюся под действием сил  $Q_{дин}$  и  $T_{реакт}$ . Опора А принята условно жесткой в виду наличия неуправляемых зазоров в механических соединениях, в том числе в опоре (при ослаблении крепежа) с учетом возможного износа механических соединений и гарантированных зазоров. Очевидно, что величина фактического положения центра масс редуктора "0" (см. рис. 4) характеризуется величиной упругой податливости  $\Pi^y$ .

Величина  $\Pi^y$  характеризует максимальную величину смещения центра масс "0" и определяется упругой податливостью  $x_{max}^{\Pi}$  в горизонтальной плоскости от воздействия реактивной нагрузки  $T_{реакт}$  со стороны барабана моталки и упругой податливостью  $u_{max}^{\Pi}$  в вертикальной плоскости от величины динамической нагрузки  $Q_{дин}$  со стороны привода:

$$\Pi_{max}^y = \sqrt{x_{max}^2 + u_{max}^2}$$

Можно сделать вывод, что основной задачей является расчет упругих податливостей  $x''$  и  $y''$ . При решении задачи целесообразно использовать метод математического моделирования [8].

Математическая модель данной одномассовой системы представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{T_{реакт}}{m} - \frac{k_z}{m} \cdot x - \frac{c}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \omega^2 \cdot \gamma \cdot \cos\omega t; \\ \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{Q_{дин}}{m} - \frac{k_g}{m} \cdot y - \frac{c}{m} \cdot \frac{dy}{dt} + \omega^2 \cdot \gamma \cdot \sin\omega t; \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{1}{m} \sqrt{x^2 + y^2},$$

где  $c$  - величина допускаемой линейной податливости.

Для решения данной системы уравнений целесообразно использовать метод Рунге-Кутты в программной среде "Mathcad". Решение данной системы уравнений позволяет определить расчетные траектории смещения центра масс "0" редуктора в горизонтальной плоскости (текущая величина  $x''$ ) и в вертикальной плоскости (текущая величина  $y''$ ) в начальный период, т.е. за время разгона электродвигателя, что определяет текущее значение результирующей величины упругой податливости  $P'$ .

В соответствии с выбранной методикой получены результаты, которые характеризуют траекторию смещения центра масс редуктора, как одномассовой системы. На рис. 5 для сравнения приведены траектории смещения центра масс редуктора для режима разгона двигателя (см. рис. 5, а) и режима стабилизации (см. рис. 5, б). Расчетная траектория, приведенная на рис. 5 б, характеризуется минимальным значением величины упругой податливости, которую необходимо обеспечить во время разгона двигателя. Для обоих режимов характерной является эллипсоидная траектория с максимальным значением параметра  $y''_{max}$  на первом витке разгона.

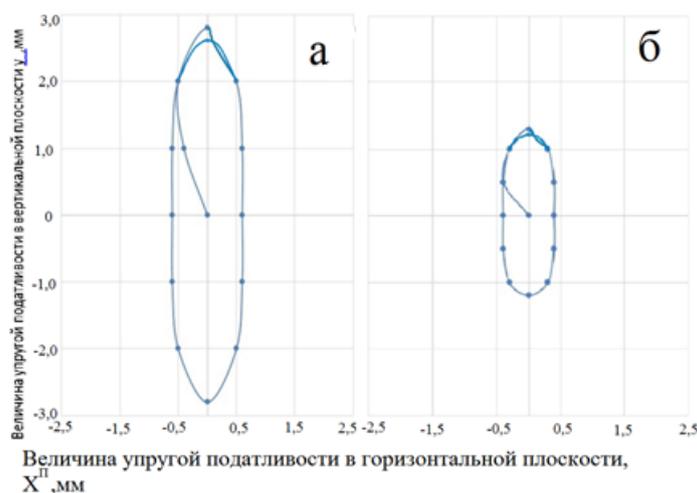


Рис. 5. Расчётная траектория центра масс «0» редуктора:  
а - в период разгона двигателя; б - в период стабилизации двигателя

При максимальном значении нагрузок (режим 1) величина  $y''_{max}$  достигает величина 2,88 мм, при минимальном значении нагрузок (режим 2) 1,26 мм. Коэффициент неравномерности  $k = \frac{y''_{max(1)}}{y''_{max(2)}}$  составляет величину 2,29. В связи со значительной величиной коэффициента неравномерности проведена оценка степени влияния соотношения нагрузок

$Q_{дин}$  и  $T_{реакт}$ . На основе построенной области значений упругой податливости, которая приведена на рисунке 6.

Область построена на основе полученной модели в виде регрессивной зависимости функции отклика (параметр  $P^y$ ) от независимых переменных  $Q_{дин}$  и  $T_{реакт}$ :

$$P^y = 0,28 * Q_{дин}^2 + 0,02 * T_{реакт}^{0,5} + 0,01 * Q_{дин} * T_{реакт}.$$

Полученная модель позволяет определить величину упругой податливости для любых соотношений действующих нагрузок. Проверка по критерию Фишера подтверждает адекватность полученной модели.

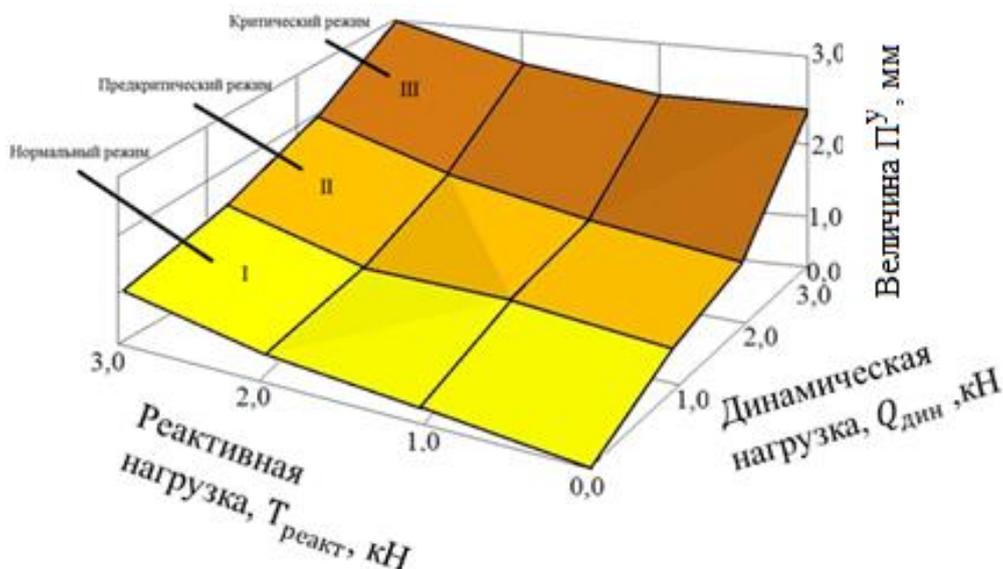


Рис. 6. Критериальная область величин упругой податливости

В полученной области значений  $P^y$  (см. рис. 6) необходимо выделить 3 зоны:

- зона I - нормальный режим;
- зона II - предкритический режим;
- зона III - критический режим.

Нормальный режим характеризуется минимальными значениями  $P^y$  в пределах 0,1-1,2 мм, при этом значения  $Q_{дин}$  составляет не более 1,6 кН,  $T_{реакт}$  не более 3,0 кН. Для предкритического режима величина  $P^y$  находится в пределах 1,3-1,7 мм со значениями нагрузок  $2,3кН \geq Q_{дин} \geq 1,6кН$ ,  $T_{реакт}$  не более 3,0 кН.

Критический режим является опасным при появлении максимальной упругой податливости, достигающей величины 3,0 мм при воздействии критических нагрузок. На рис. 7 приведена зависимость угла смещения валов в зубчатой муфте от величины упругой податливости для трех режимов. Данная зависимость получена с учетом полученных величин  $P^y$  и геометрических размеров ведущего вала редуктора при его соединении с зубчатой муфтой. Для режимов II и III - угол смещения валов выходит за пределы допустимого, что является причиной преждевременного выхода из строя зубчатой муфты.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- величина упругой податливости в большей степени зависит от уровня нагрузки  $Q_{дин}$ , в меньшей - от уровня нагрузки  $T_{реакт}$ ;
- предкритический и особенно критический режимы эксплуатации при определенных значениях действующих нагрузок приводят к неблагоприятному воздействию на показатели работоспособности зубчатой муфты.

В связи с вышеизложенным практическая задача состоит в разработке технических решений, которые обеспечивают снижение уровня упругой податливости редуктора до значений, соответствующих работе привода в период разгона электродвигателя в нормальном режиме (см. рис. 6 и 7).

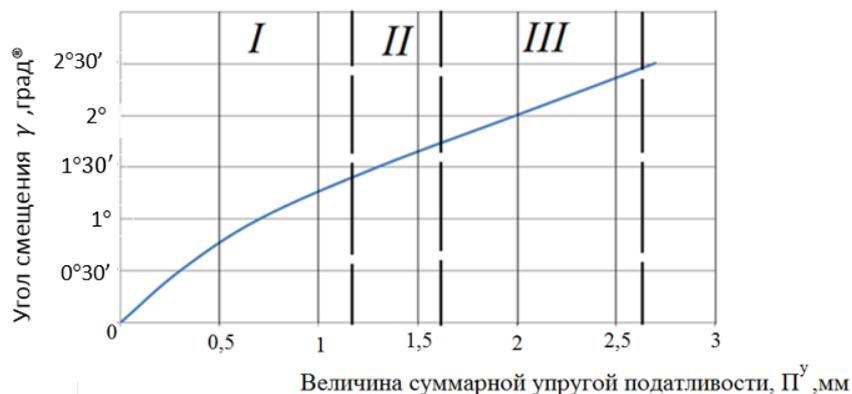


Рис. 7. Зависимость угла смещения концов валов в зубчатой муфте от величины суммарной упругой податливости редуктора:

I - нормальный режим; II - предкритический режим; III - критический режим

Как отмечено выше, величина максимальной упругой податливости редуктора определяется преимущественно динамической нагрузкой  $Q_{дин}$  в период разгона электродвигателя. При этом величина реактивной нагрузки  $T_{реакт}$  зависит от усилия натяжения и связанного с ним момента натяжения при смотке полосы барабаном моталки. Усилие натяжения задается технологической инструкцией, поэтому реактивная нагрузка не может быть снижена. Возникновение значительной динамической нагрузки  $Q_{дин}$  в период разгона двигателя обусловлено, как отмечено выше, наличием условно-жесткой опоры А и условно-податливой опоры, что и приводит к вибрации редуктора и возникновению повышенных значений величины упругой податливости. Поэтому рациональным техническим решением следует считать установку редуктора на двух условно- жестких опорах.

Опоры А и Б приняты условно-жесткими, так как в процессе эксплуатации в механических соединениях в процессе износа, ослабления крепежа появляются неуправляемые зазоры, которые приводят к дополнительной упругой податливости редуктора. Однако учет подобных зазоров достаточно затруднителен, и в работе они не учитываются. С учётом геометрических параметров и величин  $Q_{дин} = G_p = 1,2 \text{ кН}$  и  $T_{реакт} = 1,5 \text{ кН}$  выполнен прочностной расчет с использованием программного продукта Компас 3D (рис.8).

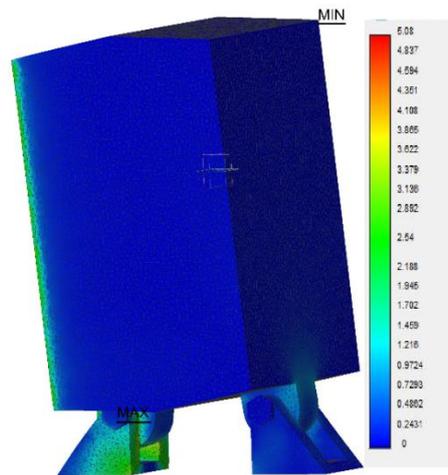


Рис. 8. Результаты расчета напряжений в опорах редуктора в Компас 3D

В соответствии с полученным распределением напряжений максимальная величина для наиболее нагруженной дополнительно введенной опоры составляет не более 2,5 МПа и обеспечивает необходимый уровень и запас прочности.

### Выводы

1. Снижение динамической нагрузки в приводе моталки в период разгона электродвигателя позволяет снизить величину упругой податливости редуктора и повысить надежность элементов привода.
2. Введение дополнительной условно-жесткой опоры редуктора обеспечивает условия работы элементов привода и, прежде всего, зубчатой моторной муфты в нормальном режиме с минимизацией упругой податливости (биения) редуктора в период разгона электродвигателя

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка алгоритма и компьютерной программы для расчета надежности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли / А.П. Жильцов, Д.А. Вишневецкий, В.А. Козачишен, А.В. Бочаров – Текст : непосредственный // Черные металлы.- №11 (1043). - 2018. - с. 277-33.
2. **Цупров, А.Н.** Анализ конструкций узлов намотки моталок тонколистовых прокатных станов / А.Н. Цупров, А.П. Жильцов.- Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований: 2015. - №6-3. - С. – Текст : непосредственный 516-517.
3. **Жильцов, А.П.** Повышение жесткости системы "контропора-барабан" моталки листового стана холодной прокатки / А.П. Жильцов, А.Л. Челядина – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. - 2018. - №3 (37). – С. 46-51.
4. **Костров, Ю.К.** Сравнительный анализ схем приводов технологических агрегатов в условиях ЦДС ПАО "НЛМК" / Ю.К. Костров, А.П. Жильцов – Текст : непосредственный // Повышение эффективности металлургического производства: Сборник тезисов докладов XXVI областной науч.-техн. конференции - Липецк: Издательство ЛГТУ. 2018. – 192 С.
5. **Жильцов, А.П.** Формирование натяжения при намотке полосы в условиях динамического нагружения / А.П. Жильцов, А.А. Харитоненко – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - 2018. - №12 (55) . - С .91-96.

6. **Маслов, Е.А.** Алгоритм обработки информации о натяжении полосы для идентификации вибраций на станах бесконечной прокатки на основе вейвлет-преобразования [Текст] / Е.А. Маслов, К.А. Харахнин, А.В. Кожевников – Текст : непосредственный // Производство проката. - 2010. - №10. - С.36 - 39.

7. ГОСТ 50895-96. Муфтыз убчатые. Технические условия.- Москва: Издательство стандартов, 1997.-26с.

8. Усов,С.В. Математическое моделирование процесса намотки тонкой стальной полосы в рулон / С.В. Усов, В.Н. Мещеряков – Текст : непосредственный // Известия ТулГТУ. Технические науки. - 2014. - Вып.10.4.2 - С.157 -162.

Ключевые слова: полосовая моталка, динамическая нагрузка, вибрация, привод, редуктор.

Сведения об авторах:

Жильцов Александр Павлович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургического оборудования Липецкого государственного технического университета.

Костров Юрий Константинович, студент группы ММО-17-1 Липецкого государственного технического университета

Курило Петр Васильевич, студент группы ММО-17-1 Липецкого государственного технического университета

E-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **ASSESSING THE INFLUENCE OF LOADING CONDITIONS ON THE PERFORMANCE OF THE STRIP COILER DRIVE ELEMENTS ON A CONTINUOUS PICKLING UNIT**

A.P. Zhiltsov, Yu.K. Kostrov, P.V. Kurilo

The factors and negative influences on the elements of the coiler drive are analyzed. The conditions of dynamic loading are considered. Constructive methods on the reduction of vibrations in the drive elements are proposed.

Key words: strip coiler, dynamic load, vibration, drive, reducer.

УДК 621.919

## **ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩЕЕ ПРОТЯГИВАНИЕ СО СМЕЩЕНИЕМ РЕЖУЩИХ КРОМОК ОТНОСИТЕЛЬНО ПОВЕРХНОСТИ РЕЗАНИЯ**

Липецкий государственный технический университет

С.К. Амбросимов, Р.В. Грибков

В статье проведен сравнительный анализ наиболее прогрессивных методов режущего, комбинированного и деформирующе-режущего протягивания. Приведены конструкции с описанием работы инновационных деформирующе-режущих протяжек со смещением режущих кромок относительно поверхности резания.

Протягивание широко применяется для обработки гладких цилиндрических отверстий в условиях массового и крупносерийного производства, при этом используются протяжки с групповой схемой резания и деформирующе-режущие протяжки. Протяжки переменного резания с подъемом на группу зубьев появились в 1956 году.

Схема переменного резания имеет много преимуществ по сравнению с известными ранее. Вспомогательная режущая кромка 1 (рис. 1.) на всех зубьях в группе кроме последнего представляет собой широкую выкружку 2. Это обеспечивает увеличение угла при вершине, ускоренный теплоотвод и снижение износа режущих кромок у вершин. Кроме того увеличивается задний угол на вспомогательной поверхности (поверхности выкружки). Применение протяжек с групповой схемой резания изменило форму сечения срезаемых слоев металла, что повысило производительность в 1,5 раза по сравнению с протяжками с подъемом на каждый зуб за счет уменьшения размеров стружечных канавок и длины инструмента.

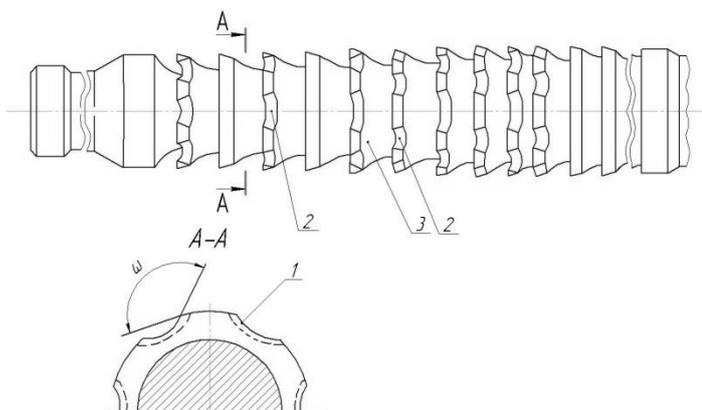


Рис. 1. Протяжка переменного резания.

Однако применение режущих протяжек не обеспечивает требуемых параметров качества при обработке высоколегированных сталей и сплавов, так как она на поверхности отверстия образуются надирь, а протяжки быстро изнашиваются.

Проблему обработки высоколегированных сталей и вязко-пластичных материалов позволяет решить деформирующе-режущее протягивание с опережающим пластическим деформированием (ДРП с ОПД) [1], которое осуществляется инструментом (рис. 2), деформирующий элемент или элементы у которого расположены перед секциями режущих зубьев, то есть перед каждым актом резания осуществляется пластическое деформирование. Глубина механически упрочненного слоя по толщине отверстия зависит от натяга, на деформирующий элемент  $i$  и толщины стенки (радиальной жесткости  $D/d$ ), характеристик обрабатываемого материала и геометрии деформирующего элемента.

Деформирующие зубья более эффективно увеличивают диаметр отверстия, чем режущие, что позволяет уменьшить длину протяжек до 2-х раз и повысить производительность процесса. Деформирующие зубья более равномерно распределяют припуск по периметру режущих зубьев, исправляя форму отверстия. Применение ДРП для обработки вязко-пластичных материалов позволило снизить шероховатость обработанных поверхностей и силы резания до 40% при толщине срезаемого слоя  $a_p$  от 0,02 до 0,07 мм [2, 3, 4, 5]. В процессе выхода деформирующего элемента из отверстия происходит разгрузочный удар. Втулка претерпевает упругую усадку, происходит резкое уменьшение диаметра и падение поверхности отверстия на следом идущий режущий зуб, что приводит к образованию риски и ступеньки на обработанной поверхности. Однако указанные недостатки не умаляют эффективности ДРП с ОПД.

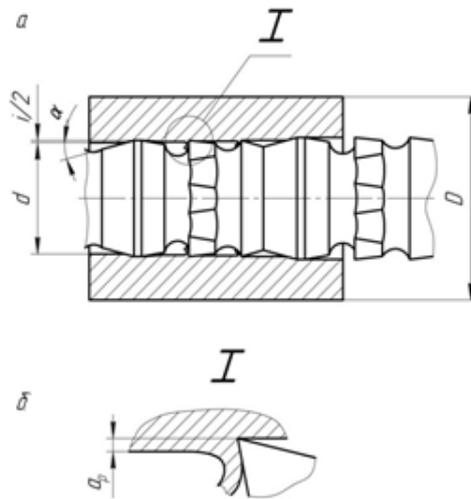


Рис. 2 - Схема ДРП с опережающим пластическим деформированием

Для более прогрессивного метода ДРП с наложением растягивающих напряжений на зону резания и ОПД используются деформирующие элементы с прерывистой рабочей поверхностью, у которых зона деформирования (цилиндрическая ленточка) совмещена с зоной резания, т.е. примыкает к режущей кромке. Это позволяет обеспечить стружкоделение и одновременный выход из отверстия режущей кромки и ленточки деформирующего элемента, таким образом избегаем разгрузочного удара.

В последние годы появились методы лезвийной и абразивной обработки с изменяющимся положением вершины режущей кромки в процессе обработки «с бегущим контактом режущей кромки» [6]. Смещение вершины приводит к одинаковому и равномерному износу всей режущей кромки на участках главной и вспомогательной режущей кромки, так как в процессе обработки они меняются местами. Кроме того, смещение очага деформации по режущей кромке приводит к смещению температурного очага. При скоростном смещении температурного очага режущая кромка не успевает нагреваться в той степени, в которой нагревается вершина при обычном резании без смещения.

Смещение вершин зубьев деформирующе-режущих протяжек можно обеспечить за счет смещения деформирующих элементов относительно режущих [7, 8].

Например, деформирующе-режущая протяжка [9] состоит из деформирующих элементов, которые задними торцами беззазорно примыкают к режущим зубьям. На деформирующих элементах выполнены наклонно расположенные к оси протяжки деформирующие зубья, что обеспечивает вращение деформирующих элементов относительно оправки и режущих зубьев. На задних торцах деформирующих элементов протяжки установлены абразивные бруски, которые при вращении подзатачивают режущие зубья по передней поверхности. Смещение задних торцов деформирующих зубьев относительно передней поверхности режущего зуба и главной режущей кромки приводит к постоянному ее обновлению и снижению износа. Деформирующие зубья деформирующего элемента продавливают на поверхности отверстия пазы, эмитируя прохождение прорезного зуба протяжки с групповой схемой резания, а следующий за ним круглый зуб со сплошной режущей кромкой срезает металл между пазами. Но в отличие от протяжек переменного резания, у которых локально задействована, расположенная против выкружки режущая кромка, деформирующий элемент проделывает винтовые канавки и зона резания постоянно смещается, таким образом активная длина режущей кромки увеличивается вдвое.

Увеличение скорости смещения передней поверхности относительно поверхности резания обеспечивается протяжкой новой конструкции с одновременным вращением режущего зуба и деформирующего элемента в противоположных направлениях относительно друг друга. Это улучшает условия охлаждения и косоугольного резания,

снижая действительные передние и задние углы режущего зуба и, как следствие, повышает стойкость режущих зубьев.

Протяжка содержит чередующиеся деформирующе-режущие элементы 1 (рис. 3), расположенные на оправке 2. На деформирующе-режущем элементе выполнен режущий зуб 3 с кольцевой режущей кромкой, за задней поверхностью которого выполнены наклонно расположенные к оси протяжки деформирующие зубья 4. Причем на каждом следующем деформирующе-режущем элементе деформирующие зубья выполнены под одинаковым, но оппозитно направленным к оси протяжки углом  $\lambda$ . Первым по ходу протяжки устанавливается деформирующий элемент 5 без режущего зуба, деформирующе-режущие элементы установлены на подшипниках скольжения 6, обеспечивающих возможность вращения деформирующе-режущих элементов относительно оси протяжки.

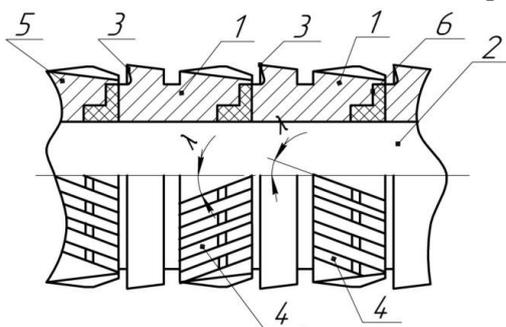


Рис. 3. Деформирующе-режущая протяжка с бегущим контактом режущей кромки относительно поверхности резания

При протягивании протяжки через отверстие, первый деформирующий элемент 5 входит в отверстие заготовки с натягом  $i$  и за счёт наклонно выполненных зубьев начинает вращаться вокруг оси вправо, образуя на внутренней поверхности отверстия многозаходную правую резьбу с образованными выступами и впадинами. Следующий за ним режущий зуб деформирующе-режущего элемента 1 (рис. 4), начинает срезать винтовые выступы в зонах АВ,  $A_1B_1$  и так далее, то есть за счёт такого расположения выступов режущая кромка постоянно смещается относительно поверхности резания.

При входе в зону обработки деформирующих зубьев 4 элемента 1 с левосторонними выступами он начинает вращаться вокруг оси, образуя на поверхности отверстия левую многозаходную резьбу с внутренними выступами и впадинами. При этом режущий зуб элемента 1 тоже вращается влево, обеспечивая еще более быстрое смещение передней поверхности относительно поверхности резания и одновременно косоугольное резание.

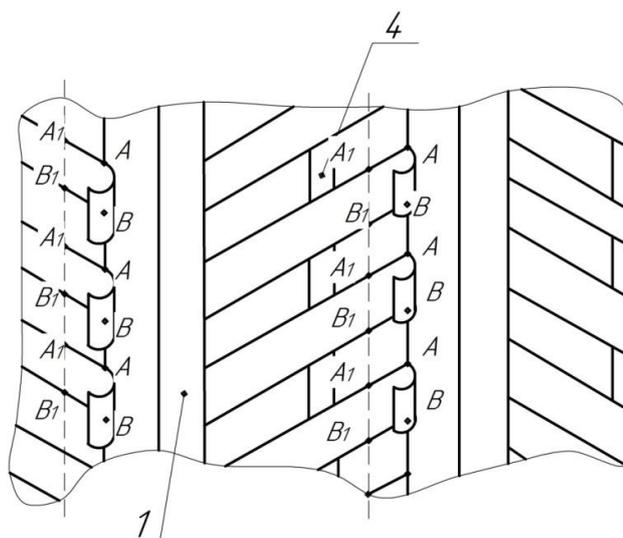


Рис. 4. Развертка внутренней поверхности обрабатываемого отверстия

Таким образом, деформирующие и режущие зубья выполнены заедино на элементе с винтовым и оппозитным угловым расположением деформирующих зубьев к оси протяжки на каждом следующем элементе, что обеспечивает эффективное смещение передней поверхности режущего зуба относительно поверхности резания (повышение скорости бегущего контакта) и условие косоугольного резания, а это значительно повышает стойкость режущих зубьев. Экспериментально установлено, что наиболее рациональный диапазон угла наклона зубьев  $\lambda$  находится в пределах от  $15^0$  до  $25^0$ . При наименьших углах наклона деформирующе-режущий элемент вращается медленно, а при углах, больших  $25^0$ , вращается нестабильно.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Амбросимов, С.К.** Упругопластическое растяжение зоны резания, инновационное направление деформирующе-режущего протягивания / С.К. Амбросимов. – Текст : непосредственный // Ремонт восстановление, модернизация. – 2018. – №3. – С. 38-42.
2. **Амбросимов, С.К.** Снижение сил резания при опережающем пластическом деформировании металлов / С.К. Амбросимов. – Текст : непосредственный // Вестник БГТУ. – 2018. – №7. – С. 13-18.
3. **Амбросимов, С.К.** Улучшение обрабатываемости резанием при предварительном пластическом деформировании металлов / С.К. Амбросимов. – Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. 2018. – №2. – С. 16-22.
4. **Амбросимов, С.К.** Исследование процесса деформирующе-режущего протягивания чугуна / С.К. Амбросимов, А.О. Сырских – Текст : непосредственный // Сборник трудов Международной конференции посвященной 60-летию ЛГТУ. – Липецк : Изд-во ЛГТУ. 2016. – С. 32 – 35.
5. **Амбросимов, С.К.** Проблемы и перспективы использования методов деформирующе-режущего протягивания / С.К. Амбросимов, А.О. Сырских – Текст : непосредственный // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых ученых Т.1. – Курск: Изд-во Университетская книга. – 2016. – С. 136 – 140.
6. **Амбросимов, С.К.** Моделирование кинематики нелинейного обката зубьев при обработке зубчатых колес / С.К. Амбросимов – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016. №5. – С. 102-105.
7. **Амбросимов, С.К.** Методы деформирующе-режущего протягивания и инструменты с упругими деформирующими элементами / С.К. Амбросимов – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2018. – №1. – С. 56-61.
8. **Амбросимов, С.К.** Синтез новых методов деформирующе-режущего протягивания / С.К. Амбросимов // Научный альманах. – 2015. – № 7 (9). – С. 573 – 577.
9. А.С. 1215894 СССР. МПК (51) 23D43/02. Деформирующе-режущая протяжка [Текст] / Кузнецов А.М., Амбросимов С.К., Кузнецов В.А., Уляхин Ю.М.; заявитель и патентообладатель Московский автомеханический институт. – №3764329/25-08 заявл. 28.06.84; опубл. 07.03.86 Бюл. №9.

Ключевые слова: комбинированные протяжки, деформирующе-режущее протягивание.

Сведения об авторах:

Амбросимов Сергей Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Липецкого государственного технического университета.

Грибков Руслан Викторович, студент группы КТМ-п-16.

E-mail: ambask@mail.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **DEFORMING-CUTTING BROACHING WITH CUTTING EDGE DISPLACEMENT AGAINST THE CUTTING SURFACE**

S.K. Ambrosimov, R.V. Gribkov

The article presents a comparative analysis of the most advanced methods of cutting and combined, deforming and cutting broaching. Structures are given describing the operation of innovative deforming-cutting broaches with cutting edge displacement against the cutting surface.

Key words: combined broaching, deforming-cutting broaching.

УДК 672.1: 004.94

### **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТЫХ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА ТИПА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА НА ПРИМЕРЕ ОТЛИВКИ «БИЛО ШРЕДЕРА»**

Липецкий государственный технический университет

А.И. Володин, И.А. Пугачев

В статье излагается разработка технологии термообработки изделий из высокомарганцовистых сталей типа стали Гадфильда с применением системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) LVMFlow на примере отливки «Било шредера».

Применение систем компьютерного моделирования является, де-факто, необходимым этапом при разработке новых технологий или освоении новой номенклатуры продукции. Рассмотрим «ключевые» моменты применения таких систем на примере разработки технологического процесса режима термообработки отливки «Било шредера».

#### **Состояние вопроса**



Рис. 1. Отливки «Било шредера»

«Било шредера» является основной технологической деталью шредера – устройства для измельчения металлолома, горных пород и других твердых материалов для последующей переработки. К материалу и конструкции этой детали предъявляются высокие требования. Материал должен обладать высокой износостойкостью в условиях ударных нагрузок. В настоящее время для производства таких изделий чаще всего применяют высокомарганцовистые стали аустенитного класса, в частности, сталь марки 110Г13Л - она

же сталь Гадфильда. Сталь Гадфильда обладает рядом уникальных свойств, делающим ее незаменимой для изготовления деталей, работа которых сопровождается интенсивным ударно-абразивным износом в условиях больших давлений. К таким деталям относятся, например, гусеничные траки, ковшевые зубья экскаваторов, железнодорожные рельсовые крестовины и в том числе била шредеров. Уникальность свойств стали Гадфильда объясняется ее высокой пластичностью и при этом способностью к деформационному поверхностному упрочнению в условиях трения и ударов, то есть наклепу. Микротвердость стали Гадфильда в процессе трения и ударных нагрузок может возрасти в 3-4 раза и достигать значения 9000-11000 МПа или примерно 500 единиц по шкале Бринелля (НВ) [1]. В то же время сердцевина детали, изготовленной из этого материала, сохраняет относительно низкую твердость - порядка 190-200НВ и высокую ударную вязкость  $KCU=500-700$  кДж/м<sup>2</sup> [2]. При этом данная сталь обладает удовлетворительными литейными свойствами. Микроструктура стали 110Г13Л после литья (рис. 2).

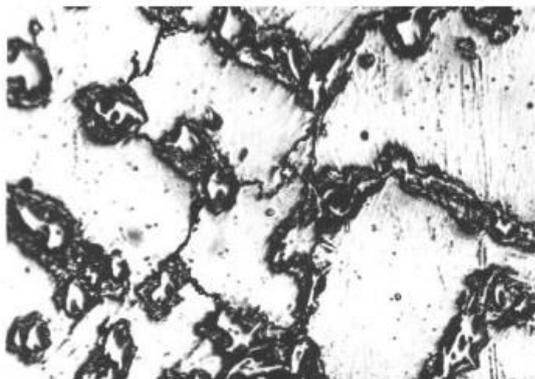


Рис. 2. Микроструктура стали 110Г13Л после литья

На рис. 2 видна аустенитная матрица и карбиды по границам аустенитных зерен. Наличие карбидов в структуре стали Гадфильда нежелательно, так как это приводит к «охрупчиванию» и быстрому разрушению деталей из этих сталей, работающих в условиях ударных нагрузок. Поэтому литые детали из высокомарганцовистых сталей подвергают термической обработке. Термическая обработка стали Гадфильда напрямую зависит от содержания углерода в сплаве. Чем выше уровень углерода, тем выше должна быть температура. Например, если в сплаве содержание углерода находится на уровне 1%, то температура должна быть не ниже 900 градусов. Если концентрация углерода 1,5%, то обработка возможна при 1000 градусов. Если в сплаве углерод находится на уровне 1,6%, то температура должна быть выше 1050 градусов. Высокая температура необходима для полного растворения карбидов и роста аустенитных зерен. Срок выдержки отливки при высоких температурах зависит от ее толщины. Так, толщина в 30 миллиметров требует выдержки в 4 часа, а в 125 миллиметров - в 24 часа [3]. Затем следует закалка в воде. «Типичный» режим термической обработки стали 110Г13Л (рис. 3).

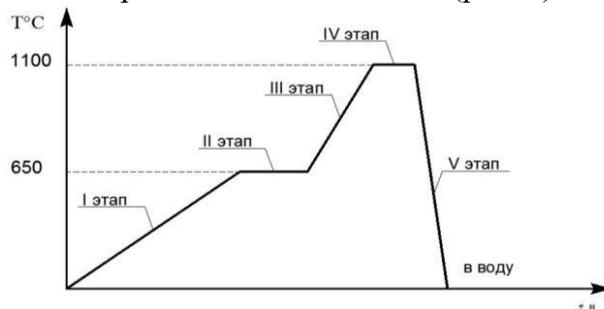


Рис. 3. «Типичный» режим термической обработки стали 110Г13Л

Как следует из рис. 3, процесс термообработки состоит из нескольких этапов: I этап - медленный нагрев отливки до температуры 650-700°C; II этап - изотермическая выдержка для

полного растворения карбидной сетки, длительность которой зависит от толщины и конфигурации отливки; III – этап - скоростной нагрев до температуры закалки 1100–1150°C; IV этап - выдержка при температуре закалки в течение времени, соответствующего толщине и конфигурации отливки для полной гомогенизации аустенитной структуры; V этап – закалка и быстрое охлаждение отливки в воде для фиксации аустенита и предотвращения выделения карбидов. Совершенно очевидно, что такой режим с точки зрения энергетических и временных потерь крайне затратный.

#### **Разработка технологии термообработки**

Нами был разработан режим термообработки стали Гадфильда, основанный на ранней выбивке отливок из литейной формы и закалке в воде или другой охлаждающей среде сразу же непосредственно после выбивки. Режим ранней выбивки отливок из формы широко применяется при литье в кокиль или центробежном литье чугуновых отливок, в частности, гильз цилиндров и «маслот» [4]. При литье в металлическую форму чугуна вследствие быстрого теплоотвода и высокой скорости затвердевания в поверхностном слое отливки образуется «отбел», то есть структурно-свободный цементит высокой твердости. Для устранения «отбела» в таких отливках и применяется режим термообработки, который заключается в следующем - ранняя выбивка затвердевших чугуновых отливок при температурах примерно 750-850°C, складирование отливок в теплоизолированный контейнер и изотермическая выдержка. Под действием оставшегося внутреннего тепла отливок в условиях изотермической выдержки происходит «самоотжиг, то есть распад цементита «отбела».

Цель предлагаемой технологии термообработки стали 110Г13Л, а именно, ранняя выбивка отливки «Било шредера» из литейной формы, противоположна описанной выше. Ранняя выбивка затвердевшей отливки «Било шредера» позволяет отказаться от этапов I-IV (см. рис 2) и «свести» ее к этапу V – закалке. Причем диапазон температур начала закалки может быть значительно расширен - теоретически вплоть до температуры эвтектоидного превращения, когда и начинается формироваться карбидная сетка (см. рис. 2). Однако для практического применения, по нашему мнению, оптимальной является выбивка и последующая закалка при температурах 800°C – 1050°C. Основная сложность предлагаемой технологии это определение момента времени выбивки. Если при литье в металлические формы подобрать требуемый момент выбивки отливки в условиях интенсивного охлаждения не составляет больших трудностей, то при литье массивных отливок в «песчаные» формы, каковой является «Било шредера», в условиях медленного затвердевания и охлаждения, это представляет большие трудности. Слишком ранняя выбивка может привести к высокотемпературной пластической деформации отливки, когда она не успевает достичь необходимой прочности. А слишком поздняя выбивка – к образованию карбидов в структуре. Конечно, проблему можно решить установкой термопар в литейную форму на границе с отливкой в «критических» местах и «снимать» температурную кривую. Однако на практике это трудно осуществить в условиях реального литейного цеха. Более эффективным является применение систем компьютерного моделирования для расчета различных технологических параметров, в том числе температурных полей в отливке. В частности, система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) LVMFlow позволяет сделать это с достаточно высокой точностью [5]. Для этого в этой программе предусмотрена специальная процедура – установка «виртуальных» датчиков. Эти «виртуальные» датчики могут быть установлены в любом месте отливки и формы (рис. 4). Процедура «Задание датчиков» позволяет в процессе моделирования заливки и затвердевания отслеживать поведение расчетных полей (скорости, давления, температуры, скорости охлаждения, доли жидкой фазы) в различных областях отливки. По окончании моделирования записи значений датчиков, такие как функция времени, могут быть визуализированы в виде графиков.

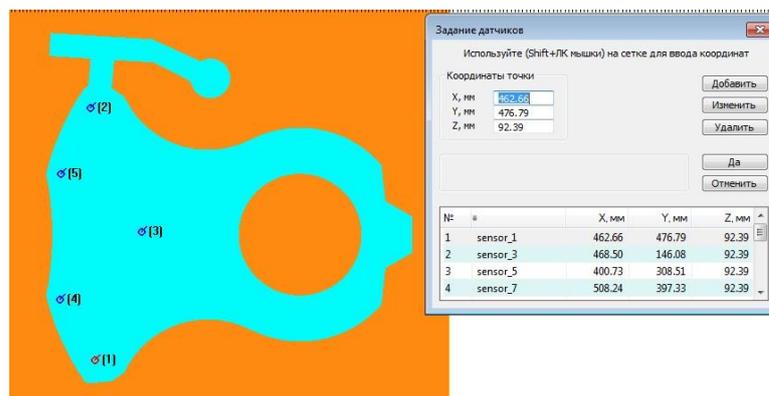


Рис. 4. Места установки «виртуальных» датчиков

Датчики 1, 2, 4, 5 установлены в «критических» «рабочих» местах отливки, где формирование карбидной сетки нежелательно. Датчик 3 установлен в «термическом узле» отливки для фиксации окончания времени ее полного затвердевания, а также для определения максимальной температуры в каждый фиксированный момент времени (рис. 5).

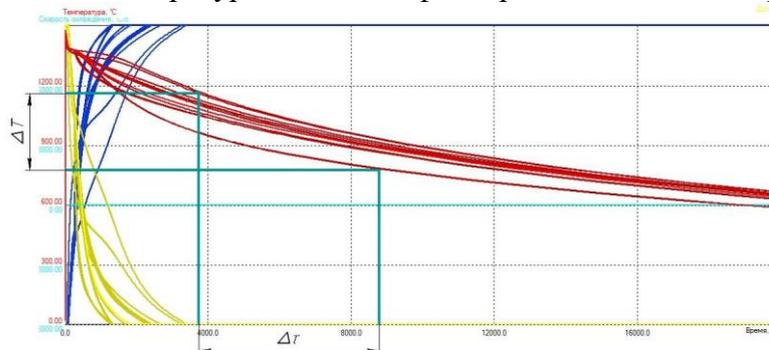


Рис. 5. График изменения температуры,  $T^{\circ}\text{C}$ , и других параметров, как функция времени,  $\tau$ , с

Как видно на графике (рис. 5) температурный диапазон  $\Delta T$  (800–1050°C), при котором следует осуществлять выбивку отливки из формы, находится примерно в интервале времени  $\Delta \tau$  (3600–8800с).

Разработанный режим термообработки отливок из высокомарганцовистых сталей аустенитного класса, основанный на ранней выбивке, позволяет отказаться от длительных и затратных этапов нагрева и изотермической выдержки и свести его только к процедуре закалки сразу после выбивки.

Применение компьютерного моделирования в СКМ ЛП LVMFlow позволяет с достаточной точностью определить диапазон температур и временной интервал, при которых следует осуществлять выбивку и закалку отливок из высокомарганцовистых сталей типа стали Гадфильда.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Давыдов, Н.Г.** Высокомарганцовистая сталь / Н.Г.Давыдов – Минск: Изд-во Металлургия. Выш. шк., 1979. - 176 с. – Текст : непосредственный
2. **Чернышов, Е.А.** Литейные сплавы и их зарубежные аналоги / Е.А. Чернышов. – М: Машиностроение, 2006. – 336 с. – Текст : непосредственный
3. **Лахтин, Ю.М.** Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева – 2-е изд., перераб. и доп., – Москва: Машиностроение, 1980. – 492 с., ил. – Текст : непосредственный
4. **Вейник, А.И.** Литье в кокиль / С.Л. Бураков, А.И. Вейник, Н.П. Дубинин и др. – М: Машиностроение, 1980. 415 с., ил. – Текст : непосредственный

5. LVMFlow [Текст: электронный]: Моделирование литейных процессов. – Режим доступа: www.URL: <http://lvmflow.ru/lvmflow/>

Ключевые слова: сталь Гадфильда, било шредера, термообработка, система компьютерного моделирования.

Сведения об авторах:

Володин Александр Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и процессы машиностроительных производств Липецкого государственного технического университета.

Пугачев Игорь Александрович, доцент кафедры оборудования и процессы машиностроительных производств Липецкого государственного технического университета.

E-mail: [ansar@lipetsk.ru](mailto:ansar@lipetsk.ru)

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

**THE APPLICATION OF COMPUTER MODELING FOR HEAT TREATMENT TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF HIGH MANGANESE AUSTENITE GADFIELD TYPE STEELS ON THE EXAMPLE OF THE *SHREDDER PLANT HAMMER* CASTING**

A.I. Volodin. I.A. Pugachev

The article describes the development of a heat treatment technology for high manganese Gadfield type steel products with the application of the CAE foundry system on the example of the *shredder plant hammer* casting

Keywords: Gadfield steel, shredder plant hammer, heat treatment, computer aided engineering system

---

## ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА

---

УДК 629.08-047.58

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОСЕРВИСНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Липецкий государственный технический университет

И.В. Жилин

В статье рассмотрены особенности имитационного моделирования станции технического обслуживания автомобилей. Представлены блок-схема и листинг программы на языке GPSS/W. Моделирование выявило существенные особенности работы автосервисного предприятия. Они являются следствием случайности процессов возникновения заявок и их обслуживанием. Рассмотрены два варианта функционирования предприятия: исходный и модернизированный. Второй вариант имеет очевидные преимущества по технико-эксплуатационным показателям.

Проведем имитационное моделирование автосервисного предприятия с параметрами, определенными в ходе технологического расчета. Для этого на языке GPSS/W разработаем программу, листинг которой представлен ниже.

```
*****
* Автосервисное предприятие
* Время в минутах
*****
* Сегмент 1
PRI          STORAGE 1          ;Приемка, постов - 1
TOTR         STORAGE 5          ;ТО и ТР, постов - 5
TRV          TABLE M1,60,60,30 ;Таблица общего времени
             GENERATE (Exponential(1,0,56.4)) ;Входящие заявки
             TEST L Q$SYS,120,Otkaz ;Проверка очереди по длине
             QUEUE SYS          ;Время в системе
             QUEUE OCH1         ;Время ожидания приемки
             ENTER PRI          ;Вход на приемку
             DEPART OCH1        ;Окончание ожидания в очереди
             ADVANCE 40,15      ;Обслуживание заявки на приемке
             LEAVE PRI          ;Освобождение приемки
             QUEUE OCH2         ;Время ожидания ТО и ТР
             ENTER TOTR         ;Вход на ТО и ТР
             DEPART OCH2       ;Окончание ожидания в очереди
             ADVANCE (Exponential(1,0,228)) ;Обслуживание заявки на ТО и ТР
             LEAVE TOTR        ;Освобождение приемки
             DEPART SYS        ;Выход из системы
             TABULATE TRV       ;Табулирование общего времени
Otkaz        TERMINATE         ;Удаление транзакта (заявки)
*****
* Сегмент 2
             GENERATE 219600,,1
             TERMINATE 1
*****
```

Рис. 1. Листинг программы

Программа состоит из двух сегментов.

Первый сегмент (Рис. 2) моделирует работу автосервисного предприятия с одним постом приемки (PRI) и пятью постами ТО и TP (TOTR). Для отслеживания общего времени нахождения заявки на ТО и TP в автосервисном предприятии введена табулированная переменная TRV.

Для генерирования потока заявок на ТО и TP используется оператор GENERATE (Exponential(1,0,56.4)). Он позволяет моделировать поток заявок, в котором время между заявками является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Интенсивность потока заявок  $1,1 \text{ час}^{-1}$ . Поскольку время моделирования задано в минутах, то среднее время между заявками задано как 56,4.

В первом сегменте программы организован сбор данных о двух очередях, в которых производится ожидание заявок обслуживания на посту приемки и на постах ТО и TP из-за их занятости. В переменной OCH1 отслеживается время нахождения в очереди перед постом приемки, а в переменной OCH2 – время нахождения в очереди перед постами ТО и TP. Переменная SYS отслеживает общее время нахождения заявки в системе.

Оператор ENTER PRI моделирует вход на приемку, после которого заканчивается ожидание в очереди DEPART OCH1. Оператор ADVANCE 40,15 моделирует работу поста приемки со временем обслуживания  $40 \pm 15$  мин. Окончание обслуживания и покидание поста приемки моделируется оператором LEAVE PRI. Таким образом, пост приемки PRI моделируется набором операторов от ENTER до LEAVE.

Аналогично моделируется работа постов ТО и TP (TOTR). С ними связана очередь OCH2. Время обслуживания на постах распределено по экспоненциальному закону и в среднем составляет 228 мин.

Оператором TABULATE TRV производится заполнение таблицы времени TRV, которое соответствует общему времени нахождения заявки в автосервисном предприятии (в ожидании и под обслуживанием).

Заканчивается сегмент 1 оператором TERMINATE, который удаляет заявку после ее прохождения всех мероприятий в автосервисном предприятии.

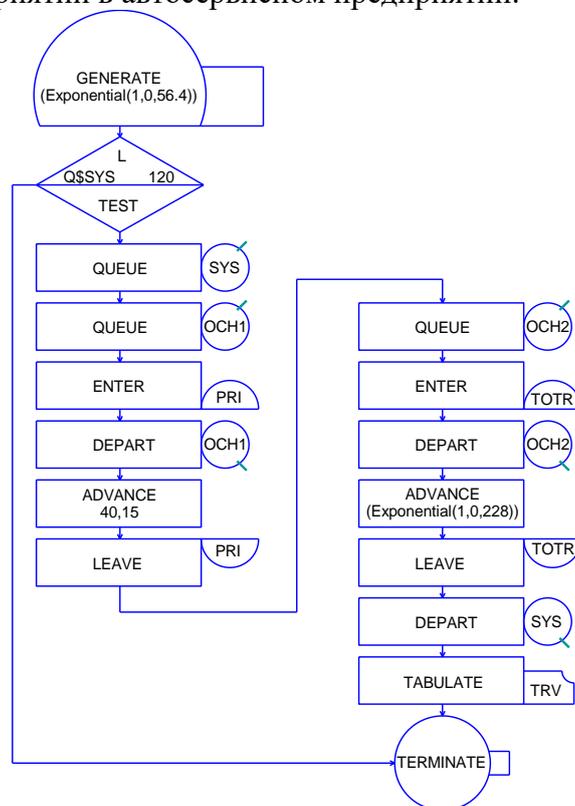


Рис. 2. Блок-схема первого сегмента программы

Второй сегмент служит для моделирования периода работы автосервисного предприятия. Поскольку время задано в минутах, то для принятого режима работы всего имеется

305 дн. × 8 час × 1,5 см × 60 мин = 219600 мин в год.

Для обеспечения большей точности время работы увеличено в десять раз.

Таким образом, во втором сегменте моделируется 1 транзакт, который соответствует 2196000 минутам работы предприятия.

В процессе выполнения представленной программы получен отчет, в котором отображены основные показатели смоделированной работы автосервисного предприятия.

GPSS World Simulation Report - Автосервисное предприятие.1.1

| START TIME | END TIME    | BLOCKS | FACILITIES | STORAGES |
|------------|-------------|--------|------------|----------|
| 0.000      | 2196000.000 | 18     | 0          | 2        |
| NAME       | VALUE       |        |            |          |
| OCH1       | 10004.000   |        |            |          |
| OCH2       | 10005.000   |        |            |          |
| OTKAZ      | 16.000      |        |            |          |
| PRI        | 10000.000   |        |            |          |
| SYS        | 10003.000   |        |            |          |
| TOTR       | 10001.000   |        |            |          |
| TRV        | 10002.000   |        |            |          |

| LABEL | LOC | BLOCK TYPE | ENTRY COUNT | CURRENT COUNT | RETRY |
|-------|-----|------------|-------------|---------------|-------|
|       | 1   | GENERATE   | 38988       | 0             | 0     |
|       | 2   | TEST       | 38988       | 0             | 0     |
|       | 3   | QUEUE      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 4   | QUEUE      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 5   | ENTER      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 6   | DEPART     | 38988       | 0             | 0     |
|       | 7   | ADVANCE    | 38988       | 0             | 0     |
|       | 8   | LEAVE      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 9   | QUEUE      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 10  | ENTER      | 38988       | 0             | 0     |
|       | 11  | DEPART     | 38988       | 0             | 0     |
|       | 12  | ADVANCE    | 38988       | 5             | 0     |
|       | 13  | LEAVE      | 38983       | 0             | 0     |
|       | 14  | DEPART     | 38983       | 0             | 0     |
|       | 15  | TABULATE   | 38983       | 0             | 0     |
| OTKAZ | 16  | TERMINATE  | 38983       | 0             | 0     |
|       | 17  | GENERATE   | 1           | 0             | 0     |
|       | 18  | TERMINATE  | 1           | 0             | 0     |

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY (0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------|-----|-------|-------|-----------|------------|-----------|-----------|-------|
| SYS   | 38  | 5     | 38988 | 0         | 7.778      | 438.110   | 438.110   | 0     |
| OCH1  | 16  | 0     | 38988 | 11383     | 0.874      | 49.204    | 69.493    | 0     |
| OCH2  | 31  | 0     | 38988 | 18000     | 2.143      | 120.706   | 224.228   | 0     |

| STORAGE | CAP. | REM. | MIN. | MAX. | ENTRIES | AVL. | AVE. C. | UTIL. | RETRY | DELAY |
|---------|------|------|------|------|---------|------|---------|-------|-------|-------|
| PRI     | 1    | 1    | 0    | 1    | 38988   | 1    | 0.709   | 0.709 | 0     | 0     |
| TOTR    | 5    | 0    | 0    | 5    | 38988   | 1    | 4.053   | 0.811 | 0     | 0     |

| TABLE | MEAN    | STD. DEV. | RANGE    |        | RETRY FREQUENCY | CUM. %     |
|-------|---------|-----------|----------|--------|-----------------|------------|
| TRV   | 438.087 | 312.340   |          |        | 0               |            |
|       |         |           | -        | 60.000 |                 | 685 1.76   |
|       |         |           | 60.000   | -      | 120.000         | 3204 9.98  |
|       |         |           | 120.000  | -      | 180.000         | 4043 20.35 |
|       |         |           | ...      |        |                 |            |
|       |         |           | 1680.000 | -      | 1740.000        | 35 99.69   |
|       |         |           | 1740.000 | -      | -               | 122 100.00 |

Из полученных данных видно, что в систему в год входит 3900 заявок. Все они были обслужены (находились в автосервисном предприятии) в среднем за 438,087 мин.

Моделирование выявило существенные особенности работы автосервисного предприятия. В среднем в очереди перед постом приемки скапливаются 0,874 автомобилей, которые ожидают 49,204 мин, что вполне допустимо. С нулевым ожиданием на приемку поступают 28,5% автомобилей, а остальным приходится ожидать различное время в очереди. Максимальная длина очереди на приемку составила 16 автомобилей.

Еще более острой складывается ситуация с ожиданием обслуживания на постах ТО и ТР. С нулевым ожиданием на посты ТО и ТР поступает 46,2% автомобилей, что неплохо. В среднем в очереди на эти посты находятся 2,143 автомобиля, но максимальная длина очереди – 31 автомобиль. В среднем в очереди необходимо находиться 120,705 мин.

Не исключено, что имеются периоды времени, которые также характеризуются большими очередями с количеством автомобилей от среднего значения до максимального. Информация об этом не отражается в отчете.

В среднем в автосервисном предприятии в ожидании и под обслуживанием находится 7,778 автомобилей. Однако имеется пиковый период, когда количество автомобилей составляет 38 автомобилей.

Изменение количества автомобилей в очередях и в системе в целом видно на графиках (Рис. 3).

Время нахождения автомобилей в автосервисном предприятии можно представить графически (Рис. 4).

Несмотря на имеющиеся очереди, пост приемки в среднем функционирует как 0,709 поста, т.е. 70,9% времени, а остальное время простаивает без заявок. С постами ТО и ТР дела обстоят несколько лучше. В среднем работают 4,052 поста из 5, т.е. мощности используются на 81,0%. Такое недоиспользование объясняется простоями постов в ожидании заявок на ТО и ТР.

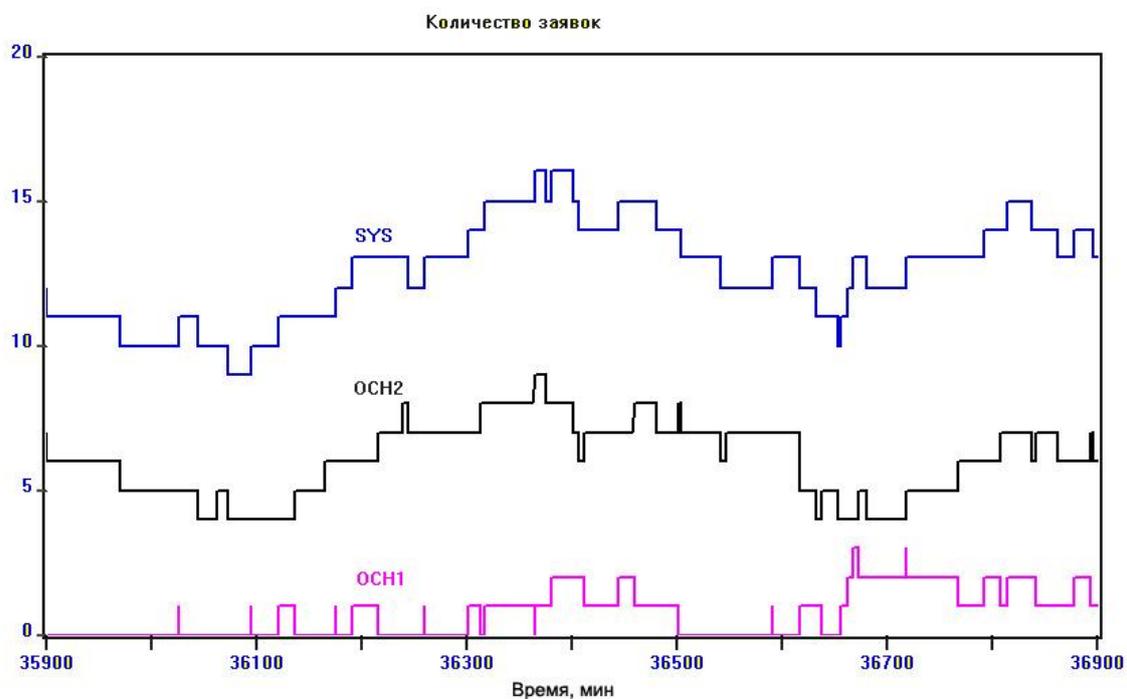


Рис. 3. Функционирования автосервисного предприятия

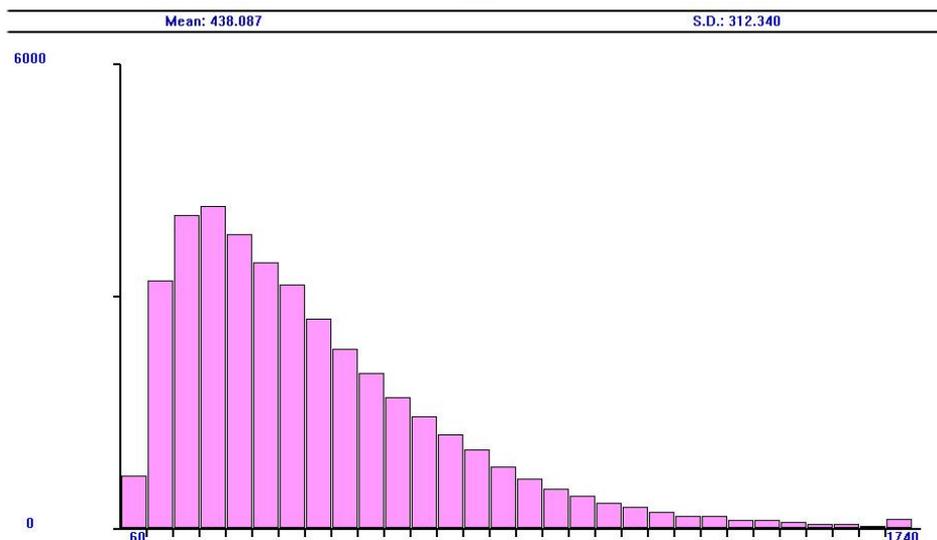


Рис. 4. Гистограмма времени нахождения автомобилей на предприятии

Выявленные особенности функционирования автосервисного предприятия являются следствием случайности процессов возникновения заявок и их обслуживанием.

Модель функционирования автосервисного предприятия необходимо изменить так, чтобы она больше соответствовала реальной ситуации.

Во-первых, клиенты вряд ли будут ожидать обслуживания в длинных очередях. Это касается как ожидания приемки, так и ожидания ТО и ТР. Увидев текущую ситуацию на предприятии и оценив время ожидания, клиент может принять решение не ждать и покинуть автосервисное предприятие не обслуженным. Чем чаще ситуации с перегрузкой заявками системы, тем больше случаев отказа клиентов от обслуживания. Отказ может также исходить от сотрудников предприятия, которые не видят в текущее время быстрого обслуживания заявки.

Во-вторых, большие очереди перед приемкой и перед ТО и ТР, а также большое общее число автомобилей в системе, требуют большого количества мест для ожидания. Количество таких мест, как правило, лимитировано.

Поэтому в модель был изначально введен оператор проверки общего количества заявок в системе  $TEST\ L\ QSSYS, 120, Otkaz$ . В нем проверяется условие  $QSSYS < 120$  и если оно выполняется, то текущая заявка завершает свое движение по системе и переходит к оператору с меткой *Otkaz*. Предельное значение 120 было намерено взято так, чтобы ограничений не происходило.

Ограничим общее количество автомобилей в автосервисном предприятии, которое не может быть больше 12. При этом один автомобиль может находиться на приемке, пять – на постах ТО и ТР, остальные на местах ожидания. Промоделируем процесс функционирования автосервисного предприятия и проанализируем полученные результаты.

Всего было обслужено 96,6% поступивших заявок. Т.е. применительно к году работ из 3900 заявок обслужено только 3766 заявок, а 134 заявки не обслужены. Пост приемки работал на 0,678 своих возможностей (67,8%), а из пяти постов ТО и ТР в среднем работало только 3,866 поста (77,3%). Т.е. показатели постов ухудшились.

С другой стороны снизились задержки в очередях. Средняя длина очереди перед приемкой составила 0,654, а максимальная – 9. В среднем на приемку ожидание составило 38,541 мин. Средняя длина очереди перед постами ТО и ТР составила 0,888, а максимальная – 7. В среднем на ТО и ТР ожидание составило 52,311 мин.

Максимум в системе находилось 12 автомобилей (в соответствии с ограничениями), а в среднем – 6,086. В среднем автомобили, вошедшие в систему, пробыли в ней 358,653 мин, что существенно меньше, чем при работе без ограничений ожидания.

Для того чтобы выполнить запланированный объем работ в 3900 ТО и ТР, необходимо, чтобы увеличился поток заявок. Это может произойти при более интенсивной рекламе. Требуемый объем работ обеспечивается при увеличении интенсивности потока заявок на 6,3%. При этом в систему вошло 94,33% из всех 4135 поступивших заявок.

По сравнению с вариантом без ограничений ожидания произошли некоторые изменения.

Среднее время нахождения заявки в автосервисном предприятии снизилось и составило 374,340 мин. В среднем в очереди перед постом приемки скапливаются 0,757 автомобилей, которые ожидают 42,756 мин, что вполне допустимо. С нулевым ожиданием на приемку поступают 30,1% автомобилей, а остальным приходится ожидать различное время в очереди. Максимальная длина очереди на приемку составила 9 автомобилей.

С нулевым ожиданием на посты ТО и ТР поступает 51,2% автомобилей, что неплохо. В среднем в очереди на эти посты находятся 1,122 автомобиля, а максимальная длина очереди – 7 автомобилей. В среднем в очереди необходимо находиться 63,341 мин.

В среднем в автосервисном предприятии в ожидании и под обслуживанием находится 6,629 автомобилей, а максимально – 12 автомобилей.

Относительная пропускная способность поста приемки составила 0,707, а постов ТО и ТР – 0,809. Это несколько ниже, чем у сравниваемого варианта.

Примем, что рассмотренный вариант функционирования автосервисного предприятия является базовым. Проверим, как при таком потоке заявок и структуре автосервисного предприятия можно повысить эффективность деятельности.

Предварительные расчеты показывают, что благоприятно действует уменьшение разброса времени приемки. Можно предполагать, что сокращение самого времени приемки также улучшит показатели эффективности работы.

Примем, что в результате организационно-технических мероприятий время приемки вместо  $40 \pm 15$  мин составило  $35 \pm 5$  мин. Промоделируем работу системы с этими данными.

Теперь из всех поступающих заявок в систему входит 95,1%. Т.е. если принять неизменным общее количество заявок, которое равно 4135, в систему войдет 3932 заявок, что на 32 больше.

Время ожидания перед приемкой сократится в среднем до 25,573 мин, а перед ТО и ТР – увеличится до 69,415 мин. В целом же время нахождения автомобиля в автосервисном предприятии снизится до 357,929 мин. Коэффициент использования мощности постов ТО и ТР увеличится до 0,812.

Аналогично можно ожидать улучшение показателей функционирования предприятия при снижении среднего времени ТО и ТР. Примем, что в результате организационно-технических мероприятий время ТО и ТР уменьшилось на 5% до 217 мин и промоделируем работу автосервисного предприятия.

Анализ полученных данных показывает на улучшение работы предприятия. Так обслуживаются 96,3% заявок, что означает увеличение абсолютной величины обслуженных заявок до 3983.

Среднее время нахождения заявки в автосервисном предприятии снизилось и составило 334,088 мин. В среднем в очереди перед постом приемки скапливаются 0,491 автомобилей, которые ожидают 27,221 мин. С нулевым ожиданием на приемку поступают 37,4% автомобилей. Максимальная длина очереди на приемку составила 9 автомобилей.

С нулевым ожиданием на посты ТО и ТР поступает 54,2% автомобилей. В среднем в очереди на эти посты находятся 0,993 автомобиля, а максимальная длина очереди – 7 автомобилей. В среднем в очереди необходимо находиться 55,027 мин.

В среднем в автосервисном предприятии в ожидании и под обслуживанием находится 6,027 автомобилей, а максимально – 12 автомобилей.

Относительная пропускная способность поста приемки составила 0,631, а постов ТО и ТР – 0,782. Т.е. загрузка постов снизилась. Это создает возможности для дальнейшего увеличения потока заявок.

Сравним последний рассмотренный вариант (предлагаемый) с базовым вариантом. Для наглядности сделаем это в табличной форме.

Таблица 1

Сравнительный анализ вариантов функционирования предприятия

| №  | Наименование  | Ед. изм. | Базовый | Предлагаемый |
|----|---|----------|---------|--------------|
| 1  | Среднее время между заявками (экспоненциальное распределение)   | мин      | 53      | 53           |
| 2  | Количество постов приемки                                       |          | 1       | 1            |
| 3  | Среднее время приемки   | мин      | 40±15   | 35±5         |
| 4  | Количество постов ТО и ТР                                       |          | 5       | 5            |
| 5  | Среднее время ТО и ТР (экспоненциальное распределение)          | мин      | 228     | 217          |
| 6  | Количество поступивших заявок                                   |          | 4135    | 4135         |
| 7  | Количество обслуженных заявок                                   |          | 3900    | 3983         |
| 8  | Доля обслуженных заявок   | %        | 94,3    | 96,3         |
| 9  | Средняя длина очереди на приемку                                |          | 0,757   | 0,491        |
| 10 | Среднее время ожидания приемки                                  | мин      | 42,8    | 27,2         |
| 11 | Доля заявок с нулевым ожиданием приемки                         | %        | 30,1    | 37,4         |
| 12 | Максимальная длина очереди на приемку                           |          | 9       | 9            |
| 13 | Относительная пропускная способность поста приемки              |          | 0,707   | 0,631        |
| 14 | Средняя длина очереди на ТО и ТР                                |          | 1,112   | 0,993        |
| 15 | Среднее время ожидания приемки                                  | мин      | 63,3    | 55,0         |
| 16 | Доля заявок с нулевым ожиданием приемки                         | %        | 51,2    | 54,2         |
| 17 | Максимальная длина очереди на приемку                           |          | 7       | 7            |
| 18 | Относительная пропускная способность постов ТО и ТР             |          | 0,809   | 0,782        |
| 19 | Среднее количество автомобилей в автосервисном предприятии      |          | 6,6     | 6,0          |
| 20 | Максимальное количество автомобилей в автосервисном предприятии |          | 12      | 12           |
| 21 | Среднее время нахождения автомобиля в автосервисном предприятии | мин      | 374,3   | 334,1        |

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жилин, И.В.** Программирование элементов случайных процессов при имитационном моделировании / И.В. Жилин. – Текст : непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте ПТТ'2018 : материалы I международной научно-практической конференции, 12-13 декабря 2018 г. В 2 т.

Т. 1. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2018. – С.39-43.

2. **Долгополов, Н.В.** Учет случайных факторов при исследовании производственных процессов / Н.В. Долгополов, И.В. Жилин. – Текст : непосредственный // Транспорт. Тенденции развития современной науки : материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. В 2 ч. Ч. 1. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2018. – 199 с.

3. **Ткаченко, М.С.** Особенности применения моделирования в автотранспортном комплексе / М.С. Ткаченко, И.В. Жилин. – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов ЛГТУ. Ч.2. - Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016.-С.316-318.

Ключевые слова: имитационное моделирование, GPSS, автосервисное предприятие.

Сведения об авторах:

Жилин Игорь Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления автотранспортом Липецкого государственного технического университета.

E-mail: zhilniv@mail.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **SIMULATION OF CAR SERVICE STATION OPERATION**

I.V. Zhilin

Peculiarities of car service station simulation are considered. The GPSS/W block diagram and listing of the program are presented. The simulation revealed the essential operational features of a car service enterprise. They result from the randomness of the ordering processes of and the service of orders. Two variants of the enterprise operation are considered: initial and modernized. The second option has obvious advantages according to the performance indicators.

Key words: simulation, GPSS, car service station.

УДК 656.02

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО АВТОБУСНОГО МАРШРУТА В ANYLOGIC**

Липецкий государственный технический университет

А.В. Гринченко, Т.Р. Антонова

В статье рассматривается сочетание агентного и дискретно-событийного подходов к имитационному моделированию городского автобусного маршрута с использованием программы Anylogic. Разработанная модель отдельного маршрута может служить основой для моделирования всей маршрутной сети города. Результаты работы могут использоваться предприятиями и организациями для оптимизации параметров работы городского транспорта.

Проблемы совершенствования функционирования городского общественного транспорта, повышения качества транспортного обслуживания населения в городах в настоящее время остаются актуальными. Пути и методы решения этих проблем с помощью преимущественно аналитических инструментов решения предлагались ранее в работах [3, 4, 7, 8, 9]. В связи с развитием информационных технологий появилась возможность решения важных задач в области пассажирских перевозок на основе создания «цифровых двойников» соответствующих процессов и систем. Такой подход базируется на проектировании и разработке имитационных моделей, аналогичных реальным процессам или системам, с помощью соответствующего программного обеспечения. Создание таких моделей позволяет безопасно с точки зрения состояния реальной системы или процесса проводить эксперименты над ними в виртуальном пространстве с целью оптимизации параметров их функционирования. В качестве среды разработки для модели, представленной в статье, была выбрана наиболее популярная в настоящее время программа для разработки имитационных моделей Anylogic [5]. Предпосылки создания модели основаны на успешном опыте проектирования подобных моделей, представленных в работах [2, 6, 10, 11, 12].

В качестве объекта исследования был выбран городской автобусный маршрут № 22, обслуживаемый МУП «Липецкпассажиртранс». В разработанной модели представлена имитация работы маршрута с начала выхода автобусов на линию и до окончания периода утренних часов пик (с 5 ч до 9 ч). Автобусы перемещаются в ГИС пространстве модели по территории г. Липецка в соответствии с трассой маршрута с остановками в промежуточных остановочных пунктах и стоянками на конечных станциях маршрута.

На каждый остановочный пункт маршрута с определенной периодичностью подходят пассажиры. В момент прибытия автобуса на остановку происходит высадка и посадка пассажиров в автобус. В случае отсутствия свободных мест в автобусе происходит отказ пассажирам в поездке.

Для решения данной задачи необходимо последовательно выполнить следующие действия:

1. Задать месторасположение МУП «Липецкпассажиртранс», промежуточных и конечных остановок маршрута на ГИС карте, а также маршрутную сеть автодорог.
2. Создать популяцию агентов – автобусы и задать их начальное месторасположение на карте в МУП «Липецкпассажиртранс».
3. Создать базу данных для моделирования, в которую можно вносить информацию о количестве выходов на линию, интервале движения автобусов, вместимости автобусов, времени простоя автобусов на промежуточных и конечных остановках маршрута.
4. Задать логику работы автобусов на маршруте в виде диаграммы состояний (используется агентное моделирование), где определены возможные состояния автобусов в модели и заданы условия перехода из одного состояния в другое.
5. Задать процесс появления пассажиров на каждой из остановок маршрута в прямом и обратном направлениях (используется дискретно-событийное моделирование).
6. Связать диаграмму состояний популяции агентов – автобусов с диаграммами появления пассажиров на каждой остановке маршрута для имитации процесса посадки и высадки пассажиров при прибытии автобуса на каждую остановку маршрута.
7. Создать событие, которое обеспечивает начало работы автобусов на маршруте и их последовательный выход на линию с заданным интервалом.
8. Задать функции для определения пассажиропотока по перегонам маршрута в прямом и обратном направлениях в каждом подвижном составе, количества отказов в поездке на каждой остановке маршрута.
9. Определить общее количество перевезенных пассажиров и количество отказов в поездке на маршруте за моделируемое время.

В среде разработки AnyLogic вначале необходимо создать новую модель. Затем добавить в модель агентов: одиночного агента (МУП «Липецкпассажиртранс») и популяции агентов (автобусы и остановки), потом поместить их в пространство, заданное картой ГИС.

Создать интегрированную базу данных (БД) в AnyLogic для считывания исходных данных или создать такую базу в Excel, а затем импортировать ее в AnyLogic. Это стандартные операции, необходимые для разработки имитационной модели в AnyLogic [1].

Диаграмма состояний агента – автобуса представлена на рис. 1.

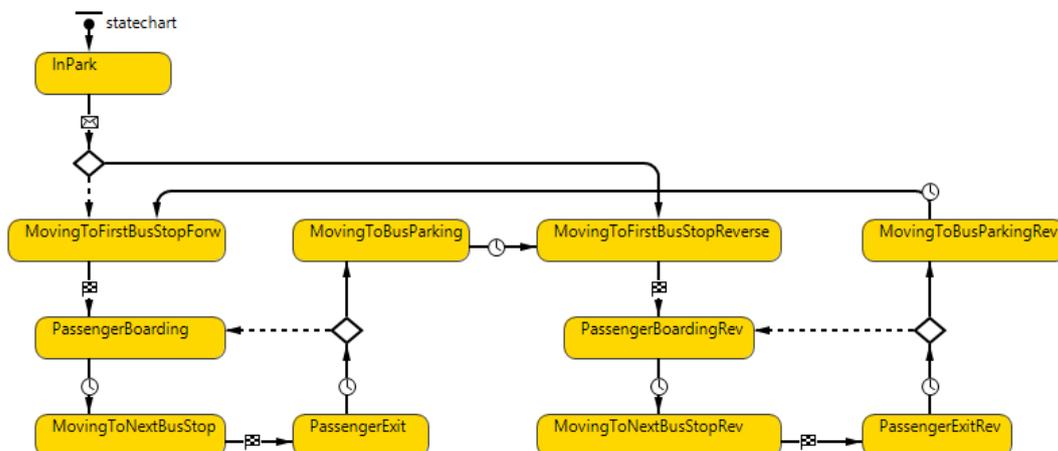


Рис. 1. Диаграмма состояний агента – автобуса

Первоначальное состояние автобуса – нахождение в парке МУП «Липецкпассажиртранс» (InPark). Выходит из этого состояния автобус при получении сообщения «На линию» в результате срабатывания циклически повторяющегося события onLine, которое имитирует процесс выпуска автобуса на линию с заданным интервалом. Далее идет ветвление, которое направляет необходимое количество выходов либо на начальную остановку прямого маршрута (ост. НЛМК), (переход в состояние MovingToFirstBusStopForw), либо на начальную остановку обратного маршрута (ост. Р-н Университетский), (переход в состояние MovingToFirstBusStopReverse).

По прибытии автобуса на начальную остановку прямого маршрута (ост. НЛМК) агент переходит в состояние посадки пассажиров в салон автобуса (PassengerBoarding). В этом состоянии автобус задерживается на заданное время и переходит в состояние движения к следующей остановке прямого маршрута (MovingToNextBusStop). По прибытии на остановку автобус переходит в состояние высадки пассажиров из автобуса. Время нахождения в этом состоянии считывается из БД. Затем проверяется условие: является ли эта остановка промежуточной или конечной? Если остановка промежуточная, то автобус переходит в состояние посадки пассажиров в салон автобуса (PassengerBoarding) и процесс циклически повторяется. Если остановка конечная, то автобус переходит в состояние движения к месту стоянки (MovingToBusParking) и находится на стоянке заданное время. По истечении времени отстоя автобуса на конечной остановке маршрута автобус движется к первой остановке обратного маршрута (состояние MovingToFirstBusStopReverse) и далее выполняется аналогичный процесс движения автобуса в обратном направлении.

Процесс прибытия пассажиров на каждую остановку маршрута и их высадка/посадка в автобус имитируется с помощью стандартных блоков Библиотеки моделирования процессов [1]. Фрагмент имитации этого процесса представлен на рис. 2.

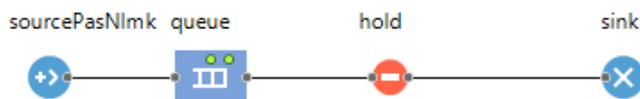


Рис. 2. Фрагмент диаграммы, имитирующий прибытие пассажиров на каждую остановку маршрута

Здесь блок source имитирует прибытие пассажиров на каждую остановку маршрута с заданной интенсивностью, определенной в результате натурных обследований остановочных пунктов маршрута. Далее создается очередь из пассажиров queue, ожидающих прибытия автобуса на остановку.

По прибытии автобуса на заданную остановку элементом диаграммы состояний автобуса PassengerBoarding (рис. 1) соответствующему блоку диаграммы моделирования процессов hold передается команда на разблокировку объекта hold (команда main.hold.unblock()). В результате выполнения этой команды объект hold разблокируется, и имитируется посадка пассажиров из очереди на посадку queue в автобус. Затем заявки-пассажиры перемещаются в объект sink. Объект sink используется в качестве конечного блока диаграммы процесса. Кроме того, в объекте sink выполняется подсчет садящихся в автобус пассажиров.

При выходе автобуса из состояния PassengerBoarding (рис. 1), выполняются следующие действия для каждой остановки маршрута:

- 1) main.hold.block();
- 2) calcPassengerFlow();
- 3) calcNumberOfRefusalsToTravel();
- 4) main.amountPassCarriedForw += main.numberOfPasOnBusstop - numberOfRefusalsToTravel;
- 5) main.amountOfRefusalsToTravelForw += numberOfRefusalsToTravel;
- 6) main.numberOfPasOnBusstop = 0.

Первое действие обратно блокирует объект hold (рис. 2) после отправления автобуса с пассажирами от остановки. И процесс прибытия и накопления пассажиров на остановке маршрута возобновляется до прибытия следующего автобуса на эту остановку.

Второе действие вызывает функцию calcPassengerFlow(), которая выполняет расчет пассажиропотока в автобусе между остановками маршрута.

Третье действие вызывает функцию calcNumberOfRefusalsToTravel(), которая выполняет расчет количества отказов пассажирам в поездке из-за отсутствия свободных мест в салоне автобуса на остановке маршрута.

Четвертое действие выполняет подсчет общего количества перевезенных пассажиров amountPassCarriedForw за время имитации работы маршрута.

Пятое действие выполняет подсчет общего количества отказов пассажирам в поездке из-за отсутствия свободных мест в салоне автобуса amountOfRefusalsToTravelForw за время имитации работы маршрута.

Шестое действие обнуляет количество пассажиров, ожидающих автобус на остановке маршрута, после его отправления.

Количество выходящих пассажиров на каждой остановке маршрута задается переменной numberOfExitPassenger, значение которой определяется равномерным дискретным распределением uniform\_discr(x, y).

На рис. 3 показан фрагмент имитации движения автобусов по маршруту № 22 г. Липецка в процессе работы модели. На рис. 4 представлена информация о времени выполнения рейсов (выход № 4 маршрута № 22). Таким образом, за модельное время выход № 4 совершил один рейс в прямом направлении (amountForwardRoute) и один рейс в обратном направлении (amountReverseRoute), количество оборотов (amountRevolutions) равно 1. Время рейса в прямом направлении (timeOfForwardRoute) равно 52,36 мин, в обратном направлении (timeOfReverseRoute) – 52,42 мин.

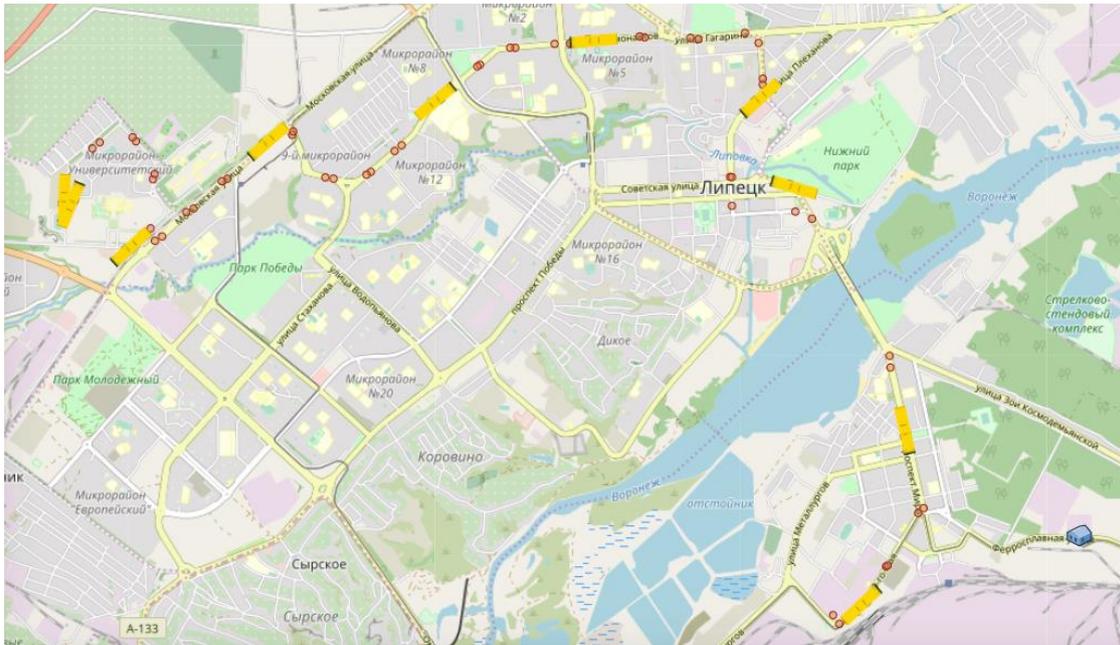


Рис. 3. Имитация движения автобусов по маршруту № 22

|                               |                         |                               |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| timeOfForwardRoute<br>52.358  | amountForwardRoute<br>1 | timeOfReverseRoute<br>52.423  |
| beginingOfForRoute<br>190.563 | amountReverseRoute<br>1 | beginingOfRevRoute<br>132.516 |
| endOfForRoute<br>0            | amountRevolutions<br>1  | endOfRevRoute<br>184.94       |

Рис. 4. Информация о времени выполнения рейсов (выход № 4)

Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что в базовом варианте (количество выходов на линию 10 ед., интервал движения 13 мин) общее количество перевезенных пассажиров в прямом направлении за модельное время составило 2074 чел., в обратном направлении – 1509 чел. Суммарное количество перевезенных пассажиров 3583 чел. Количество отказов в поездке из-за отсутствия свободных мест в автобусе в прямом направлении составило 66 чел., в обратном направлении – 436 чел. Суммарное количество отказов в поездке составило 502 чел.

В ходе проведения экспериментов на разработанной модели было установлено, что для повышения эффективности работы автобусов на маршруте № 22 г. Липецка в утренние часы пик необходимо увеличить количество выходов на линию до 11 ед., интервал движения при этом сократить до 11 мин. В результате реализации нового варианта организации работы автобусов на маршруте № 22 количество перевезенных пассажиров в утренние часы пик увеличится на 2% (до 3664 чел.), а количество отказов в поездке из-за отсутствия свободных мест в автобусе сократится на 31,9% (до 342 чел.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Боев, В.Д.** Компьютерное моделирование: пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в Anylogic / В.Д. Боев. – Санкт-Петербург: ВАС, 2014. – 432 с. – Текст : непосредственный.
2. **Воронин, Н.В.** Моделирование маршрутов движения городского транспорта общественного пользования в программе AnyLogic / Н.В. Воронин. – Текст : непосредственный. // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук. материалы IV научно-практической международной конференции молодых ученых: в 2 частях. – 2018. – С. 364-369.

3. **Гринченко, А.В.** Комплексная оценка уровня конкурентоспособности перевозчика на рынке пассажирских услуг / А.В. Гринченко, М.В. Казарина. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта. – 2016. – № 7. – С. 34-38.

4. **Гринченко, А.В.** Определение социально-экономической эффективности использования пассажирского транспорта / А.В. Гринченко, М.В. Маршкова. – Текст : непосредственный // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – № 2. – С. 37-40.

5. **Данилов, И.Д.** Программные продукты для имитационного моделирования в логистике / И.Д. Данилов. – Текст : непосредственный // Вопросы студенческой науки. – Москва: ГУУ, 2017. – № 16 (16). – С. 134-139.

6. **Дёмин, А.Г.** Разработка имитационной модели пригородных пассажирских перевозок в центральном федеральном округе / А.Г. Дёмин. – Текст : непосредственный // Имитационное моделирование. Теория и практика. материалы Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – 2017. – С. 360-365.

7. **Корчагин, В.А.** Выбор рационального типа автобуса : монография / В.А. Корчагин, А.В. Гринченко. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 85 с. – Текст : непосредственный.

8. **Корчагин, В.А.** Повышение социально-экономической эффективности внутриобластных пассажирских перевозок / В.А. Корчагин, А.В. Гринченко, Д.К. Сысоев. – Текст : непосредственный. // Аграрный научный журнал. – Саратов: СГАУ, 2016. – № 12. – С. 55-57.

9. **Корчагин, В.А.** Формирование рационального парка автобусов для городских маршрутов / В.А. Корчагин, А.В. Гринченко, М.В. Казарина. – Текст : непосредственный // сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Архитектура, строительство, транспорт». – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 1070-1075.

10. **Липенков, А.В.** Моделирование маршрутной сети городского пассажирского транспорта Нижнего Новгорода в AnyLogic / А.В. Липенков, О.А. Липенкова, М.Е. Елисеев. – Текст : непосредственный // Материалы конференции ИММОД-2013, Казань. – 2013. – С. 179-183.

11. **Липенков, А.В.** Моделирование пассажирского автобусного маршрута в AnyLogic / А.В. Липенков, О.А. Маслова, М.Е. Елисеев. – Текст : непосредственный // Материалы конференции ИММОД-2011, Санкт-Петербург. – Том 2. – 2011. – С. 137-141.

12. **Николаев, А.Б.** Аналитико-имитационная модель планирования работы городского пассажирского транспорта / А.Б. Николаев, В.С. Стариков. – Текст : непосредственный // Автоматизация и управление в технических системах. – 2017. – № 2; URL: [auts.esrae.ru/23-432](http://auts.esrae.ru/23-432) (дата обращения: 28.05.2019).

Ключевые слова: городской транспорт, пассажирские перевозки, автобусный маршрут, имитационное моделирование.

Сведения об авторах:

Гринченко Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры управления автотранспортом Липецкого государственного технического университета.

Антонова Татьяна Романовна, магистрантка 1 курса факультета инженеров транспорта Липецкого государственного технического университета.

E-mail: [grinchav@mail.ru](mailto:grinchav@mail.ru)

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## SIMULATION OF AN URBAN BUS ROUTE IN ANYLOGIC

A.V. Grinchenko, T.R. Antonova

The combination of the agent and discrete-event approaches to the simulation of an urban bus route using the Anylogic program is considered. The developed model of a separate route can serve as the basis for modeling the entire route network of the city. The results of the work can be used by enterprises and organizations to optimize the parameters of urban transport.

Keywords: urban transport, passenger transportation, bus route, simulation modeling.

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02

## НОВЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ ПОВЫШЕННОЙ УДАРНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ВОССТАВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

Липецкий государственный технический университет

А.В. Бутин, О.А. Ковырялова

В статье приведены результаты экспериментальных исследований нового полимерного композиционного наноматериала. Описаны оптимальный состав полимерного композиционного наноматериала и технология восстановления неподвижных соединений «вал-подшипник» новым материалом.

В рамках реализации внутреннего гранта Липецкого государственного технического университета (Договор о представлении гранта № 002 от 28.04.2018г.) на кафедре «Транспортные средства и техносферная безопасность» был исследован новый полимерный композиционный наноматериал (ПКНМ) на основе эластомера Ф-40С [1-4]. Получены результаты сравнительных экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пленок, виброактивности, теплообразования и долговечности клеевых соединений, выполненных эластомером Ф-40С и композицией на его основе.

В соответствии с ГОСТ 14236-81 и ГОСТ 1242366 проводили исследования деформационно-прочностных свойств пленок акрилового эластомера Ф-40С и ПКНМ на его основе. Испытания образцов осуществляли на разрывной машине ИР 5047-50. Производили запись диаграммы «нагрузка-деформация». На основании полученных данных выявили, что прочность составила 9,05 МПа. Введение наполнителя увеличивает его прочность на 56,4% (14,15 МПа). Удельная работа деформации  $\alpha_p$  при разрыве пленок эластомера Ф-40С составляет 2,71 МДж/м<sup>3</sup>. Введение наполнителя увеличивает удельную работу деформации на 44,8% (3,92 МДж/м<sup>3</sup>). Максимальное удлинение пленок композиции составляет 88,5%. Введение наполнителя уменьшает этот показатель на 8% (81,4%).

Температура наружного кольца подшипникового узла, восстановленного эластомером, составляет 38, 41 и 46°С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно. Температура наружного кольца подшипникового узла, восстановленного композицией составляет 35, 37 и 40°С при тех же нагрузках, что на 7,9; 9,8 и 13,1% меньше, чем у чистого эластомера.

Температура втулки подшипникового узла, восстановленного эластомером, составляет 53, 59 и 68°С при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН. Температура втулки

подшипникового узла, восстановленного композицией на основе эластомера, составляет 51, 55 и 62 °С при тех же нагрузках, что на 3,8; 6,8 и 8,9% меньше, чем у чистого эластомера.

Введение композиции существенно снижает теплообразование в клеевом шве, о чем свидетельствует более низкая температура деталей подшипникового узла по сравнению с ненаполненным эластомером.

Далее исследовали амплитуду вибрации подшипникового узла, восстановленного эластомером Ф-40С и по ПКНМ на его основе при различных значениях циклической радиальной нагрузки на испытываемый подшипниковый узел.

Амплитуда вибрации подшипникового узла, восстановленного эластомером, составляет 1,916; 1,944 и 1,998 мм при нагрузках 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно. Амплитуда вибрации подшипникового узла, восстановленного композицией на основе эластомером, составляет 1,468; 1,476 и 1,493 мм при тех же нагрузках. Подшипниковый узел, восстановленный ПКНМ, имеет меньшую амплитуду вибрации, благодаря уменьшению модуля упругости при введении композиции.

Долговечность неподвижного соединения уменьшается с увеличением толщины клеевого шва. Чем больше толщина клеевого шва, тем больше объем полимерного материала и больше вероятность возникновения дефектов (поры, микротрещины и т.д.), которые снижают долговечность клеевого шва.

Зависимость, построенная в полулогарифмических координатах, имеет нелинейный характер (рис. 1). Подобные зависимости называют кривыми Веллера. Стрелки у точек означают, что проворота кольца подшипника во время испытаний не зарегистрировано. За базу испытаний на долговечность приняли  $N = 5,94 \times 10^7$  циклов нагружения, что соответствует 330 ч работы стенда.

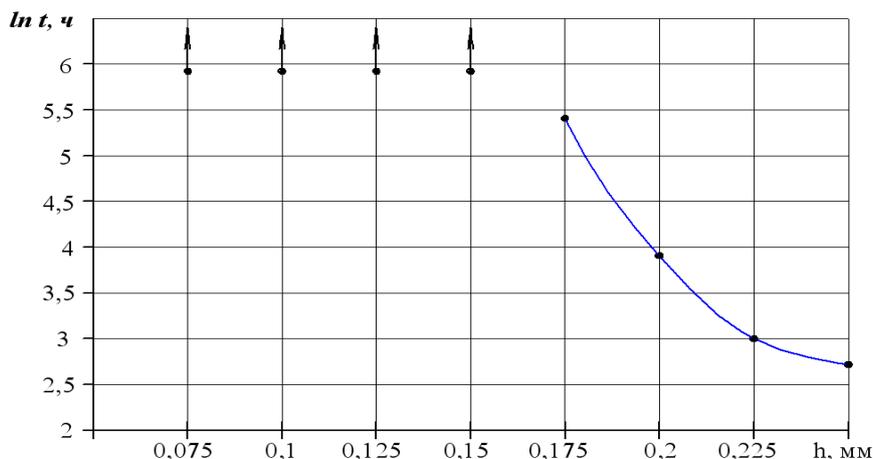


Рис. 1. Зависимость долговечности  $t$  неподвижных соединений подшипников 209 от толщины полимерного покрытия композиции на основе эластомера Ф-40С при радиальной нагрузке 20 кН

При толщине полимерного покрытия  $h = 0,25$  мм долговечность неподвижного соединения наименьшая, проворот наружного кольца наблюдается через 12 ч работы стенда. При  $h = 0,225$  мм долговечность соединения возрастает в 2,64 раза (32 ч). При толщине клеевого шва  $h = 0,2$  мм долговечность возрастает многократно по сравнению с  $h = 0,25$  мм в 4,3 раза и составляет 51,6 ч. При толщине клеевого шва  $h = 0,175$  мм сдвига наружного кольца подшипника в течение 330 ч ( $e^{5,8} = 330$ ) работы стенда не зафиксировано. Поэтому максимальной допустимой толщиной полимерного покрытия композиции на основе эластомера Ф-40С при циклической радиальной нагрузке  $P = 20$  кН является  $h = 0,175$  мм, т.е. восстановлению подлежат изношенные неподвижные соединения подшипников с диаметральной износом до 0,3 мм.

В рамках реализации внутреннего гранта разработан способ восстановления изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях ПКНМ под заданный размер и форму, обеспечивающий повышение точности размеров отверстий, за счет исключения влияния усадки ПКНМ при отверждении.

Экспериментальными исследованиями установлены оптимальные геометрические параметры калибра-резца, обеспечивающие минимальное значение радиальной составляющей силы резания ПКНМ: передний угол  $\gamma = 75^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ .

При обработке ПКНМ калибром-резцом с оптимальными геометрическими параметрами образуется сливная стружка, одно из условий получения высокого качества и точности обработанной поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2537864 Российская Федерация, МПК C09D 5/10, C09D 5/08, C09D 161/06, C09D 161/14, C09D 109/02. Композиция для покрытия металлических изделий: № 2013104578/05; заявл. 04.02.2013; опубл. 10.01.2015 / Бутин А.В.; заявитель и патентообладатель Липецкий государственный технический университет, Бюл. № 1 – 7 с. – Текст : непосредственный.

2. Бутин, А. В. Полимерный нанокompозит для восстановления посадок подшипников качения автомобилей / А.В. Бутин, В.А. Малюгин, Д.Н. Псарев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – №3 (62). – С. 34 – 40.

3. Butin, A.V. A mathematical model of the stress state of a shaft-bearing adhesive bond under radial loading / A.V. Butin, R. I. Li, M.M. Kuznetsov – Text: electronic. // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2014. – Vol. 7, №. 3. – pp. 208–212.

4. Butin, A.V. A promising polymer composite material for increasing the efficiency of recovery of basic parts of automotive engineering / A.V. Butin, R. I. Li, S.P. Ivanov, D.V. Mashin. – Text: electronic. // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2014. – Vol. 7, №. 3. – pp. 233–237.

Ключевые слова: восстановление, подшипник, полимер, композиция.

Сведения об авторах:

Бутин Антон Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных средств и техносферной безопасности Липецкого государственного технического университета.

Ковырялова Ольга Алексеевна, студент группы ТБ-16-1 кафедры транспортных средств и техносферной безопасности Липецкого государственного технического университета.

E-mail: brunei@mail.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## A NEW POLYMER COMPOSITE NANOMATERIAL OF INCREASED IMPACT STRENGTH FOR AUTOMOTIVE PART RECONDITIONING

A.V. Butin, O.A. Kovyryalova

The results of experimental studies of a new polymer composite nanomaterial are presented. The optimal composition of the polymer composite nanomaterial and the technology of reconditioning the fixed shaft-bearing joints with a new material are described.

Keywords: restoration, bearing, polymer, composition.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ДЕЛЕНИЯ СОСТАВА НА ЧАСТИ ПРИ РАСФОРМИРОВАНИИ СОСТАВА НА ВЫТЯЖНЫХ ПУТЯХ МЕТОДОМ ОСАЖИВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Липецкий государственный технический университет

А.Т. Попов, О.А. Сулова,  
Ю.В. Толчеев, В.Ю. Катаев

В статье рассматривается возможность применения динамического программирования для определения технологии маневровой работы.

Сущность сортировочных маневров по расформированию составов заключается в разъединении вагонов, находящихся в составе, и расстановке их по путям по определенным признакам (по назначениям плана формирования, пунктам грузовой работы, роду вагонов и др.).

В теории маневровой работы рассматриваются виды маневров по назначению [1, 2, 4, 5, 8, 9], виды полурейсов [4, 9], режимы управления движением [2, 4, 8, 9], способы выполнения маневров [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], нормирование маневровых операций [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Одним из важнейших технологических приемов при маневрах на вытяжных путях является предварительное деление состава на части. Общее время маневров при этом, как правило, меньше, чем при маневрах сразу с целым составом. Дополнительно время на заезды и перестановки на вытяжной путь частей состава полностью компенсируется ускорением сортировочных полурейсов при меньшем числе вагонов в маневровом составе.

Сортировочные маневры целым составом осуществляются лишь тогда, когда состав имеет две-три первичные группы вагонов, которые нужно расставить на смежные пути, а парк приема удален от вытяжного пути.

Расчет числа частей деления состава на части давно изучен [2, 5, 6, 8]. Все они сводятся к следующему.

Общая продолжительность расформирования состава осаживанием состоит из суммы полурейсов – холостых, выставочных, осаживания. Количество холостых полурейсов равно удвоенному количеству частей  $x$ , на которые разделен состав, а общая их продолжительность  $\sum t_x = a_x 2x$ , где  $a_x$  – продолжительность выполнения холостого полурейса, мин.

Число выставочных полурейсов равно количеству отцепов  $g$ . Наибольшее количество вагонов при первом выставочном полурейсе равно числу вагонов в части  $\frac{m}{x}$ , а наименьшее – при выставке последнего отцепа, т. е.  $\frac{m}{g}$ . Средний маневровый состав  $\left(\frac{m}{x} + \frac{m}{g}\right) \div 2 = \frac{m(g+x)}{2gx}$ . Тогда продолжительность всех выставочных полурейсов при расформировании осаживанием  $(a_b + b_b \frac{m(g+x)}{2gx})g$ . Количество полурейсов осаживания будет равно  $g$ , наибольшее количество вагонов при первом осаживании  $\frac{m}{x}$ , а наименьшее  $\frac{m}{g}$ , т. е. средний состав  $\frac{m(g+x)}{2gx}$ . Продолжительность всех полурейсов осаживания  $(a_{oc} + b_{oc} \frac{m(g+x)}{2gx})g$ .

После сложения времени всех полурейсов и взятия производной по  $x$  найдем оптимальное число частей, на которые следует делить состав при сортировке [2, с. 49]:

$$x = \sqrt{\frac{mg(b_B + b_{oc})}{4ax}}$$

Данный метод имеет существенные недостатки, которые не дают использовать его в практическом применении. Используются средние величины, и при сложных сочетаниях отцепов (различной длины и последовательности) возникает затруднение в определении точных средних частей деления состава на части. К тому же коэффициенты  $a$ ,  $b$  выбираются в зависимости от расстояний передвижения, которые в таблицах имеют дельту от 20 (51-70 м) до 200 (2801-3000 м) [2, с. 49].

К расформированию состава на вытяжных путях методом осаживания, а точнее к определению оптимального числа деления состава на части для сокращения общего времени маневровой работы можно применить динамическое программирование. [10]

Динамическое программирование - математический метод поиска оптимальных решений по управлению многошаговыми процессами, в которых состояние исследуемых систем изменяется во времени или поэтапно [10].

Согласно Р. Беллману, основной принцип оптимальности управления многошаговыми процессами может быть словесно выражен следующим образом: «Оптимальное поведение обладает тем свойством, что, каковы бы ни были исходное состояние и первоначальное решение, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, получающегося в результате первоначального решения». Иными словами, любой участок оптимальной траектории, в том числе и завершающий, также является оптимальным, а ошибки в управлении, приводящие к отклонениям от оптимальной территории, впоследствии не могут быть исправлены [10].

Введем требуемые переменные и функции:

1) Определим число  $N$  шагов в рассматриваемом управляемом процессе.  $N$  – число частей на которые можно разделить состав. Оно может принимать значение от 1 (когда локомотив берет состав полностью) до числа отцепов в составе (когда локомотив переставляет отцепы по одному). Будем принимать число шагов, равным числу отцепов.

2) Установим, какой параметр определяет состояние системы и может быть выбран в качестве фазовой переменной  $x$ , и выявим налагаемые на нее ограничения. Переменная  $x$  – число отцепов, находящееся на пути в расформированном составе. Может принимать значение от числа отцепов в составе ( $x_0 =$  общее число отцепов в составе) до 0 (когда весь состав расформируют).

3) Установим, какой параметр может быть выбран в качестве управляющей переменной  $u$ , и выявить налагаемые на нее ограничения.  $u$  – число отцепов забираемых на данном этапе, т.е. число отцепов в части расформированного состава. Может принимать значение от 1 до числа отцепов в составе.

4) Составим функцию процесса, определяющую закон изменения состояния системы:

$$x_i = x_{i-1} - u_i.$$

5) Определим частную целевую функцию  $z$ , определяющую экономический эффект на каждом из шагов процесса.  $Z$  – время маневровой работы.

При рассмотрении классического метода динамического программирования принимаются следующие основные допущения [10, с. 16-17] относительно характера решаемых задач. Данные допущения выполняются для широкого класса экономических и технических систем и процессов, а отказ от них приводит к существенному повышению сложности и громоздкости методов решения соответствующих задач [10].

Отсутствие последействия: состояние  $x_i$  системы  $S$  после шага с номером  $i$  непосредственно зависит только от предшествующего состояния  $x_{i-1}$  и от управления  $u_i$  на данном шаге. Это предположение можно записать следующим образом:

$$x_i = f_i(x_{i-1}, u_i),$$

или в развернутом виде

$$x_1 = f_1(x_0, u_1), x_2 = f_2(x_1, u_2), \dots, x_N = f_N(x_{N-1}, u_N).$$

Зависимость состояния  $x_i$  от предшествовавших ранее состояний  $x_{i-2}, x_{i-3}, \dots$  (т.е. от всей долгой предыстории) является косвенной, проявляющейся только через  $x_{i-1}$ .

Для частных целевых функций  $z_i$  на каждом из шагов процесса принимается аналогичное предположение:

$$z_i = z_i(x_{i-1}, u_i),$$

или в развернутом виде

$$z_1 = z_1(x_0, u_1), z_2 = z_2(x_1, u_2), \dots, z_N = z_N(x_{N-1}, u_N).$$

Аддитивность целевой функции относительно разбиения процесса на шаги: результирующая целевая функция  $Z$  для всего многошагового процесса представляется в виде суммы частных целевых функций  $z_i$  на каждом из шагов [10]:

$$Z = z_1 + z_2 + \dots + z_N.$$

Целевая функция  $Z$  данного вида иначе называется аддитивным критерием.

Данные критерии при расформировании состава на вытяжных путях методом осаживания соблюдаются [10].

Для строгой формулировки принципа оптимальности введем ряд вспомогательных функций  $V_0(x_0), V_1(x_1), \dots, V_N(x_N)$  [10]. Функции  $V_i(x_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , имеют важный экономический смысл и представляют собой минимальные значения сумм частных целевых функций  $z_{i+1}(x_i, u_{i+1}) + \dots + z_N(x_{N-1}, u_N)$ , вычисляемые по всем допустимым «укороченным» наборам управлений  $(u_{i+1}, \dots, u_N)$ . Иными словами,  $V_i(x_i)$  - условно-оптимальное значение целевой функции при переводе системы из состояния  $x_i$  после шага с номером  $i$  в конечное состояние  $x_N$ ; условность оптимального значения состоит в том, что оно относится не ко всему процессу, а к его заключительной части, и зависит от выбора состояния  $x_i$ , являющегося начальным для «укороченного» процесса. Тем самым функции  $V_i(x_i)$ , называемые функциями Беллмана, характеризуют экстремальные свойства управляемой системы  $S$  на последних шагах процесса. При этом имеет место простое и важное соотношение  $V_N(x_N) = 0$ , справедливое по той причине, что состояние  $x_N$  уже является конечным, дальнейших изменений состояний системы не происходит, и соответствующий экономический эффект равен 0 [10].

Принцип оптимальности Р. Беллмана, лежащий в основе метода динамического программирования решения рассматриваемых задач, выражается следующим основным функциональным уравнением [10, с. 25]:

$$V_{i-1}(x_{i-1}) = \min_{u_i} \{z_i(x_{i-1}, u_i) + V_i(x_i) | x_i = f_i(x_{i-1}, u_i)\}. (*),$$

в котором индекс  $i$  изменяется по номерам всех шагов процесса в обратном порядке:  $i = N, N - 1, \dots, 2, 1$ .

По своей структуре функциональное уравнение Беллмана является рекуррентным. Это означает, что в последовательности функций  $V_0(x_0), V_1(x_1), \dots, V_N(x_N)$  каждая предшествующая выражается через последующую.

Важно подчеркнуть, что при вычислении минимума в функциональном уравнении Беллмана для каждого фиксированного значения  $x_{i-1}$  одновременно с  $V_{i-1}(x_{i-1})$  определяется то значение переменной  $u_i$  (одно или несколько), для которых этот минимум достигается. Это значение зависит от состояния  $x_{i-1}$ , и обозначать его будем через  $\tilde{u}_i(x_{i-1})$ . Фактически  $\tilde{u}_i(x_{i-1})$  является (возможно, многозначной) функцией, называемой условно-оптимальным управлением (условность заключается в зависимости управления от выбора состояния  $x_{i-1}$ ). И хотя функции  $\tilde{u}_i(x_{i-1})$  явно не фигурируют в уравнении (\*), они играют не менее важную роль, чем функции Беллмана  $V_{i-1}(x_{i-1})$ , и используются для окончательного построения оптимального решения. Таким образом, при проведении расчетов последовательно вычисляются и запоминаются условно-оптимальные управления  $\tilde{u}_N(x_{N-1}), \tilde{u}_{N-1}(x_{N-2}), \dots, \tilde{u}_1(x_0)$  [10].

Следует заметить, что принцип оптимальности Беллмана рассматривает конкретную решаемую задачу с оптимальным значением  $V_0(x_0)$  не обособленно, а как представителя семейства подобных ей задач с оптимальными значениями  $V_1(x_1), \dots, V_N(x_N)$  меньшей

размерности, т.е. более простых. Между задачами этого семейства существует связь, которая описывается функциональным уравнением (\*) и позволяет, начиная с простейшей функции  $V_N(x_N) = 0$ , последовательно вычислить все остальные функции  $V_{N-1}(x_{N-1}), \dots, V_0(x_0)$ , т. е. фактически получить решения всего семейства задач. Данный прием, заключающийся в замене задачи семейством одноподобных задач, в результате решения которых находится решение исходной задачи, называется принципом инвариантного погружения [10].

Метод динамического программирования включает три основных этапа: предварительный этап; этап условной оптимизации; этап безусловной оптимизации.

Изложим содержание этих этапов, имея в виду задачу динамического программирования на поиск максимума [10].

Предварительный этап проводится с целью уменьшения вычислительной работы на последующем этапе решения и, по существу, заключается в нахождении всех допустимых значений управлений  $u_i$  и фазовых переменных  $x_i$  (т. е. фактически областей определения функций функции  $V_i(x_i)$  или, в более сложных случаях, множеств, содержащих эти области определения). Иными словами, на данном этапе отбрасываются все заведомо неподходящие, нереализуемые значения фазовых и управляющих переменных. Проводится предварительный этап в естественном порядке от первого шага к последнему:  $i = 1, 2, \dots, N$ , а опираются соответствующие расчеты на уравнение процесса  $x_i = f_i(x_{i-1}, u_i)$ . Данный этап особенно удобен при табличном способе задания функций, фигурирующих в условии задачи [10].

Этап условной оптимизации заключается в непосредственном вычислении функций Беллмана  $V_i(x_i)$  и проводится, как и предписывает принцип оптимальности, в обратном порядке от последнего шага к первому:  $i = N, N-1, \dots, 2, 1$ . Расчет проводится следующим образом. Для последнего шага при  $i = N$  с учетом условия  $V_N(x_N) = 0$  принцип оптимальности Беллмана принимает следующий наиболее простой вид:

$$V_{N-1}(x_{N-1}) = \max_{u_N} \{z_N(x_{N-1}, u_N)\}.$$

Иначе говоря, при планировании последнего шага нет необходимости учитывать прогноз на будущее. При этом для каждого допустимого значения аргумента  $x_{N-1}$  (определенного на предварительном этапе) максимум достигается при некотором управлении  $u_N = \bar{u}_N(x_{N-1})$ . Вычисленная функция  $V_{N-1}(x_{N-1})$  позволяет перейти к предшествующему шагу при  $i = N - 1$  и снова применить принцип оптимальности — он уже не будет иметь столь простую форму записи. Продолжая аналогичным образом, завершим данный этап вычислением функций  $V_0(x_0)$  и  $\bar{u}_1(x_0)$  после прохождения первого шага при  $i = 1$ .

Этап безусловной оптимизации проводится с целью окончательного вычисления оптимального значения задачи  $Z^*$  и построения оптимального управления  $(u_1^*, u_2^*, \dots, u_N^*)$  и оптимальной траектории  $x_0^*, x_1^*, \dots, x_N^*$ . Проводится данный этап в естественном порядке от первого шага к последнему:  $i = 1, 2, \dots, N$ . Построение оптимального решения начинается с определения оптимального значения задачи  $Z^*$  и оптимального начального состояния  $x_0^*$ . Если начальное состояние  $x_0$  определено однозначно, то оптимальное значение задачи  $Z^*$  равно  $V_0(x_0)$  при этом принимаем  $x_0^* = x_0$ . Если же начальное состояние  $x_0$  не определено однозначно, а принимает значения из некоторого множества начальных состояний  $X_0$ , то оптимальное значение задачи  $Z^*$  вычисляется по формуле

$$Z^* = \max_{x_0 \in X_0} \{V_0(x_0)\}.$$

В этом случае в качестве  $x_0^*$  принимаем то значение переменной  $x_0$ , при котором данный максимум достигается (таких значений может быть одно или несколько).

При построении оптимального управления и оптимальной траектории используются функции  $\bar{u}_i(x_{i-1})$ , вычисленные на этапе условной оптимизации. На первом шаге при  $i = 1$ , используя уже известное значение  $x_0^*$ , находим:

$$u_1^* = \bar{u}_1(x_0^*), \quad x_1^* = f_1(x_0^*, u_1^*).$$

На втором шаге при  $i = 2$ , используя вычисленное  $x_1^*$ , находим:

$$u_2^* = \widetilde{u}_2(x_1^*), \quad x_2^* = f_2(x_1^*, u_2^*).$$

Продолжая аналогично, получим на последнем шаге при  $i = N$ :

$$u_N^* = \widetilde{u}_N(x_{N-1}^*), \quad x_N^* = f_N(x_{N-1}^*, u_N^*).$$

Таким образом полностью определяются оптимальное решение  $(u_1^*, u_2^*, \dots, u_N^*)$  и оптимальная траектория  $x_0^*, x_1^*, \dots, x_N^*$  системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дегтяренко, В.Н.** Транспортные узлы промышленных районов / В.Н. Дегтяренко. – Москва : СТРОЙИЗДАТ, 1974. – С. 27-30. – Текст : непосредственный.
2. **Акулиничев, В.М.** Организация перевозок на промышленном транспорте : учебник / В.М. Акулиничев. – Москва: Высшая школа, 1983. – С. 43-50. – Текст : непосредственный.
3. **Сотников, Е.А.** Пособие составителю поездов / Е.А. Сотников. – Москва : Транспорт, 1990. – 221 с. – Текст : непосредственный.
4. **Боровикова, М.С.** Организация движения на железнодорожном транспорте : учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / М.С. Боровикова. – Москва : Маршрут, 2003. – С. 33-56. – Текст : непосредственный.
5. Организация движения на железнодорожном транспорте : учебник для техникумов ж.-д. трансп. / Д.П. Заглядимов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1978. – С. 35-54. – Текст : непосредственный.
6. **Кочнев, Ф.П.** Управление эксплуатационной работой железных дорог : учебник пособие для вузов / Ф.П. Кочнев, И.Б. Сотников. – Москва : Транспорт, 1990. – С. 21-38. – Текст : непосредственный.
7. **Бородин, А.Ф.** Технология работы сортировочных станций : учебник пос./ А.Ф. Бородин [и др.] ; под ред. А.Ф. Бородина. – Москва : РГОТУПС, 2001. – С. 70-81. – Текст : непосредственный.
8. **Гоманков, Ф.С.** Технология и организация перевозок на железнодорожном транспорте : учебник для вузов и колледжей РФ и РК / Ф.С. Гоманков, А.Д. Омаров, З.С. Бекжанов. – Алматы : Бастау, 2002. – С. 64-87. – Текст : непосредственный.
9. Управление эксплуатационной работой на железнодорожном транспорте : учебник для студентов вузов ж.-д. транспорта. В 2 т. Т. 1 / под ред. В.И. Ковалева и А.Т. Осьминина. – Москва : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – С. 47-75. – Текст : непосредственный.
10. **Лежнёв, А.В.** Динамическое программирование в экономических задачах: учебник пособие / А.В. Лежнёв. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 176 с. – Текст : непосредственный.

Ключевые слова: математическая модель, транспортные затраты, минимизация, динамическое программирование.

Сведения об авторах:

Попов Алексей Тимофеевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой организации перевозок, профессор кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета.

Суслова Ольга Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок Липецкого государственного технического университета.

Толчеев Юрий Вячеславович, инженер путей сообщения ОАО «Российские железные дороги».

Катаев Владимир Юрьевич, инженер путей сообщения, заместитель начальника станции Липецк ЮВЖД

E-mail: popov@stu.lipetsk.ru, suslova\_2003@mail.ru  
Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

**DETERMINING THE OPTIMUM NUMBER OF TRAIN DIVISION AT TRAIN  
SPLITTING ON SORTING TRACKS VIA BACKING ON THE BASIS OF DYNAMIC  
PROGRAMMING**

A. T. Popov, O. A. Suslova,  
Yu.V. Tolcheev, V.Yu. Kataev

A possibility of applying dynamic programming to determine the shunting technology is considered.

Keywords: mathematical model, transport and production expenses, minimization.

УДК 669.162

### О ВЛИЯНИИ ОКСИДА МАРГАНЦА НА СВОЙСТВА ДОМЕННОГО ШЛАКА

Липецкий государственный технический университет

В.Н. Титов, И.В. Куприянова, Т.В. Кравченко

Рассмотрены отдельные аспекты влияния марганца на обессеривающую способность шлака и выбросы сероводорода.

В последнее время в доменном производстве активно используются марганецсодержащие добавки для корректировок свойств шлака, таких как: вязкость и обессеривающая способность.

Марганец в доменной печи находится в виде закиси марганца  $MnO$  и сульфида марганца  $MnS$ . Влияние содержания закиси марганца на вязкость по разным источникам носит неоднозначный характер. Так, в работе И.С. Куликова указывается, что на шлаках с невысокой основностью влияние прослеживается, а для более основных шлаков данная связь не прослеживается [1]. Там же автор добавляет, что результаты исследований о значительном разжижающем действии закиси марганца в основном обязаны не сколько закиси марганца, сколько сульфиду марганца. Обобщив результаты ранее проведенных исследований, отмечено, что добавки  $MnO$  разжижают основные доменные шлаки, причем особенно сильно действуют добавки первых 2-3%  $MnO$  [2]. Н.Л. Жило указывает, что повышение закиси марганца способствует снижению вязкости шлака при пониженной основности и низком содержании окиси магния [3]. С увеличением основности и содержания  $MgO$  разжижающее действие закиси марганца снижается.

Таким образом, можно отметить, что добавка закиси марганца способствует снижению вязкости шлака, при этом количественно данное влияние зависит от основности шлака, а также от содержания в нем серы и оксидов магния.

Десульфурierende способность закиси марганца в 3-5 раз ниже, чем окиси кальция, однако наиболее сильно на содержание серы влияние марганца сказывается при пониженной температуре расплава [1].

Практические результаты работы доменных печей доказали, что марганец имеет существенное значение в получении низкосернистого чугуна [4]. В данной работе указывается, что в условиях ЗСМК увеличение содержания марганца в чугуне на 0,10% снижает концентрацию серы в чугуне на 0,0017% и повышает показатель ее распределения на 1,43.

С целью определения влияния марганца на поведение серы в доменном процессе в условиях ПАО «НЛМК» были проанализированы балансы серы при использовании агломерата с повышенным содержанием марганца.

Результаты анализа расходной части баланса серы показали, что применение агломерата с повышенным содержанием марганца (при поступлении серы на уровне 2,8-3,0 кг/т чугуна) способствует более полному переходу её в шлак (табл.).

## Расходная часть баланса серы, %

| Статья расхода | Работа на обычном агломерате | Работа на агломерате с повышенным содержанием марганца |
|----------------|------------------------------|--|
| Чугун          | 8,4                          | 7,9  |
| Шлак           | 71,7                         | 73,0   |
| Газ            | 19,9                         | 19,0   |

В среднем при увеличении содержания марганца в чугуне на 0,28% содержание серы в чугуне снизилось на 0,002%.

Обработка показателей работы доменных печей большого объема методом математической статистики показала, что положительное влияние марганца на содержание серы в чугуне возрастает при снижении теплового состояния печи (рис. 1, 2), что косвенно подтверждает выводы авторов работы [1]. Это позволит дополнительно снизить содержание кремния в чугуне при сохранении качества чугуна по содержанию серы и, как следствие, приведет к дополнительному повышению эффективности доменной плавки.

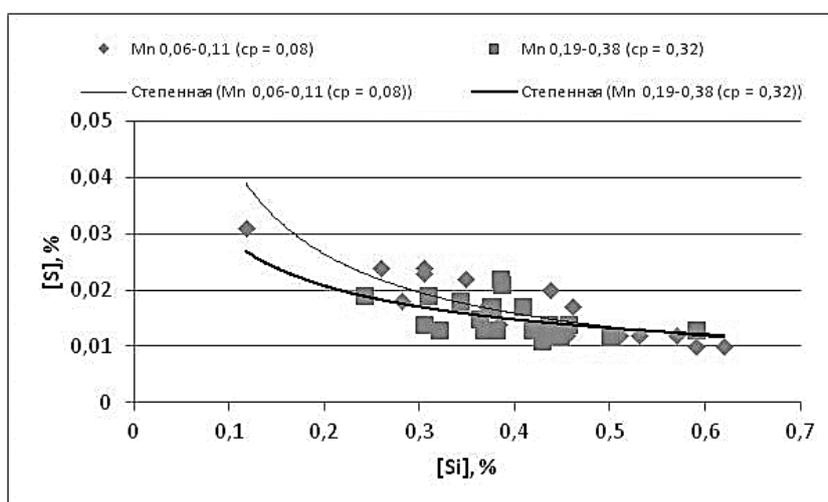


Рис. 1. Изменение содержания серы в чугуне ДП-6 при изменении содержания кремния при разном уровне содержания [Mn]

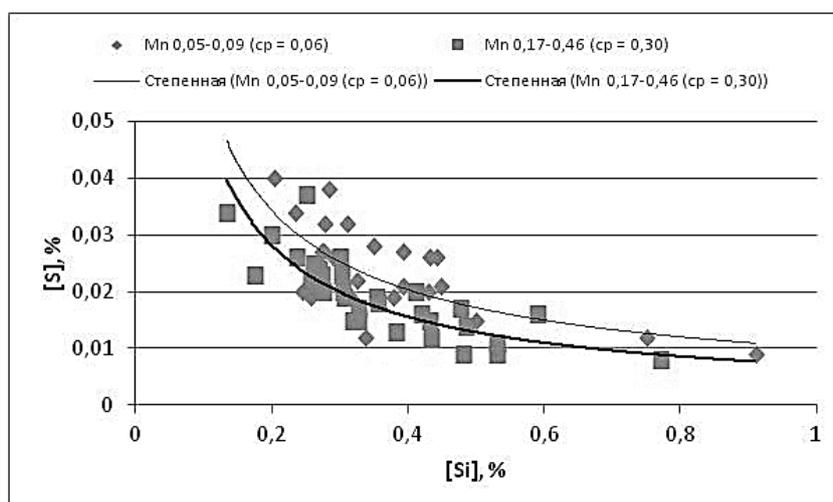


Рис. 2. Изменение содержания серы в чугуне ДП «Россиянка» при изменении содержания кремния при разном уровне содержания [Mn]

Дополнительно была проведена оценка влияния содержания марганца в доменном шлаке на стабильность связывания серы в шлаке в условиях охлаждения шлака водой. На выброс сернистых соединений определенное влияние оказывают составляющие доменного шлака с переменной основностью, а именно оксиды алюминия ( $Al_2O_3$ ), железа ( $FeO$ ) и марганца ( $MnO$ ) [5]. По результатам анализа авторы вывели уравнение, связывающее величину выбросов сероводорода с содержанием данных оксидов [5]. На основании полученного уравнения произведен расчет влияния содержания оксида марганца в шлаке на выбросы сероводорода. При расчете было принято, что содержание  $FeO$  в шлаке составляет 0,5%, а содержание  $Al_2O_3$  – 8%. Результаты расчета представлены на рис. 3.

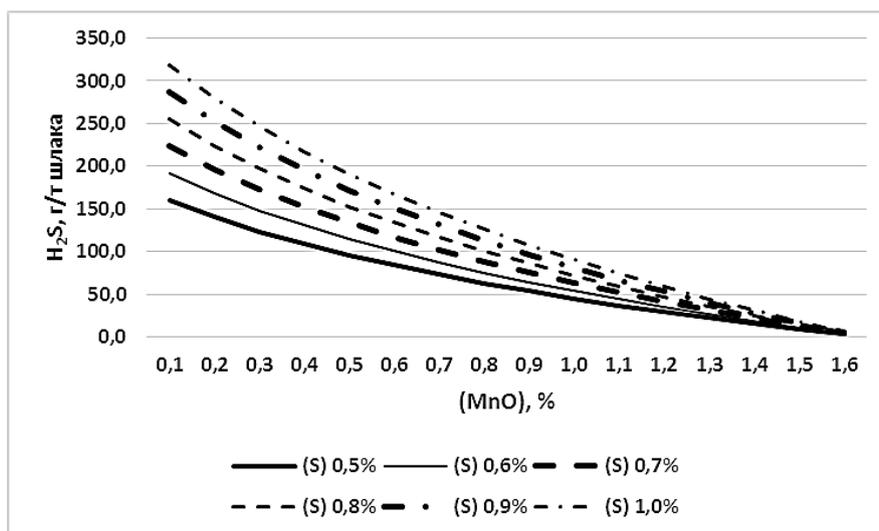


Рис. 3. Влияние содержания оксида марганца в шлаке на выбросы сероводорода при разном уровне содержания серы в шлаке

Как видно из рис. 2, увеличение содержания оксида марганца в шлаке способствует снижению выбросов сероводорода с одновременным снижением влияния содержания серы в шлаке, о чем свидетельствует сближение линий. Ориентировочно при содержании оксида марганца в диапазоне 1,6-1,7% количество выбросов сероводорода стремится к 0.

Таким образом, можно отметить, что марганец не только положительно сказывается на поведении серы в доменной печи, способствуя ее переходу в шлак, но и способствует снижению выбросов сероводорода с одновременным снижением влияния содержания серы в шлаке.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Куликов, И.С.** Десульфурация чугуна / И.С. Куликов. – Москва: изд-во литературы по черной и цветной металлургии. - 1962 г. – с. – 308. – Текст : непосредственный.
2. **Нестеренко, С.В.** Овчинников Н.А., Хоменко В.М. Физические свойства металлургических шлаков. Справочное издание. / Донецк, «Донеччина», 2001 г. – 224 с.
3. **Жило, Н.Л.** Формирование и свойства доменных шлаков / Москва: Металлургия, 1974 г., - 120 с. – Текст : непосредственный.
4. **Гладышева, В.И.** Марганец в доменном процессе / В.И. Гладышева. – Екатеринбург. – 2005г. - 401 с. – Текст : непосредственный.
5. **Кормышев, В.В.** Исследование характеристики парогазовых выбросов при получении гравиеподобной пемзы из доменных шлаков / В.В. Коробов, Л.Г. Маркман, Л.С. Щербина и др. // Переработка и использование доменных, сталеплавильных и

ферросплавных шлаков: Труды УралНИИЧМ. – Свердловск, 1981. – с. 42-47. – Текст : непосредственный.

Ключевые слова: доменная печь, марганец, сера, содержание.

Сведения об авторах:

Титов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

Куприянова Ирина Вячеславовна, старший преподаватель кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

Кравченко Татьяна Викторовна, старший преподаватель кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-mt@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **ON THE INFLUENCE OF MANGANESE OXIDE ON THE BLAST FURNACE SLAG PROPERTIES**

V.N. Titov, I.V. Kupriyanova, T.V. Kravchenko

Some aspects of manganese influence on the slag desulfurizing ability and hydrogen sulfide emissions are considered.

Keywords: blast furnace, balance, manganese, sulfur, contents

УДК 669.04:621.771.22

## **АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗОН УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ**

Липецкий государственный технический университет

М.Э. Слесарев, А.П. Жильцов

Рассмотрены факторы, влияющие на показатели работоспособности зон вторичного охлаждения УНРС. Проведен анализ коэффициентов отказов оборудования и сравнительный анализ стойкости сегментов по технологическим зонам УНРС, показано положительное влияние совершенствования системы охлаждения сегментов на снижение количества нарушений работоспособности элементов зон вторичного охлаждения и увеличение стойкости сегментов.

Обеспечение надёжности комплекса оборудования УНРС и качества непрерывнолитых слябов существенно зависит от ряда факторов, в том числе обеспечения долговечности роликов и роликовых секций сегментов. Существенными факторами при этом являются соблюдение современной технологии непрерывной разливки [1, 2], использование

автоматизированных и компьютерных программ для анализа надёжности металлургического оборудования [3], применение практических методов анализа отказов оборудования [4].

Роликовые поддерживающие устройства зоны вторичного охлаждения обеспечивают предохранение оболочки слитка от выпучивания под действием ферростатического давления и отклонений от технологической оси УНРС. В практике эксплуатации находят применение различные типы роликов, материалы и способы для их изготовления. Так, ролики из сталей марок 15Х1М1Ф и 25ХМ1Ф обладают достаточно высокой долговечностью, но подвержены высокому износу при повышенных температурах [5]. Ролики с сердцевиной из стали 15Х1М1Ф с наплавленным слоем и повышенным содержанием хрома не обладают достаточной термоусталостной прочностью [5]. Технология изготовления роликов методом электрошлакового переплава (ЭШП) из теплоустойчивой стали обеспечивает достаточно высокую долговечность. Применяемая в УНРС в последние годы система Single Roll DynaGar обеспечивает гораздо более точную настройку межроликового зазора в заданной точке мягкого обжатия [1]. Использование технологии наплавки бандажей роликов с формированием коррозионностойкого поверхностного слоя из отдельных наплавленных швов с зазором между смежными швами обеспечивает повышение стойкости роликов зоны вторичного охлаждения [6].

Условия и режимы эксплуатации существенно влияют на показатели стойкости сегментов, долговечность роликов и подшипниковых опор. Поэтому исследование, анализ эксплуатационных показателей оборудования технологических зон УНРС и факторов по повышению эффективности эксплуатации, направленной на обеспечение надёжности оборудования и качества непрерывнолитых слябов, является актуальной задачей.

### Анализ эксплуатации УНРС

Две криволинейные установки непрерывной разливки стали в условиях КЦ-1 ПАО «НЛМК» имеют однотипные конструкции. Технологическая линия УНРС включает в головной части зону загиба, в средней части зону дуги и правки, в выходной части – зону горизонта. Основными рабочими элементами всех 4-х технологических зон являются сегменты, оснащенные роликами, имеющими различные системы приводов, обслуживания, охлаждения. В практике эксплуатации применяется более 50 типоразмеров роликов, входящих в сегменты, основным показателем для которых является регламентированная стойкость в тоннах разлитой стали в межремонтный период (таблица).

Таблица

Регламентированная стойкость роликов сегментов по технологическим зонам УНРС

| № | Технологическая зона | Диаметры роликов, мм | Регламентированная стойкость, млн. т |
|---|----------------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1 | Зона изгиба          | 150; 175             | 0,5                                  |
| 2 | Зона дуги            | 230                  | 1,0                                  |
| 3 | Зона правки          | 250                  | 0,6                                  |
| 4 | Зона горизонта       | 300                  | 1,3                                  |

Различие технологических требований, условий эксплуатации и функционального назначения зон в линии УНРС существенно влияет на показатели эксплуатационной надёжности, виды и количество отказов оборудования. Так, например, для УНРС,

эксплуатирующихся в КЦ-1 ПАО «НЛМК», в период 2014 – 2018 гг. зафиксирован ряд нарушений эксплуатационных показателей: нарушения герметичности гидроцилиндров, разгерметизация ротационных соединений и трубной разводки охлаждения роликов, течи между опорами ролика и рамой сегмента, разрушения подшипниковых узлов и др.

Существенное влияние на эксплуатационную надёжность и стойкость сегментов оказывает применение эффективных систем охлаждения роликов и их подшипниковых опор. Значительная часть нарушений работоспособности роликов и их опор связана с ухудшением условий работы системы замкнутого охлаждения сегментов, вследствие наличия в трубопроводах и камерах охлаждения карбонатных отложений и окислов железа [7] (рис. 1).

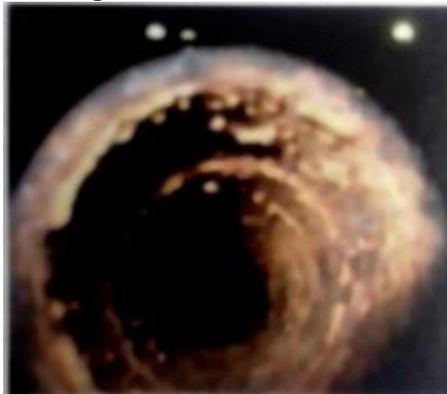


Рис. 1. Карбонатные отложения в трубопроводах и камерах охлаждения ролика

В замкнутой системе охлаждения сегментов применяется химически очищенная вода, препятствующая образованию отложений. Однако при эксплуатации сегментов нередко происходят случаи нарушения герметичности системы охлаждения. И чтобы аварийно не выводить УНРС из работы, для устранения утечки дополнительно включается подпитка технической водой, которая способствует образованию отложений.

Рост отложений в камере охлаждения подшипниковой опоры при длительной эксплуатации приводит к нарушению теплоотвода от подшипника, перегреву подшипника с последующим его разрушением. Аналогичная ситуация происходит в трубной разводке, где также скапливаются отложения. Осложняющим фактором являлось еще и то, что на криволинейных МНЛЗ изначально в системе замкнутого охлаждения не применялась химически очищенная вода, а применялась техническая, что приводило не только к карбонатным отложениям, но и нарушениям циркуляции жидкости.

С целью устранения рассмотренных нарушений работоспособности реализован способ химической промывки замкнутого охлаждения сегментов на УНРС-4,6 в условиях КЦ-1 [8]. Схема реализации данного процесса приведена на рис. 2.

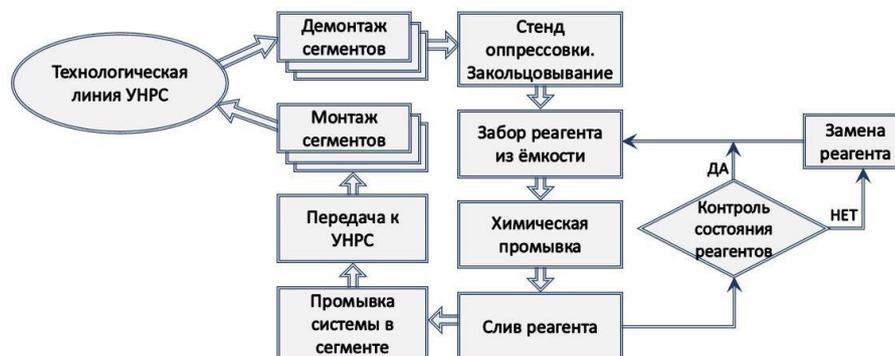


Рис. 2. Схема реализации процесса химической промывки

Для организации промывки сегмент устанавливался в стенд опрессовки. Система охлаждения закольцовывалась при помощи химически стойких шлангов. К входу в систему

охлаждения подключался насос, который осуществлял забор реагента из емкости. Пройдя круг циркуляции, реагент сливался в емкость, откуда вновь забирался насосом. Основой реагента являлась ортофосфорная кислота с ингибиторами. Изначально цикл одной промывки составлял 10-12 часов. При промывке осуществлялся контроль за состоянием реагента. При сильном загрязнении проводилась замена реагента. После окончания промывки проводилась промывка системы охлаждения водой в течение 30 минут.

Реализация предложенной химической промывки осуществлялась в течение длительного периода при эксплуатации сегментов МНЛЗ, а также в целях профилактической обработки сегментов, прошедших капитальный ремонт, перед их монтажом.

Анализ на основе визуальных осмотров при вскрытии камер охлаждения подшипников и трубной разводки показывает, что количество отложений минимизируется. Это обеспечивает стабилизацию температурного режима и свидетельствует об эффективности применения химической промывки замкнутых систем охлаждения сегментов и о положительной динамике обеспечения долговечности подшипниковых опор роликов и, как следствие, роликовых секций.

### **Оценка эксплуатационной надёжности оборудования технологических зон УНРС**

Оценка эксплуатационной надёжности сегментов технологических зон криволинейных УНРС проведена за 2014-2018 гг. эксплуатации. За этот период проведён ряд технологических, конструктивных и организационных мероприятий по повышению эффективности эксплуатации УНРС, в том числе применение способа химической промывки замкнутого охлаждения сегментов.

На рис. 3 приведена динамика изменения относительных коэффициентов отказов  $k_i$  при нарушениях работоспособности оборудования технологических зон УНРС по различным причинам, зафиксированным в течение 2014 – 2017 гг.

Относительный коэффициент отказов определили из соотношения количества отказов по  $i$ -й причине  $n_i$  и суммарного количества отказов  $n_{\Sigma}$  по следующей формуле:

$$k_i = \frac{n_i}{n_{\Sigma}} \cdot 100\% .$$

Анализ распределения относительных коэффициентов отказов (см. рис. 3) показывает, что применение постоянного контроля системы охлаждения роликов сегментов и применение химической промывки приводит к снижению количества нарушений работоспособности вследствие затруднённого вращения роликов (работа подшипников), нарушений в системе охлаждения, неисправностей в системе 3D-Spray.

Представляет практический интерес сравнительный анализ стойкости (количественная оценка долговечности) сегментов по технологическим зонам. Оценка изменения величины стойкости сегментов проведена по величине относительной стойкости  $\delta$  за 2016 – 2018 гг. эксплуатации криволинейных УНРС в условиях конвертерного цеха №1.

Относительную стойкость  $\delta_i$   $i$ -й зоны определяли отношением фактической стойкости сегментов  $i$ -й зоны  $c_{i\phi}$  к регламентированной стойкости  $i$ -й зоны  $c_{ip}$ :

$$\delta_i = \frac{c_{i\phi}}{c_{ip}} .$$

Динамика изменения относительной стойкости сегментов технологических зон УНРС за 2016 – 2018 гг. показана на рис. 4.

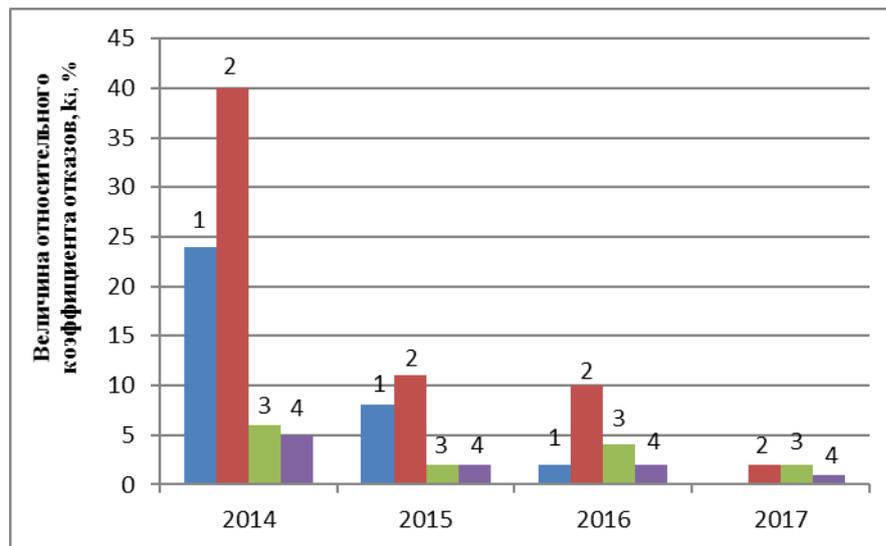


Рис. 3. Значение относительных коэффициентов отказов за 2014–2017 гг. по причине:  
 1 – затруднено вращение роликов; 2 – нарушение системы охлаждения;  
 3 – неисправность системы гидравлики; 4 – неисправность системы 3D-Spray

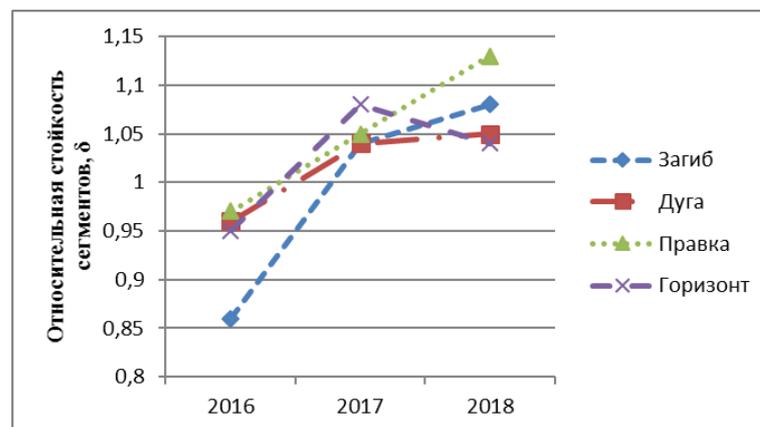


Рис. 4. Динамика изменения относительной стойкости сегментов технологических зон УНРС за 2016 – 2018 гг.

Анализ свидетельствует о положительном тренде, характеризующимся увеличением стойкости сегментов и относительным превышением регламентной стойкости по всем технологическим зонам. Увеличение стойкости достигнуто за счёт ряда технологических и организационных мероприятий, в частности:

- мероприятий по совершенствованию системы охлаждения роликов с применением химической промывки;
- конструктивных изменений крышек подшипниковых опор и распределителей системы смазки;
- улучшения культуры и качества технического обслуживания и ремонтов роликов и сегментов.

## Выводы

1. Показатели эксплуатационной надёжности, в том числе стойкость роликовых сегментов технологических зон криволинейных УНРС, существенно зависят от условий

эксплуатации, которые характеризуются расположением зоны в технологической линии УНРС и требованиям регламента.

2. Применение современных систем охлаждения роликов химически очищенной водой оборотного цикла, конструктивные усовершенствования подшипниковых опор, систем смазки сегментов, их охлаждения и других элементов в технологических зонах УНРС, организационные мероприятия по совершенствованию качества технического обслуживания и ремонтов, обеспечивают повышение стойкости сегментов и снижение количества отказов, обусловленных нарушениями работоспособности оборудования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пенн Дж.** Каким будет будущее технологии непрерывной разливки стали (русская версия) / Пенн Дж., Д. Fifeth – Текст : непосредственный // - Современная металлургия начала нового тысячелетия. К 80-летию НЛМК: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 17-21 ноября 2014 г. Ч.3. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2014. – 259 с.

2. Исследование и моделирование процесса непрерывной разливки стали с помощью современных САЕ-и-CAD – систем / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Н.А. Бобылёва и др. – Текст : непосредственный // – Вестник Липецкого государственного технического университета – 2016. – №1. – с.38-45.

3. **Жильцов, А.П.** Разработка алгоритма и компьютерной программы для расчёта надёжности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли/ А.П. Жильцов, Д.А. Вишневицкий, В.А. Козачишен, А.В. Бочаров – Текст : непосредственный // Чёрные металлы. - №11 (1043). – 2018. – с.27-33.

4. **Сидоров, В.А.** Практика анализа отказов оборудования / В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская – Текст : непосредственный // Металлургическая и горнорудная промышленность. – №4 (283). – 2013. – с. 100-103.

5. Повышение долговечности опорных роликов МНЛЗ / Ю.А. Самойлович, В.И. Тимошпольский, В.А. Горяинов, С.М. Кабитов – Текст : непосредственный // Литье и металлургия, 2008, №1 (45). – с. 49-54.

6. **Возьянов, Е.И.** Повышение эффективности работы роликов слябовых машин непрерывного литья заготовок / Е.И. Возьянов, О.В. Коробка, О.В. Карауланов и др. – Текст : непосредственный // Металлург. - №7. – 2018. – с. 59-64.

7. **Паршин, В.М.** Непрерывная разливки стали/ В.М. Паршин, Л.В. Буланов – Текст : непосредственный // Липецк. – изд-во ПАО «НЛМК». – 2011. – 221 с.

8. **Слесарев, М.Э.** Повышение работоспособности подшипниковых опор роликов МНЛЗ за счёт химической промывки системы охлаждения сегментов / М.Э. Слесарев, А.П. Жильцов, Е.В. Чемоданов – Текст : непосредственный // В книге: Повышение эффективности металлургического производства. Сборник тезисов докладов XXVI областной научно-технической конференции [Текст]: Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета. – 2018. – С. 46-49.

Ключевые слова: УНРС, сегмент, охлаждение, надёжность, отказ, стойкость.

Сведения об авторах:

Слесарев Максим Эдуардович, студент группы ММО-17-1 кафедры металлургического оборудования Липецкого государственного технического университета.

Жильцов Александр Павлович, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургического оборудования Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

## **A PERFORMANCE INDICATORS ANALYSIS OF CONTINUOUS CASTER PROCESS ZONES**

M.E. Slesarev, A.P. Zhiltsov

The article examines factors affecting the performance indicators of the caster secondary cooling zones. Failure rates were analysed, comparative segment lifetime analysis per caster process zones was carried out, a positive effect of improving the segment cooling system on reducing the amount of mal-functions in the secondary cooling zone elements and the increase of segments lifetime are reflected.

Keywords: continuous caster, process zone, segment, cooling, reliability, failure, lifetime.

УДК669.18:621.746.27

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В 50-ТОННОМ ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АРГОНА**

Липецкий государственный технический университет  
Новолипецкий металлургический комбинат

А.Н. Роговский, А.А. Шипельников,  
С.В. Скаков, В.П. Глебов, Е.Н. Тюленев

В статье представлены «пилотные» результаты расчетов движения жидкой стали в рабочем пространстве 50-тонного промежуточного ковша при продувке аргоном через донные продувочные балки. Проанализировано влияние расположения продувочных устройств относительно перегородки и стопора на изменение направления и скорости потоков расплава.

Продувка расплава аргоном в процессе непрерывной разливки является эффективной составляющей современной технологии производства высококачественных стальных слябов и металлопроката, обеспечивающей снижение количества дефектов, связанных с наличием неметаллических включений экзогенного и эндогенного характера. Применение аргона сразу решает несколько фундаментальных проблем, связанных с недостаточным перемешиванием различных по составу и температуре объемов расплава, с мало контролируемыми траекториями движения крупных неметаллических и шлаковых включений, а также с неизбежным развитием процесса вторичного окисления ввиду контакта с окислительной атмосферой как «зеркала» металла, так и движущейся струи металла в защитной трубе и погружном стакане. Сложность применения аргона заключается в необходимости конкретизации расхода и места подвода газа в рабочий объем промежуточного ковша МНЛЗ, иначе вместо эффекта аргоновой «завесы» и перенаправления неметаллических включений в синтетический шлак на поверхности разливочной камеры, можно получить струйный режим продувки с формированием разрыва поверхности шлакового покрова на «зеркале» металла. Это приведет к значительному повышению концентрации неметаллических включений в макроструктуре слитка и, как следствие, увеличит, а не снизит количество отсортированной в ЦХПП по дефектам типа «слиточная плена»металлопродукции [1-3].

Ввиду многофакторности влияния параметров производства на отсортировку проката по сталеплавильным дефектам, проведение «горячих экспериментов» или разливок серии экспериментальных плавок при использовании различных схем подачи аргона в промежуточном ковше не всегда оправдано и рентабельно. Для этих целей необходимо

применение метода вычислительного эксперимента по моделированию процесса разливки с помощью современных систем инженерного анализа, в частности программного обеспечения «ANSYSFluent» [4-7].

В лаборатории компьютерного моделирования металлургических процессов кафедры металлургических технологий ЛГТУ совместно со специалистами УРТ КЦ-1 ПАО «НЛМК» в рамках договора о техническом сотрудничестве проведены серии компьютерных экспериментов по предварительной оценке возможности применения аргона в промежуточном 50-тонном ковше с системой перегородок и турбостопом, при начальных условиях аналогичных условиям разливки низкоуглеродистой и низколегированной стали на УНРС-4,6 конверторного цеха № 1. Всего было выбрано четыре варианта проведения расчетов движения расплава в рабочем пространстве промежуточного ковша:

- 1) базовый вариант – промежуточный ковш с двумя симметричными полнопрофильными перегородками и металлоприемником типа «турбостоп»;
- 2) промежуточный ковш базового варианта с донной поперечной продувочной балкой сечением 80x80 мм, расположенной вблизи перегородки;
- 3) промежуточный ковш базового варианта с донной поперечной продувочной балкой, расположенной по центру разливочной камеры;
- 4) промежуточный ковш базового варианта с донной балкой, расположенной максимально близко к сталевыпускному отверстию ковша.

Расход аргона в трех последних вариантах принимался одинаковым и равным 10 л/мин.

На рис. 1 представлена картина движения расплава в базовом варианте конструкции промежуточного ковша: на прозрачную изометрическую модель нанесены зоны с малой скоростью движения – «застойные зоны», также справа представлен фронтальный разрез модели – проекция поля скоростей, которая подтверждает характер распределения зон с нормальной скоростью движения расплава в диапазоне от 0,04 до 0,18 м/с.

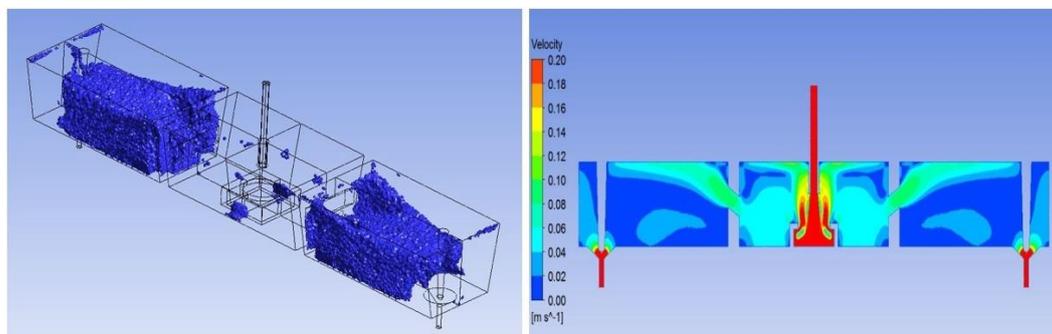


Рис. 1. Движение расплава в модели ковша по базовому варианту: слева – застойные зоны со скоростью до 0,01 м/с; справа – фронтальное сечение поля скоростей

На рис. 2 представлены результаты расчета варианта с расположением продувочной балки вблизи перегородки.

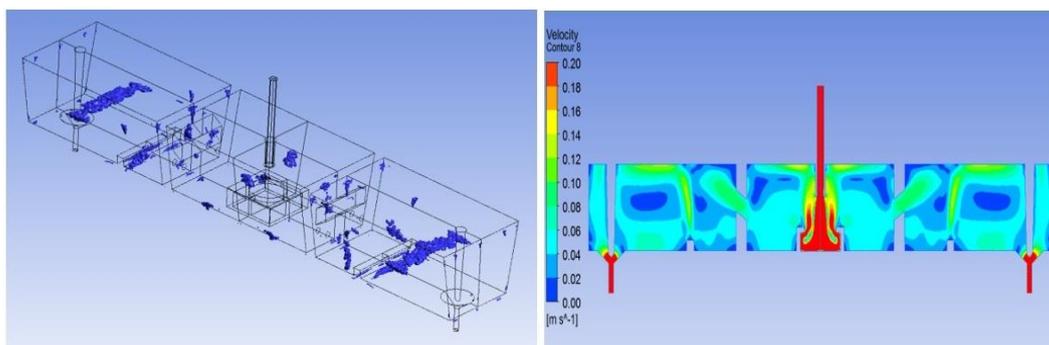


Рис. 2. Движение расплава в модели ковша по варианту два:  
*слева* – застойные зоны со скоростью до 0,01 м/с; *справа* – фронтальное сечение поля скоростей

Становится заметным влияние аргона на перемешивание и значительное уменьшение доли застойных зон, хотя об эффекте «аргоновой завесы» говорить рано. Видно, как поток всплывающих пузырьков аргона (рис. 2, *справа*) значительно смещается потоком расплава, сформированным прямоугольным отверстием перегородки.

На рис. 3 представлены результаты расчета, в котором продувочная балка расположена по центру разливочной камеры.

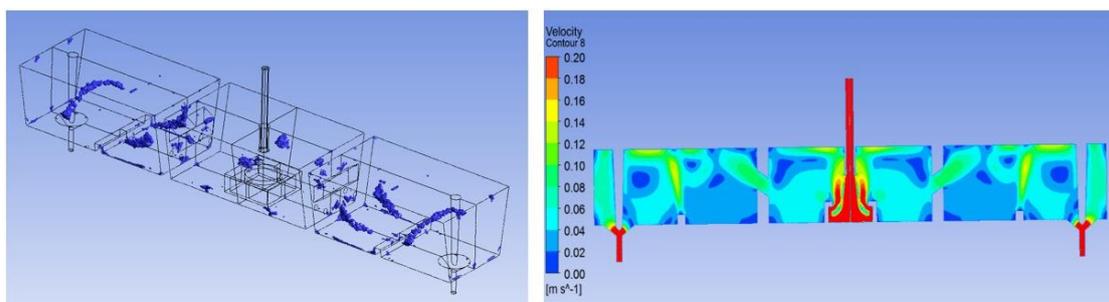


Рис. 3. Движение расплава в модели ковша по варианту три:  
*слева* – застойные зоны со скоростью до 0,01 м/с; *справа* – фронтальное сечение поля скоростей

Количество застойных зон снижается, но эффекта «завесы» также, как в варианте номер два, не получилось, наблюдается смещение потока газа потоком расплава в зоне установки стопоров (рис. 2 и 3 *справа*). (рис. 2, *справа* и 3, *справа*).

Результаты последнего варианта расчета с максимально близким к сталевыпускным отверстиям расположением балок представлены на рис. 4.

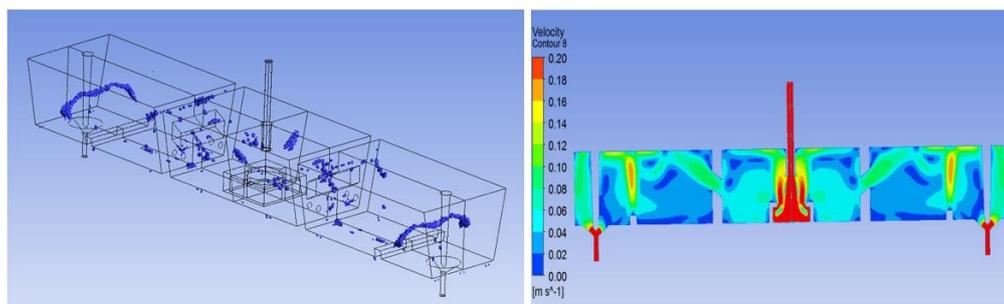


Рис. 4. Движение расплава в модели ковша по варианту четыре:  
*слева* – застойные зоны со скоростью до 0,01 м/с; *справа* – фронтальное сечение поля скоростей

В последнем четвертом варианте размещения балок количество застойных зон практически не изменилось по сравнению с вариантом номер 3, однако ставится отчетливо заметно формирование направленного практически вертикально вверх потока аргона, кинетической энергии которого вполне достаточно для создания «аргоновой завесы».

Влияние аргона на перемешивание и усреднение скорости движения потоков расплава в разливочной камере промежуточного ковша ярко выражено, особенно в зоне расположения стопора, что можно заметить при сравнении полей распределения скоростей в профильном сечении по сталевыпускному отверстию (рис. 5).

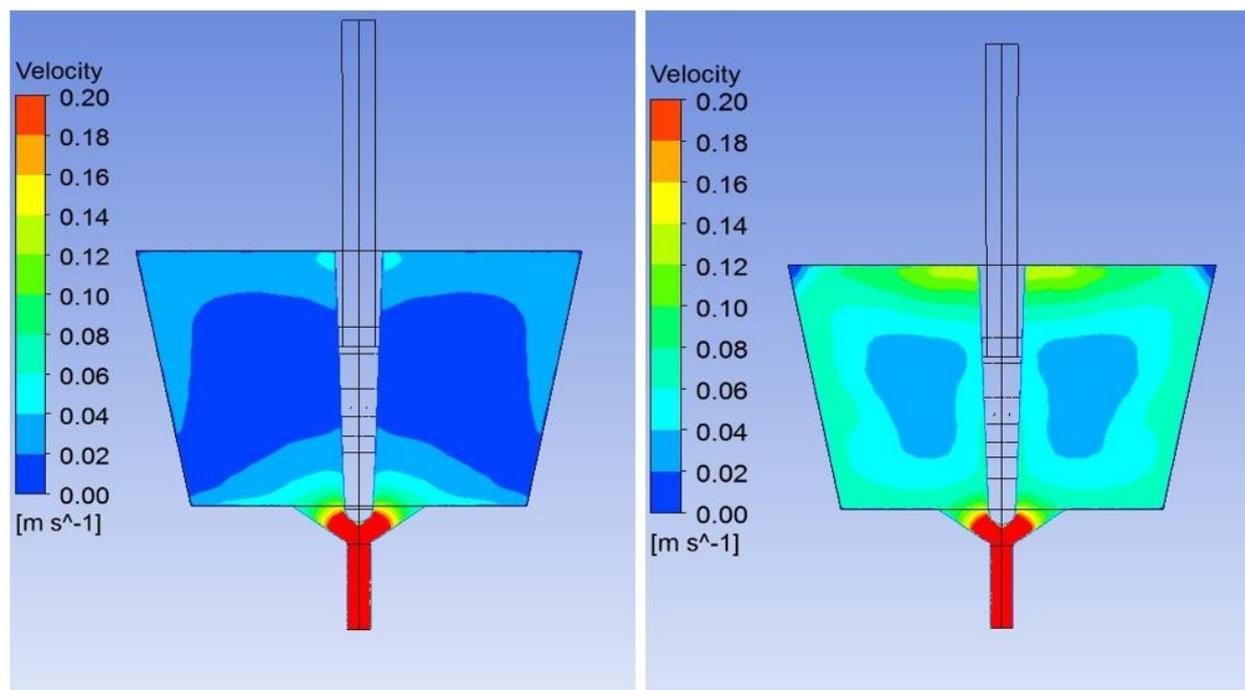


Рис. 5. Движение расплава в модели ковша по профильному сечению стопора: *слева* – базовый вариант; *справа* – четвёртый вариант подачи аргона

По результатам первого цикла моделирования движения металла в большегрузных промежуточных ковшах можно заключить, что применение аргона оказывает значительное влияние на изменение скорости и направление потоков расплава в разливочной камере, при этом лучшие результаты были получены при расположении балок ближе к сталевыпускным отверстиям. В серии будущих расчетов, несомненно, необходимо проверить это предположение, в том числе провести моделирование влияния расхода аргона на образование застойных зон в совокупности с применением различных модификаторов потока (перегородки, металлоприемники, развихрители и пр.), прежде чем перейти к стадии «горячих» экспериментов в ОНРС КЦ-1 ПАО «НЛМК».

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование движения расплава в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок с различными модификаторами потока / Роговский А.Н., Шипельников А.А., Бобылева Н.А., Роговский В.Н. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2018. – № 3 (37). – С. 87-94.
2. **Бобылева, Н.А.** К вопросу о применении САЕ-систем для моделирования процессов в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / Н. Бобылева, А. Шипельников – Текст : непосредственный // Приднепровский научный вестник. – 2017. – Т. 4, № . – С. 055-058.
3. Современные проблемы и перспективы развития компьютерного моделирования движения расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ /

А.А.Шипельников, А.Н.Роговский, Н.А. Бобылева, С.В. Скаков – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Том 62 №5. – С. 374-380

4. Закономерности влияния различных конструкций модификаторов потока на гидродинамику металла в промежуточном ковше / Шипельников А.А., Роговский А.Н., Бобылева Н.А., Скаков С.В. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. № 4 (34). С. 38-43.

5. Оптимизация технологии донной продувки аргоном металла в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ / С.Е. Aguilar-Rodriguez [et al] – Текст : непосредственный // Металлург. – 2017. – №12. – С. 20-28.

6. Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish / H. Arcos-Gutierrez, J. de J. Barreto, S. Garcia-Hernandez [et al.] // Applied Mathematics. – 2012 P. – April. 1-16.

7. Physical and mathematical modeling of inclusion removal with gas bottom-blowing in continuous casting tundish / M. J. Zhang [et al.] // Journal of mining and metallurgy. – 2011. - № 47. – P. 37-44.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, моделирование, промежуточный ковш, продувка аргоном, движение потоков расплава, МНЛЗ.

Сведения об авторах:

Роговский Александр Николаевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

Шипельников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

Скаков Сергей Викторович, старший преподаватель кафедры металлургических технологий Липецкого государственного технического университета.

Глебов Владимир Петрович, ведущий инженер Управления развития технологии ПАО «НЛМК».

Тюленев Евгений Николаевич, начальник группы по технологии производства стали Управления развития технологии ПАО «НЛМК».

E-mail: lex1366@yandex.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30

## **FEATURES FOR THE COMPUTATIONAL MODELLING OF MELT MOVEMENT IN A 50-TON TUNDISH WITH ARGON BLOWING**

A.N. Rogotovskiy, A.A. Shipelnikov,  
S.V. Skakov, V.P. Glebov, E.N. Tyulenev

The paper presents the first results of calculating the liquid steel movement in the working space of a 50-ton tundish during argon blowing through bottom blowing beams. The influence of the blowing devices location against the wall and the stopper on the direction and speed of melt flows is analyzed.

Keywords: continuous casting, modeling, tundish, argon blowing, liquid metal flows, CCM.

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОКОРДА

Липецкий государственный технический университет

Д.Н. Москалев, И.А. Цыганов

Дополнительное изучение свойств покрытия проволоки для производства металлокорда способствует повышению конкурентоспособности конечного продукта на европейском и российском рынках. Качество металлокорда в большой степени определяет качество автомобильных шин, к которым с каждым годом предъявляются все более высокие требования.

Современные производственные тенденции направлены на повышение прочности металлокорда, разработку новых конструкций канатов, а также на улучшение качества латунного покрытия проволоки и повышение адгезионных свойств металлокорда к резине автошин. Для этого необходимо изучение и внедрение новых методов контроля поверхности покрытия.

В данной работе сравнивались два метода определения содержания меди в покрытии: рентгенофлуоресцентный и микрорентгеноспектральный анализ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы было сравнение двух методов определения содержания меди в латунированном покрытии высокоуглеродистой проволоки металлокорда. Метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) применяется в реальных заводских условиях, метод микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) был опробован в лабораторных условиях с использованием растрового электронного микроскопа TESCAN Vega3 SBH с приставкой для МРСА Oxford Instruments. В работе также выявлялось расхождение результатов, полученных с помощью методов РФА и МРСА, а также возможность применимости микрорентгеноспектрального анализа в заводских условиях.

Для исследования отбирались образцы латунированной проволоки под мокрое волочение диаметром 1,67 мм («толстая» проволока) с разным содержанием меди в покрытии. В заводских условиях химический состав покрытия определяли путем стравливания 1 кг поверхностного слоя и определения спектра с помощью метода РФА [1]. В лабораторных условиях химический анализ проводили на РЭМ путем послойного определения химического состава общего спектра на 12 равномерно расположенных участках поперечного сечения шлифа проволоки [2].

Для производства металлокорда используется проволока с содержанием меди в покрытии в пределах 62,5–64,5%. Отклонение содержания меди в покрытии как в меньшую (61%), так и в большую (65%) сторону является нежелательным, так как при этом образуется  $\beta$ -фаза латуни и при вулканизации резины на поверхности покрытия возникает нежелательная сульфидная пленка, снижающая адгезию металлокорда к автошине [3-5].

Химический состав «тонкой» проволоки (диаметром 0,30 мм) после мокрого волочения определялся методами РФА и МРСА. Ввиду сложности определения химического состава покрытия толщиной в пределах 0,1–0,5 мкм, МРСА осуществлялся в местах с наибольшей концентрацией латуни на видимых площадках, т.е. в рисках и впадинах на 12 равномерно расположенных участках поперечного сечения шлифа проволоки с расчетом средней величины концентрации меди.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты сравнения химического состава латунированного покрытия «толстой» проволоки диаметром 1,67 мм и «тонкой» проволоки диаметром 0,30 мм представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

### Химический состав покрытия толстой проволоки

| № образца | Содержание меди в покрытии, % ат. |                          | Разница в определении содержания меди методами РФА и МРСА, % ат. |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------|--|
|           | Определение методом РФА           | Определение методом МРСА |  |
| 1         | 61,40                             | 62,00                    | 0,60   |
| 2         | 62,40                             | 62,21                    | 0,19   |
| 3         | 65,00                             | 65,35                    | 0,35   |

Таблица 2

### Химический состав покрытия тонкой проволоки

| № образца | Содержание меди в покрытии, % ат. |                          | Разница в определении содержания меди методами РФА и МРСА, % ат. |
|-----------|-----------------------------------|--------------------------|--|
|           | Определение методом РФА           | Определение методом МРСА |  |
| 1         | 63,94                             | 68,13                    | 4,19   |
| 2         | 62,79                             | 62,88                    | 0,09   |
| 3         | 65,43                             | 67,38                    | 1,95   |

Характерные электронно-микроскопические изображения изучаемого общего спектра покрытия «толстой» проволоки диаметром 1,67 мм и «тонкой» проволоки диаметром 0,30 мм представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

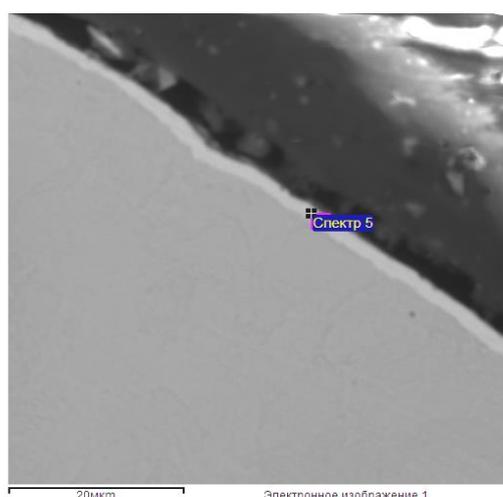


Рис. 1. Общий спектр покрытия толстой проволоки диаметром 1,67 мм с высоким содержанием меди (образец № 3), увеличение  $\times 3\ 750$

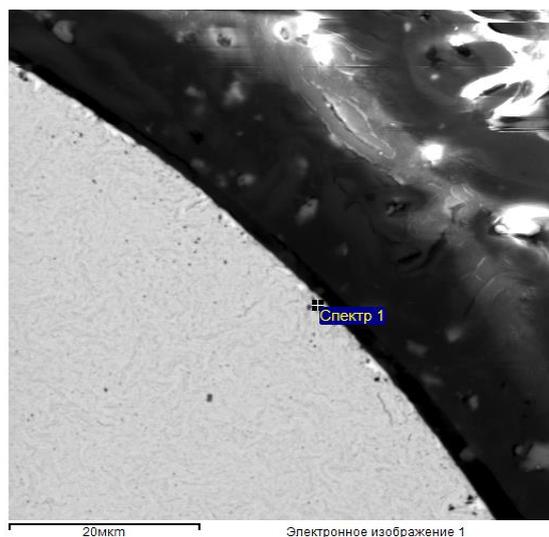


Рис. 2. Общий спектр покрытия тонкой проволоки диаметром 0,30 мм с высоким содержанием меди (образец № 3), увеличение  $\times 3\ 750$

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- 1) как видно из табл. 1 и 2, имеющаяся разница в измеренном химическом составе, в особенности для тонкой проволоки после мокрого волочения, говорит о том, что рентгенофлуоресцентный анализ в сочетании с методом стравливания показывает усредненное содержание меди по объему материала в отличие от микрорентгеноспектрального анализа, который выявляет содержание меди послойно по поперечному сечению покрытия;
- 2) при определении точного химического состава покрытия тонкой проволоки в поперечном сечении методом МРСА возникают существенные отличия по сравнению с данными РФА, связанные с малой величиной толщины покрытия, которую трудно анализировать с помощью режима вторичных электронов (SE) в методе МРСА;
- 3) сложность определения толщины латунированного покрытия тонкой проволоки методом МРСА заключается в том, что покрытие на одну треть и более состоит из железа [5] и граница раздела покрытие–сталь размыта, что сказывается на определении места изучения спектра;
- 4) содержание меди в наблюдаемых рисках и впадинах тонкой проволоки диаметром 0,30 мм выше, чем среднее содержание меди по покрытию.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Андрианов, Н.В.** Адгезия резины к металлокорду и ее сохранение / Н.В. Андрианов, А.Н. Савенок, А.А. Кравцов [и др.] – Текст : непосредственный // *Металлургия*. – 2005. – № 2(34). – С. 36 – 44.
2. **Куренкова, Т.П.** Применение растрового электронного микроскопа, оснащенного системой микроанализа для исследования качества латунного покрытия / Т.П. Куренкова, В.И. Возная – Текст : непосредственный // *Литье и металлургия*. – 2010. – № 3 (56). – С. 110 – 114.
3. **Харитонов, В.А.** Совершенствование технологии производства высокопрочной проволоки для армирующих материалов автомобильных шин / В.А. Харитонов, А.Ю. Столяров. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 97 с. – Текст : непосредственный.

4. **Алексеев, Ю.Г.** Металлокорд для автомобильных шин / Ю.Г. Алексеев, Н.А. Кувалдин. – Москва : Металлургия, 1992. – 192 с. – Текст : непосредственный.

5. **Шмурак, И.Л.** Технология крепления шинного корда к резине/ И.Л. Шмурак, С.А. Матюхин, Л.И. Дашевский. – Москва : Химия, 1993. – 129 с. – Текст : непосредственный.

Ключевые слова: химический состав, латунное покрытие, металлокорд, проволока.

Сведения об авторах:

Москалев Дмитрий Николаевич, магистрант кафедры Физического металловедения Липецкого государственного технического университета.

Цыганов Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Физического металловедения Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-fm@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

#### **A COMPARISON OF TWO METHODS FOR DETERMINING THE CHEMICAL COMPOSITION OF BRASS PLATED WIRE FOR METAL CORD PRODUCTION**

D.N. Moskalyov, I.A. Tsyganov

In the present paper, X-ray fluorescence (XRF) and energy dispersive X-ray (EDX) analyses for the copper determination in brass plated wire are compared.

Keywords: chemical composition, brass coating, metal cord, wire.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале «Вестник Липецкого государственного технического университета» публикуются статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера.

Статья должна поступить на электронный адрес kaf-vm@stu.lipetsk.ru и сохранена в версии Microsoft Word 2003. Рукопись статьи (1 экземпляр) и сопроводительные документы должны быть высланы в редакцию. К сопроводительным документам относятся:

– рецензия, отражающая следующие пункты: актуальность представленной работы; характеристика объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическая значимость работы; учебно-методическая ценность исследования, стиль изложения; степень разработанности темы научного исследования; структурность работы. (В случае если один из авторов является доктором наук, то рецензия должна быть подписана доктором соответствующего профиля.)

– выписка из протокола заседания кафедры, на котором было принято решение о рекомендации публикации статьи в журнал «Вестник Липецкого государственного технического университета».

– согласие на публикацию и гарантии того, что статья не будет больше нигде опубликована, подписанные автором.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

1. На первой странице должны быть указаны: УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название учреждения, представляющего рукопись для опубликования.

2. Текст статьи набирается в формате \*.doc шрифтом Times New Roman размером 12 pt через одинарный интервал, без отступов, отступ красной строки 0,5 см, выравнивание по ширине, без уплотнения. Поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2 см. Не использовать табуляций, автоматических списков. Не использовать курсив, жирный текст и подчеркивания.

Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела.

3. Для набора формул применять редактор Microsoft Equation 3.0. Формулы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, без курсива, размером 12 pt, одинарным интервалом.

Большие формулы необходимо разбивать на отдельные части. Фрагменты формул должны быть независимы (при использовании редактора формул каждая строка – отдельный объект).

Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

4. Таблицы должны быть оформлены шрифтом Times New Roman, размером 12 pt, одинарным интервалом. В случае, если в тексте есть ссылка на таблицу, то пишется слово «табл.».

5. Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Библиографический список должен быть оформлен согласно ГОСТ 7.0.100-2018. Ссылки на библиографический список в тексте приводятся в квадратных скобках.

6. Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим государственным стандартам.

7. К статье прилагаются: аннотация; ключевые слова (не менее трех); имена и фамилии авторов, ученые звания, должности и адрес места работы, электронный адрес; отдельным файлом на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов.

УДК 519.854

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПЕЧИ ОБЖИГА КЛИНКЕРА С УЧЕТОМ ДОПУСТИМЫХ  
ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ**

Липецкий государственный технический университет

А.М. Попов, С.Л. Васильев

Рассматривается идентификация модели печи обжига клинкера, управление с учетом допустимых значений параметров.

Модель печи обжига клинкера, которая является...

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Васильев, С.Л.** Математическое моделирование систем / С.Л. Васильев, А.М. Попов. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 130 с.
2. **Петров, С.Л.** Моделирование нейронных сетей / С.Л. Петров, А.М. Попов. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2010. – 124 с.

Ключевые слова: математическая модель, печь обжига клинкера.

Сведения об авторах:

Попов Андрей Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

Васильева Инна Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: kaf-vm@stu.lipetsk.ru

Адрес: г. Липецк, ул. Московская, 30.

**RESEARCH OF MODEL OF THE FURNACE OF ROASTING OF CLINKER TAKING INTO  
ACCOUNT ADMISSIBLE VALUES OF PARAMETERS**

Popov A.M., Vasilyeva I.A.

Identification of model of the furnace of roasting of clinker, management taking into account admissible values of parameters is considered.

Keywords: mathematical model, clinker roasting furnace.

**ВЕСТНИК**

**Липецкого государственного технического университета  
(Вестник ЛГТУ)**

**№ 2 (40). 2019 г.**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**Scientific and technical journal «Vestnik LSTU»**

Свидетельство о регистрации средства массовой информации **ПИ № ФС77-57003**. Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 25.02.2014 г.

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

*Адрес редакции: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.*

Телефон: (4742) 32-81-33.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-82-14.

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Подписано в печать 22.10.2019. Выход в свет 31.10.2019.

Бумага офсетная. Формат 60x84 1/8. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 6,5. Тираж 500 экз.

Заказ № 674. Цена свободная.

Отпечатано в полиграфическом подразделении Издательства ЛГТУ.

Адрес: 398055, Липецк, ул. Московская, 30.

Телефон: (4742) 32-82-14.