

# ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета  
(Вестник ЛГТУ)

№ 3 (52) 2023.

**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) 25.02.2014 г.

ISSN 2304-9235

# ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета

(Вестник ЛГТУ)

№ 3 (52) 2023.

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.

**Ризаева Юлия Николаевна**

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. Пеньков В.Б. (Россия)

**Машиностроение**

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)

**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)

**Транспорт и логистика**

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](mailto:kaf-vm@stu.lipetsk.ru)

**СОДЕРЖАНИЕ  
ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И  
УПРАВЛЕНИЕ**

**CONTENTS**

**COMPUTER SCIENCES,  
COMPUTER ENGINEERING AND  
CONTROL**

*СТР.*

- |    |   |   |
|----|---|---|
| 5  | <b>Е.С. Дуванов, И.А. Седых,<br/>М.Ю. Шишов</b><br>Проектирование компьютерной<br>системы электронной библиотеки<br>кафедры информатики   | <b>E.S. Duvanov, I.A. Sedykh,<br/>M.Yu. Shishov</b><br>Designing a computer system for the it<br>department Digital library   |
| 13 | <b>И.А. Седых, Н.Д. Клименко</b><br>Калькулятор с программной<br>реализацией метода интегрирования<br>по частям для интегралов 1-го типа  | <b>I.A. Sedykh, N.D. Klimenko</b><br>Software implementation of the<br>integration by parts method for integrals<br>of the 1 <sup>st</sup> kind                             |
| 21 | <b>А.П. Щербаков</b><br>L-алгоритм моделирования<br>переменных состояния стадии<br>диффузии производства сахара   | <b>A.P. Shcherbakov</b><br>L-algorithm for state variable modeling<br>the diffusion stage in sugar production   |
| 27 | <b>Р.В. Батищев, Д.С. Бестиков,<br/>Е.В. Ларина</b><br>Синтез нечеткого ПИД-регулятора<br>с использованием лабораторной<br>установки «Тепловой объект»                                    | <b>R.V. Batishchev, D.S. Bestikov,<br/>E.V. Larina</b><br>Synthesis of a fuzzy PID- controller<br>using <i>thermal object</i> laboratory<br>simulator                       |
| 38 | <b>И.И. Супрунов, А.М. Шмырин,<br/>Б.А. Бондарев</b><br>Расчет равномерных поставок<br>продукции на основе алгоритма<br>последовательной обработки<br>движущегося<br>протяженного объекта | <b>I. I. Suprunov, A.M. Shmyrin,<br/>B.A. Bondarev</b><br>Calculating the uniform product supply<br>on the basis of the algorithm of<br>processing a moving extended object |

**ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА**

**TRANSPORT AND LOGISTICS**

- |    |   |  |
|----|---|--|
| 44 | <b>Б.Н. Казьмин, М.Д. Юров</b><br>Особенности распределения момента<br>дифференциалом «power lock» при<br>установке его в задний ведущий мост<br>колесного трактора | <b>B.N. Kaz'min, M.D. Yurov</b><br>Peculiarities of torque distribution by<br><i>power lock</i> differential when installed in<br>the rear drive axle of a wheeled tractor |
| 50 | <b>А.В. Гринченко, Е. Скворцов</b><br>Разработка имитационной модели<br>технической эксплуатации автобусов<br>пассажи́рского предприятия в anylogic                 | <b>A.V. Grinchenko, E. Skvortsov</b><br>Development of a simulation model of<br>passenger buses operation and<br>maintenance in anylogic                                   |

- 59 **Ю.А. Абросимова, А.Т. Попов**  
Определение эффективности систем  
управления запасами на предприятиях

**Yu.A. Abrosimova, A.T. Popov**  
Determining the effectiveness of  
inventory management systems at  
enterprises

#### **МЕТАЛЛУРГИЯ**

#### **METALLURGY**

- 63 **В.Н. Титов, И.В. Куприянова,  
Т.В. Кравченко**  
Влияние колеблемости параметров  
доменной плавки на стабильность  
теплового состояния доменной печи

**V.N. Titov, I.V. Kupriyanova,  
T.V. Kravchenko**  
Influence of the blast furnace melting  
parameter variability on the stability of  
the blast furnace thermal state

- 69 **А.Н. Роготовский,  
А.А. Шипельников, С.В. Скаков,  
Н.А. Бобылева**  
Постановка задачи математического  
моделирования процесса вдувания  
струи кислорода в металлическую  
ванну большегрузных конвертеров

**A.N. Rogotovskiy, A.A. Shipelnikov,  
S.V. Skakov, N.A. Bobyleva**  
Formulating the problem of  
mathematical simulation of the process  
of injecting the oxygen jet into the  
metal bath of heavy load converters

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

#### **MACHINE-BUILDING**

- 79 **А.О. Должникова, В.В. Неверов**  
Определение оптимальных режимов  
сварки ёмкостей для химической  
промышленности с учётом  
производительности процесса

**A.O. Dolzhnikova, V.V. Neverov**  
Determination of optimal modes for  
welding tanks for chemical industry  
with account of process performance

- 86 **И.А. Пугачев, А.И. Володин,  
Р.Р. Гулевский**  
Особенности проектирования  
литейных форм для 3d-печати по  
технологии binder jetting

**I.A. Pugachev, A.I. Volodin,  
R.R. Gulevskiy**  
Peculiarities of design of casting molds  
for binder jetting 3D-printing  
technology

- 92 К сведению авторов

- 93 Пример оформления статьи для  
публикации в журнале

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_5

УДК 621.313.1

Е.С. ДУВАНОВ, И.А. СЕДЫХ, М.Ю. ШИШОВ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЙ  
БИБЛИОТЕКИ КАФЕДРЫ ИНФОРМАТИКИ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Спроектирована компьютерная система электронной библиотеки кафедры информатики. Разработана информационная система для автоматизации учебной деятельности студентов. Информационная система предназначена для оптимизации процессов обучения и обеспечения эффективного взаимодействия между преподавателями и студентами.

**Ключевые слова:** компьютерная система, информационная система, база данных postgres, объектно-ориентированное программирование, система электронной библиотеки.

E.S. DUVANOV, I.A. SEDYKH, M.Yu. SHISHOV

**DESIGNING A COMPUTER SYSTEM FOR THE IT DEPARTMENT  
DIGITAL LIBRARY**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** A computer system for the IT department digital library is designed. An information system is developed to automate students' learning activities. The information system is meant to optimize educational processes and provide effective interaction between professors and students.

**Key words:** computer system, information system, postgres database, object-oriented programming, digital library system.

**ВВЕДЕНИЕ**

В данной работе представлена разработка компьютерной системы электронной библиотеки кафедры информатики.

Актуальность работы подтверждается практической необходимостью стандартизации и систематизации данных студентов. Стандартизация данных позволяет обеспечить единообразие и удобство использования информации, а также облегчает обмен данными между различными системами и учебными заведениями. Систематизация данных позволяет структурировать информацию таким образом, чтобы она была легко

доступна и обрабатываема, что упрощает процессы анализа и принятия решений на основе этих данных. Разработка данной системы требует учета особенностей кафедры информатики, соблюдения современных стандартов безопасности и защиты данных. Необходимо создать удобный интерфейс для пользователей, обеспечить возможность быстрого поиска и доступа к информации, а также реализовать функционал для анализа и отображения статистических данных.

В работе представлено:  
описание автоматизированных функций объекта;

разработка общей концепции построения компьютерной системы, информационной системы;

разработка информационного обеспечения вычислительной системы.

Назначение системы:

Компьютерная система электронной библиотеки кафедры информатики обеспечивает связь компьютеров для обмена информацией, совместного использования сетевого оборудования, информационных ресурсов, устройств хранения информации и обеспечения контроля доступа.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к современной ЛВС, является обеспечение безопасности и защищенности процессов, происходящих в ЛВС.

## ВЫБОР ТОПОЛОГИИ СЕТЕЙ

При создании компьютерной сети передачи данных, когда соединяются все компьютеры сети и другие сетевые устройства, формируется топология компьютерной сети.

Топология – это конфигурация соединения элементов в сеть. Важнейшие характеристики сети это ее надежность, производительность, стоимость, защищенность и т.д.

В данной работе используется топология «звезда», при которой компьютер подключается отдельным кабелем к общему устройству, называемому коммутатором (концентратором, хабом), находящемуся в центре сети. На рис. 1 представлена топология «звезда».

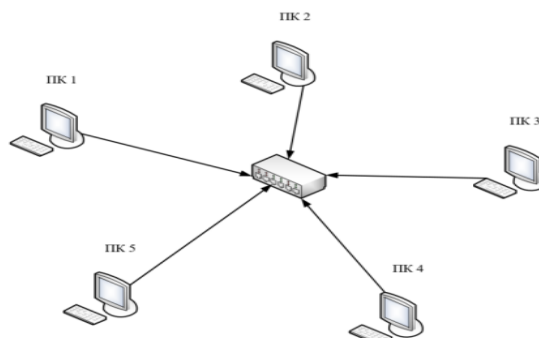


Рис. 1. Топология «звезда»

Достоинства топологии «звезда»:

1) выход из строя одной рабочей станции или повреждение ее кабеля не отражается на работе всей сети в целом;

2) отличная масштабируемость;

3) легкий поиск и устранение неисправностей и обрывов в сети;

4) высокая производительность;

Территориально кафедра информатики ЛГТУ находится на 4 этаже и включает

одну лабораторию и одну аудиторию. Стены из кирпича, толщина внутренних стен 20 сантиметров. Высота потолков 3 метра.

Структурная схема спроектированной локальной вычислительной сети представлена на рис. 2.

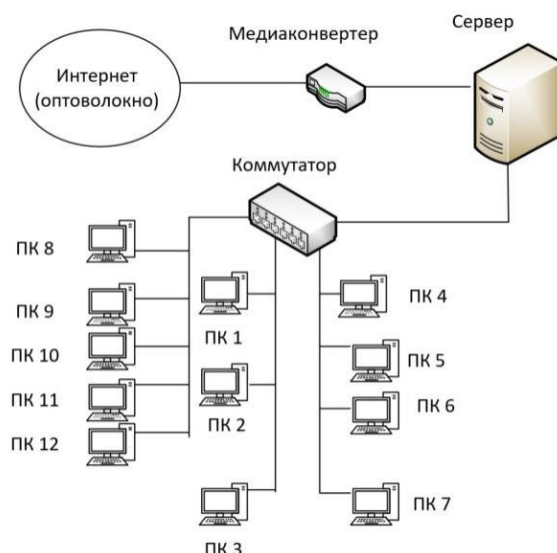


Рис. 2. Схема ЛВС с топологией «Звезда»

ЛОКАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ  
В таблице 1 представлены

технические характеристики сервера  
HPE ProLiant DL160 Gen10.

Таблица 1

Технические характеристики сервера HPE ProLiant DL160 Gen10

Параметры	Характеристики
Форм-фактор сервера	1U (rack)
Процессор	Intel Xeon Silver 421R, 2,4 ГГц
Количество ядер процессора	12
Тип памяти	DDR4 RDIMM ECC
Объём ОЗУ	16 Гб
RAID контроллер	Программный, HPE Smart Array S100i
Потребляемая мощность	500 Вт

Таблица 2

Технические характеристики коммутатора TP-Link TL-SG1016 16 x RJ45

Параметры	Характеристики
Тип устройства	Коммутатор неуправляемый
Количество портов	16
Скорость передачи данных	1000 Мбит/с
Внутренняя пропускная способность	23,8 Гбит/с
Сетевые стандарты	IEEE 802.3u, IEEE 802.3x, IEEE 802.3ab, IEEE 802.3
Потребляемая мощность	10 Вт

Mikrotik RB962UIGS-5НасТ2НnТ это беспроводной маршрутизатор с поддержкой стандарта Wi-Fi 802.11ac и скоростью передачи данных до 1300 Мбит/с. Он также имеет пять гигабитных портов Ethernet, два порта

USB, слот для карты памяти microSD и поддержку PoE.

Данный маршрутизатор поддерживает множество функций, включая беспроводное управление, настраиваемые правила маршрутизации, VPN-сервер,

межсетевой экран и другие функции безопасности. Он широко используется в различных сетевых сценариях, включая домашние сети, офисные сети и общественные сети Wi-Fi.

Hyperline ORK2A-3268-RAL9005 - это стойка для установки оборудования, выполненная из стали толщиной 2 мм, покрытой порошковой краской цвета RAL9005 (черный). Она предназначена для установки в стойку 19-дюймового оборудования, такого как сетевые коммутаторы, маршрутизаторы, серверы и другие сетевые устройства.

Стойка имеет размеры 326.8 мм x 45 мм x 100 мм (ширина x высота x глубина) и может устанавливаться в стандартные 19-дюймовые стойки или крепиться к стене. Она оснащена двумя вертикальными уголками для установки оборудования и горизонтальным профилем для крепления к стойке.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ СТРУКТУРИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Проектирование Схемы СКС представлено на рис. 3.

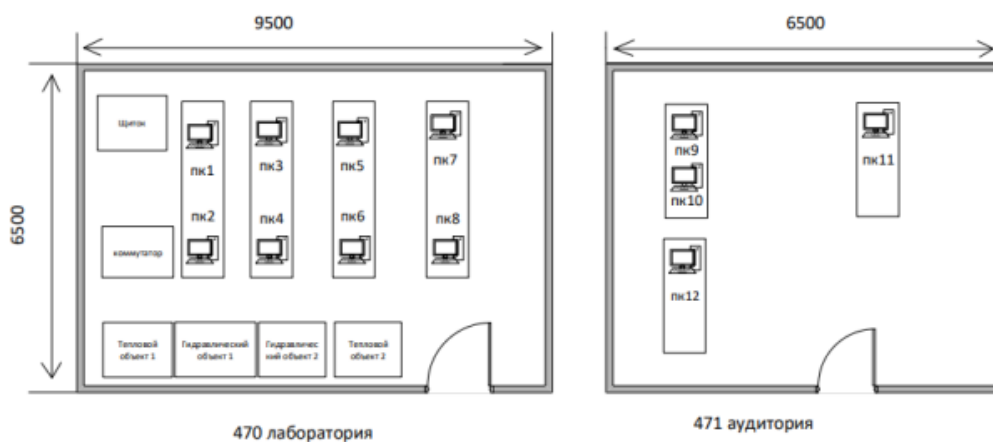


Рис. 3. Схема СКС

Схема наполнения примерной серверной стойки представлена на рис. 4,

на рис. 5 схема электропитания.



Рис. 4. Схема наполнения серверной стойки

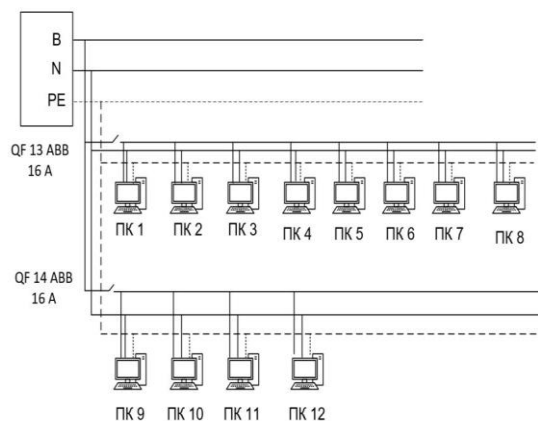


Рис. 5. Структурная схема электропитания

### СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Структурная схема информационной системы приведена на рис. 6

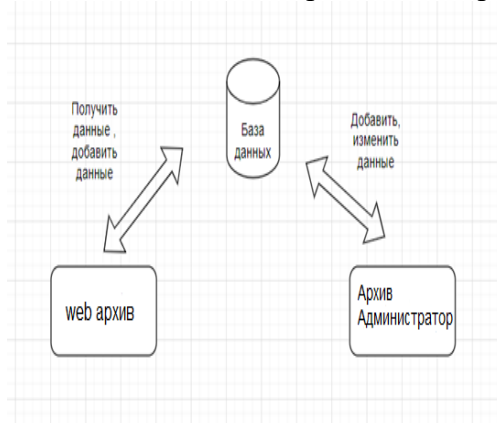


Рис. 6. Структурная система информационной системы «АРХИВ»  
РУКОВОДСТВО АДМИНИСТРАТОРА

На рис. 7 представлен модуль «Показать данные», который позволяет изменить данные в базе данных.

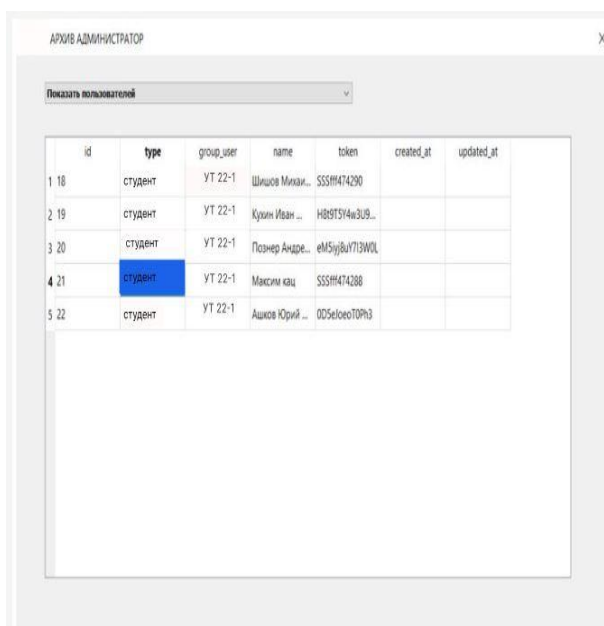


Рис. 7. Функция «Показать данные»

Используется как мониторинг данных и проверки их подлинности, в случае обнаружения ошибки в данных пользователя информационной системы

необходимо воспользоваться модулем «Изменить данные». На рис. 8 показан модуль “Изменить данные”



Рис. 8. Функция «Изменить данные»

На рис. 9 и 10 показано модуль «Скачивание/Загрузка книг»,

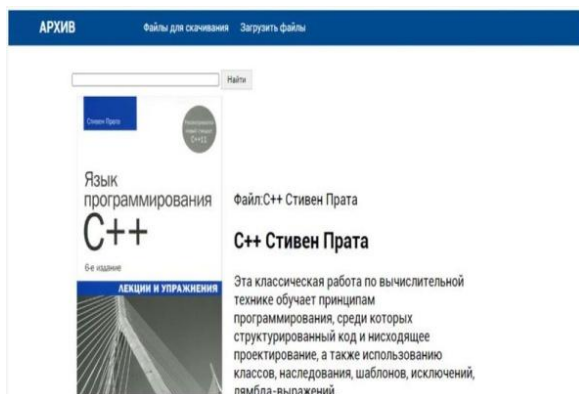


Рис. 9. Функция «Скачивание книги»

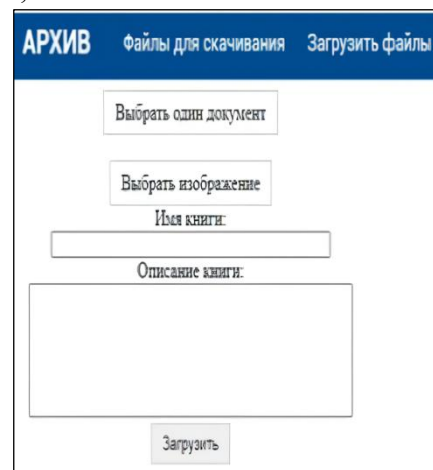


Рис. 10. Функция «Загрузка книги»

Страница «загрузка книги» показана на рис. 10, часть этого модуля представляет собой загрузка самого документа и загрузки изображения, которое послужит обложкой книги. На самой странице имеется функция поиска, предназначенная для поиска книги в информационной системе. Можно написать полное название книги или

символы, которые присутствуют в названии.

### ОПИСАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

База данных является неотъемлемой частью информационной системы, в которой хранятся обрабатываемые данные. На рис. 11 показано взаимодействие между частями информационной системы.

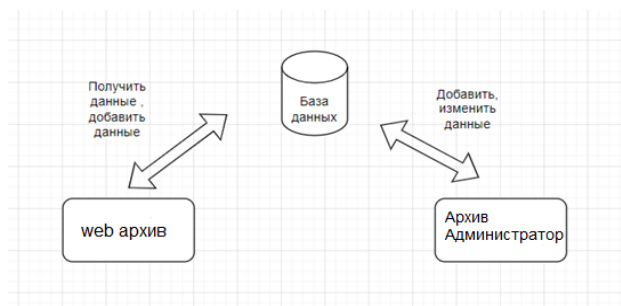


Рис. 11. Взаимодействия между элементами в системе

Таблица базы данных «visitors» служит для хранения данных о пользователях информационной системы, там указывается: имя, тип пользователя (студент, педагог), группа (если педагог, то указывается группа где он(она) является классным руководителем), но группу

педагогу указывать необязательно. Поле «token» представляет собой набор из 10-15 символов латинского алфавита и натуральных чисел, а так же символов: "!", "@", "#", "\$", "&". Таблица базы данных представлена на рис. 12.

archive_lmk visitors	
id	int(11)
name	text
type	text
group_user	varchar(12)
token	varchar(15)

archive_lmk documents	
id	bigint(20) unsigned
name_file	varchar(255)
group	varchar(255)
created_at	timestamp
updated_at	timestamp

Рис. 12. Таблица базы данных «visitors»

Таблица базы данных «documents» служит для хранения данных о документах «АРХИВ», там указывается: имя документа, группа, для которой он доступен.

Таблица базы данных «books» служит для хранения данных о книгах «АРХИВ», там указывается: Имя книги, обложка для отображения. Таблица базы данных «books» представлена на рис.13.

archive_lmk books	
id	bigint(20) unsigned
name	varchar(255)
image	varchar(255)
name_file	varchar(100)
description	varchar(255)
created_at	timestamp
updated_at	timestamp

Рис. 13. Таблица базы данных «books»

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была спроектирована компьютерная система электронной библиотеки кафедры информатики. Была создана информационная система для автоматизации учебной деятельности студентов и работы преподавателей, сотрудников кафедры.

Были проработаны вопросы:

Подбор аппаратуры и материалов для изготовления ЛВС с учетом характеристик помещений.

Расчёт потребляемой мощности для компьютерной системы.

Разработка информационной системы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Таненбаум, Э.** Архитектура компьютера: учебное пособие / Э. Таненбаум, Т. Остин. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 816 с. – Текст : непосредственный.

2. **Лафоре, Р.** Объектно-ориентированное программирование в C++ : учебное пособие / Р. Лафоре. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 928 с. – Текст : непосредственный.

3. **Олифер, В.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебное пособие / В. Олифер, Н. Олифер. – Санкт-Петербург : 2016. – 928 с. – Текст : непосредственный.

4. **Кенин, А.М.** Самоучитель системного администратора / А.М. Кенин, Д.Н. Колисниченко. – Санкт-Петербург : 2021. – 608 с. – Текст : непосредственный.

5. **Шлее, М.** Qt 5.10. Профессиональное программирование на C++. / М. Шлее. – Санкт-Петербург : 2018. – 1072 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

**Дуванов Евгений Сергеевич**  
аспирант кафедры информатики,  
Липецкий государственный технический университет.

3988055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

[evgenyduvanov@yandex.ru](mailto:evgenyduvanov@yandex.ru)

**Седых Ирина Александровна**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры высшей математики,  
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

ORCID 0000-0003-0012-8103

[sedykh-irina@yandex.ru](mailto:sedykh-irina@yandex.ru)

**Шишов Михаил Юрьевич**  
студент кафедры информатики,  
Липецкий государственный технический университет.

3988055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

[fandimfromitaly@yandex.ru](mailto:fandimfromitaly@yandex.ru)

6. **Таненбаум, Э.** Современные операционные системы. 4-е изд. / Э. Таненбаум.– Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 1120 с. – Текст : непосредственный.

7. **Кудрин, Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий. / Б.И. Кудрин. – Санкт-Петербург : 2005. – 672 с. – Текст : непосредственный.

8. **Чистов, Д.В.** Проектирование Информационных систем. / Д.В. Чистов.– Москва : 2019. – 258 с. – Текст : непосредственный.

9. Внутреннее устройство Windows. 7-е изд./ М. Руссинович, Д. Соломон, А. Ионеску, П. Йосифович. – Санкт-Петербург : 2018. – 944 с. – Текст : непосредственный.

10. **Рэндал, Э.** Компьютерные системы: архитектура и программирование. 3-е изд./ Рэндал Э. Брайант, Дэвид Р. О'Халларон. – Москва : 2022. – 994 с. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

**Duванov Evgeny Sergeevich**  
Postgraduate Student of the Department of  
Computer Science,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[evgenyduvanov@yandex.ru](mailto:evgenyduvanov@yandex.ru)

**Sedykh Irina Alexandrovna**  
Doctor of Technical Sciences, Professor of  
the Department of Higher Mathematics,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[sedykh-irina@yandex.ru](mailto:sedykh-irina@yandex.ru)

**Shishov Mikhail Yuryevich**  
Student of the Department of Computer  
Science  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[fandimfromitaly@yandex.ru](mailto:fandimfromitaly@yandex.ru)

И.А. СЕДЫХ, Н.Д. КЛИМЕНКО

**КАЛЬКУЛЯТОР С ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ МЕТОДА ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПО ЧАСТЯМ ДЛЯ ИНТЕГРАЛОВ 1-го ТИПА**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В работе представлен метод интегрирования по частям для интегралов 1-го типа и описан калькулятор с программной реализацией данного метода. Метод интегрирования по частям является важным методом для вычисления сложных определенных и неопределенных интегралов. Приведенный пример программной реализации основан на языке программирования высокого уровня Си, обеспечивающем удобный и эффективный способ выполнения вычислений. Разработанный калькулятор позволяет пользователям применять метод интегрирования по частям для решения интегральных задач 1-го типа, обеспечивая точные и надежные результаты. Эта работа представляет собой удобный инструмент для студентов, преподавателей и исследователей в области математического анализа и численных методов, упрощая процесс вычисления интегралов.

**Ключевые слова:** интеграл, интегрирование по частям, калькулятор, программа, программная реализация.

I.A. SEDYKH, N.D. KLIMENKO

**SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE INTEGRATION BY PARTS METHOD FOR INTEGRALS OF THE 1<sup>ST</sup> KIND**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The paper presents the integration by parts method for integrals of the 1<sup>st</sup> kind and describes a calculator with the software implementation of this method. The method of integration by parts is an important technique for computing complex definite and indefinite integrals. The provided example of software implementation is based on the high-level programming language C which ensures convenient and efficient computations. The developed calculator enables its users to apply the method of integration by parts to solve kind 1 integral problems with accurate and reliable results. Simplifying the process of calculating integrals, this paper is a convenient tool for students, professors and researchers in the field of mathematical analysis and numerical methods,.

**Keywords::** integral, integration by parts, calculator, program, software implementation

**ВВЕДЕНИЕ**

Математический анализ – одна из ключевых дисциплин в области высшей математики, которая занимается изучением функций, их свойств и операций над ними. Главный аспект математического анализа – это интегрирование функций. С его помощью можно находить площади, объемы, центры тяжести и так далее. Одним из основных методов интегрирования является метод интегрирования по частям, который используется для нахождения интеграла от произведения двух функций. В

данной работе представлена программная реализация метода интегрирования по частям, проведен анализ формул для метода интегрирования по частям. Основная цель данной работы – рассмотреть метод интегрирования по частям на примере интегралов 1-го типа и разработать программную реализацию этого метода, которая позволит автоматизировать процесс нахождения интегралов, что может существенно упростить работу студентам математических специальностей.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Метод интегрирования по частям – это один из методов интегрирования, используемый для нахождения интеграла от произведения двух функций. Он основан на формуле дифференцирования произведения двух функций. Формула выглядит следующим образом [1-3]:

$$\int u \cdot dv = u \cdot v - \int v \cdot du, \quad (1)$$

где  $u$  и  $dv$  – это две функции, которые необходимо выбрать таким образом, чтобы дифференциал от  $u$  был легко вычисляем, а интеграл от  $dv$  мог быть выражен аналитическим методом. В математическом анализе существуют 3 типа интегралов, берущихся методом интегрирования по частям. Рассмотрим 1 тип, в него входят следующие интегралы:

$$\int P_n(x)e^{ax} dx; \quad (2)$$

$$\int P_n(x) \sin(ax) dx; \quad (3)$$

$$\int P_n(x) \cos(ax) dx, \quad (4)$$

где  $P_n(x)$  является многочленом  $n$ -ой степени, а  $e^{ax}$ ,  $\sin(ax)$ ,  $\cos(ax)$  представляют собой подынтегральные функции.

Для вычисления интегралов 1 типа (2), (3) и (4) по формуле (1) за  $u$  необходимо взять многочлен  $P_n(x)$ , за  $dv$  – оставшуюся функцию. Особенность данного метода заключается в том, что применять данный метод интегрирования по частям необходимо  $n$ -ое количество раз к получившемуся интегралу из предыдущего

ответа, что соответствует степени многочлена.

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве языка программирования был выбран язык программирования высокого уровня Си. Программная реализация метода интегрирования по частям позволяет пользователю задавать интеграл для расчета с консоли. Пользователь не ограничен в выборе степени многочлена, программа способна обработать интеграл с любой степенью многочлена. Также в программе предусмотрена защита от некорректного ввода пользователя, что в свою очередь повышает общую оптимизацию программы и полностью предотвращает её аварийное завершение. Еще стоит отметить, что программа рассчитана на неограниченный поток ввода интегралов без необходимости ее перезапуска. Для удобства пользователя был разработан оптимальный вывод результатов.

Для функционирования программы подключаются две важные библиотеки [4-5]:  
– `stdio.h` – стандартная библиотека языка программирования Си, она предоставляет набор функций для работы с потоками ввода – вывода, то есть позволяет пользователю взаимодействовать с программой;  
– `string.h` – стандартная библиотека языка программирования Си, она предоставляет набор функций для корректной работы со строковыми значениями.

Работа программы основана на 7 взаимосвязанных функциях. Рассмотрим каждую из функций:

1. Функция `input_coefficients` – данная функция предназначена для заполнения многочлена пользователем с консоли. На входе программа функция получает указатель на одномерный массив `polynomial`, в котором хранятся коэффициенты многочлена и число  $n$  – степень многочлена. Фрагмент кода:

```
// функция для ввода многочлена пользователем
void input_coefficients(int* polynomial, int n){
    int temp;
    printf("Введите коэффициенты: \n");
    for (int i = 0; i <= n; i++) {
        // если степень x = 1
        if (n - i == 1) {
            printf("x: ");
            while(scanf("%d", &temp) != 1){
```



```

// вычисляем производные n-1 раз и сохраняем коэффициенты i степени в массив
for (int i = 1; i <= n; i++) {
    derivative(coefficients[i-1], n-i+1, coefficients[i]);
    for (int j = 0; j <= (n - i); j++) {
        degrees[i][j] = degrees[i-1][j+1];
    }
}
}

```

3. Функция `derivative` – данная функция предназначена для расчета всех возможных производных многочлена  $n$ -ой степени. На вход она получает два указателя на два одномерных массива, первый отвечает за текущие коэффициенты, а второй за результирующие коэффициенты. Производная вычисляется по следующей формуле:

$$polynomial[i] \cdot (n - i), \quad (5)$$

где `polynomial[i]` – текущее значение коэффициента,  $n$  – степень многочлена,  $i$  – шаг итерации цикла. Фрагмент кода:

```

// функция для вычисления коэффициентов производной
void derivative (int* polynomial, int n, int* result){
    // вычисляем коэффициенты производной и сохраняем их в result
    for (int i = 0; i <= n; i++) {
        result[i] = polynomial[i] * (n - i);
    }
}

```

4. Функции `compute_cos`, `compute_sin`, `compute_e` – данные функции предназначены для заполнения двумерного массива функций – `functions`. На вход функции получают двумерный массив функций, коэффициент  $a$  и степень многочлена  $n$ . Из практического решения интегралов было выявлено, что заполнение данного массива следует производить из расчета табличного интеграла от трех видов функций. Формулы выглядят следующим образом:

$$\int \cos(ax) dx = \frac{1}{a} \cdot \sin(ax) + C; \quad (6)$$

$$\int \sin(ax) dx = -\frac{1}{a} \cdot \cos(ax) + C; \quad (7)$$

$$\int e^{(ax)} dx = \frac{1}{a} \cdot e^{(ax)} + C. \quad (8)$$

Фрагмент кода:

```

// функция для заполнения массива функций интеграла вида e^(ax)
void compute_e(char functions[][50], int a, int n){
    // зададим начальную функцию
    sprintf(functions[0], "1/%d*cos(%dx)", a, a);
    int temp = 1;
    for (int i = 0; i <= n; i++){
        temp *= a;
        sprintf(functions[i], "1/%d*e^(%dx)", temp, a);
    }
}

```

// функция для заполнения массива функций интеграла вида  $\sin(ax)$

```

void compute_sin(char functions[][50], int a, int n){
    // зададим начальную функцию
    sprintf(functions[0], "1/%d*cos(%dx)", a, a);
    int temp = a;
    for (int i = 1; i <= n; i++){
        temp *= a;
        if((i % 2) != 0){
            sprintf(functions[i], "1/%d*sin(%dx)", temp, a);
        }else{
            sprintf(functions[i], "1/%d*cos(%dx)", temp, a);
        }
    }
}

// функция для заполнения массива функций интеграла вида cos(ax)
void compute_cos(char functions[][50], int a, int n){
    // зададим начальную функцию
    sprintf(functions[0], "1/%d*sin(%dx)", a, a);
    int temp = a;
    for (int i = 1; i <= n; i++){
        temp *= a;
        if((i % 2) != 0){
            sprintf(functions[i], "1/%d*cos(%dx)", temp, a);
        }else{
            sprintf(functions[i], "1/%d*sin(%dx)", temp, a);
        }
    }
}

```

5. Функция program – данная функция предназначена для объединения всех функций, перечисленных выше. В данной функции инициализируется память под все массивы. Данная функция запрашивает степень многочлена у пользователя, после чего сразу вызывает функции для заполнения многочлена и расчета производных этого многочлена. В функции реализовано ветвление на несколько подтипов интегралов. При выборе определенного блока функция запрашивает коэффициент  $a$  для подынтегральной функции. После выполняется проверка: если пользователь ввел коэффициент, равный 0, то программа не вычисляет интеграл методом интегрирования по частям, а находит его как табличный степенной интеграл по формуле

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} + C. \quad (9)$$

В ином случае вызывается функция compute\_cos (или compute\_sin, или compute\_e). После чего пользователю на экран выводится введённый им интеграл и результат интегрирования по частям в виде суммы функций. Также функция program предусматривает корректный вывод знаков между частями интегрирования. В ходе практического решения были выявлены следующие закономерности: для экспоненты идет обычное чередование

знаков, начиная с «+», для косинуса сначала идет два «+», после обычное чередование, начиная с «-», для синуса сначала идет знак «-», а затем необходимо делать чередование через каждые два одинаковых знака, начиная с «+», то есть такая схема: «-» «+» «+» «-» «-» «+» «+». Блок-схема фрагмента кода приведена на рис. 1.

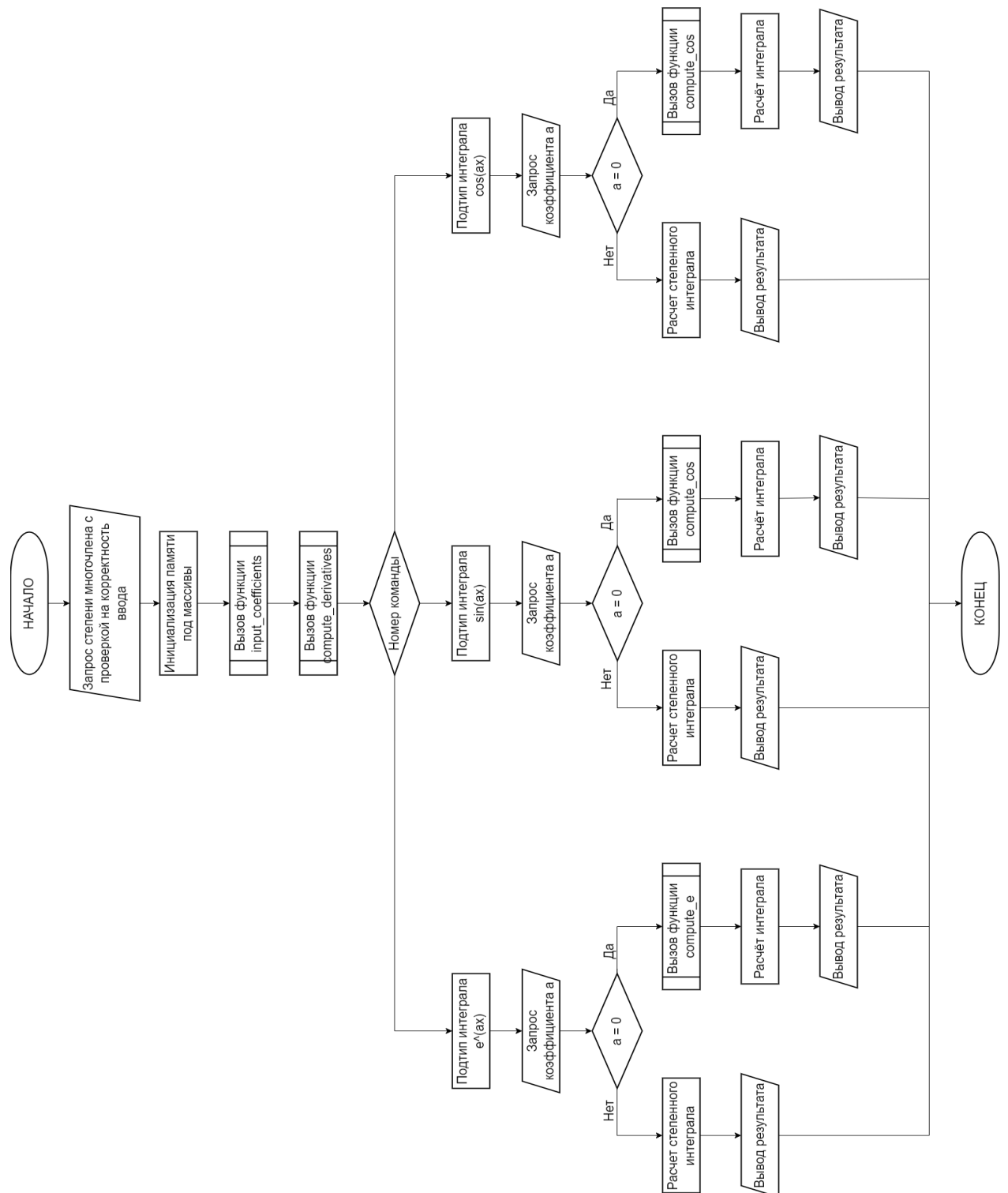


Рис. 1. Блок-схема функции program

### ПРИМЕР РАБОТЫ КАЛЬКУЛЯТОРА

На рис. 2 приведен пример работы реализованного калькулятора,

на рис. 3 приведен пример обработки некорректного ввода пользователем.

```

-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 1
Введите степень многочлена: 3
Введите коэффициенты:
x^3: 6
x^2: 4
x: 7
c: 5
Введите коэффициент а для {e^(ax)}: 2
f((6x^3) + (4x^2) + (7x) + (5))*e^(2x)dx = ((6x^3) + (4x^2) + (7x) + (5))*(1/2*e^(2x)) - ((18x^2) + (8x) + (7))*(1/4*e^(2x)) + ((36x) + (8))*(1/8*e^(2x)) - ((36))*(1/16*e^(2x)) + C
-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 2
Введите степень многочлена: 4
Введите коэффициенты:
x^4: 4
x^3: 3
x^2: 10
x: 7
c: 12
Введите коэффициент а для {sin(ax)}: 3
f((4x^4) + (3x^3) + (10x^2) + (7x) + (12))*sin(3x)dx = -((4x^4) + (3x^3) + (10x^2) + (7x) + (12))*(1/3*cos(3x)) + ((16x^3) + (9x^2) + (20x) + (7))*(1/9*sin(3x)) + ((48x^2) + (18x) + (20))*(1/27*cos(3x)) - ((96x) + (18))*(1/81*sin(3x)) - ((96))*(1/243*cos(3x)) + C
-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 3
Введите степень многочлена: 2
Введите коэффициенты:
x^2: 5
x: -3
c: 2
Введите коэффициент а для {cos(ax)}: 4
f((5x^2) + (-3x) + (2))*cos(4x)dx = ((5x^2) + (-3x) + (2))*(1/4*sin(4x)) + ((10x) + (-3))*(1/16*cos(4x)) - ((10))*(1/64*sin(4x)) + C
-----

```

Рис. 2. Пример работы калькулятора

```

-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 4
Повторите ввод!
-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 3
Введите степень многочлена: five
Ошибка ввода, повторите попытку!
Введите степень многочлена: 3
Введите коэффициенты:
x^3: 5
x^2: 4
x: t
Ошибка ввода, повторите попытку!
x: 8
c: n
Ошибка ввода, повторите попытку!
c: 12
Введите коэффициент а для {cos(ax)}: 0
f((5x^3) + (4x^2) + (8x) + (12))*cos(0x)dx = ((5x^4/4) + (4x^3/3) + (8x^2/2) + (12x)) + C
-----
1 - расчет интеграла вида fP_n(x)*e^(ax)dx
2 - расчет интеграла вида fP_n(x)*sin(ax)dx
3 - расчет интеграла вида fP_n(x)*cos(ax)dx
0 - выход из программы
Введите команду: 0
Программа завершена!> █

```

Рис. 3. Пример обработки некорректного ввода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье представлен калькулятор с программной реализацией метода интегрирования по частям для интегралов 1-го типа. Рассмотрены основные формулы и приведен пример работы программы на языке Си, демонстрирующий функциональность и точность калькулятора. Разработанный калькулятор представляет

собой полезный инструмент для студентов, преподавателей и исследователей, позволяющий упрощать процесс вычисления интегралов 1-го типа. В дальнейшем возможно расширение функциональности калькулятора двумя подтипами интегралов, что способствовало бы еще более широкому применению данного метода интегрирования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Письменный, Д.Т.** Конспект лекций по высшей математике: полный курс. – 9-е издание/ Д.Т. Письменный. – Москва : Айрис-пресс, 2009. – 608 с. – Текст : непосредственный.

2. Сборник задач по высшей математике – 7-е издание/ К.Н. Лунгу, Д.Т. Письменный, С.Н. Федин, Ю.А. Шевченко. – Москва: Айрис-пресс, 2008. – 576 с. – Текст : непосредственный.

3. **Ашарина, И.В.** Основы программирования на языках С и С++ : Курс

лекций для высших учебных заведений/ И.В. Ашарина. – Москва: Гор. линия-Телеком, 2018. – 208 с. – Текст : непосредственный.

4. **Керниган, Б.У.** Язык программирования С / Перевод с англ. В.Л. Бродовой / Б.У. Керниган, Д.М. Ритчи. – Москва : Вильямс, 2016. – 304 с. – Текст : непосредственный.

5. **Кудрявцев, Л.Д.** Курс математического анализа (в 2 томах): учебник для студентов вузов. Т. 1. / Л.Д. Кудрявцев – Москва : Высшая школа, 1981. – 687 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

**Седых Ирина Александровна**

доктор технических наук,  
профессор кафедры высшей математики,  
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

ORCID 0000-0003-0012-8103

e-mail: [sedykh-irina@yandex.ru](mailto:sedykh-irina@yandex.ru)

**Клименко Никита Дмитриевич**

студент кафедры автоматизированных систем управления

Липецкий государственный технический университет.

ул. Московская, д. 30.

398055, Россия, г. Липецк,

Information about the authors:

**Irina Alexandrovna Sedykh**

Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department of Higher Mathematics

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

email: [sedykh-irina@yandex.ru](mailto:sedykh-irina@yandex.ru)

**Klimenko Nikita Dmitrievich**

Student of the Department of Automated Control Systems

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

А.П. ЩЕРБАКОВ

## L-АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ СТАДИИ ДИФФУЗИИ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье описывается алгоритм рекуррентной иерархической идентификации регрессионной модели температурного режима стадии диффузии производства сахара на основе трихотомии невязок промежуточных моделей (L-алгоритм). В алгоритме используется схема, позволяющая построить окрестностную модель в процессе идентификации иерархического разбиения входных данных. Данный алгоритм позволяет улучшить качество аппроксимации некоторой начальной аналитической модели на основе анализа ее невязок и последующей рекуррентной идентификации дополнительных слагаемых, соответствующих иерархическому разбиению области определения входов модели (входных кортежей).

**Ключевые слова:** идентификация, алгоритм идентификации, окрестностные модели, регрессионная модель, невязки.

A.P. SHCHERBAKOV

## L-ALGORITHM FOR STATE VARIABLE MODELING THE DIFFUSION STAGE IN SUGAR PRODUCTION

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article describes an algorithm for recurrent hierarchical identification of a regression model for the diffusion stage temperature mode in sugar production based on the trichotomy of residuals of intermediate models (L-algorithm). The algorithm uses a scheme that makes it possible to develop a neighborhood model while identifying the hierarchical partitioning of input data. This algorithm makes it possible to improve the approximation quality of some initial analytical model based on the analysis of its residuals and subsequent recurrent identification of additional terms corresponding to the hierarchical partitioning of the domain of model input definition (input tuples).

**Keywords:** identification, identification algorithm, neighborhood models, regression model, residuals.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлены результаты применения квазистатистических окрестностных систем в задаче управления температурным режимом стадией диффузии производства сахара в диффузионном аппарате колонного типа. В данной работе процесс получения диффузионного сока рассматривается как система, элементами которой являются ошпариватель, диффузионная колонна и подогреватель [2, 3].

Для математической формализации технологического процесса в работе [1] была построена окрестностная структура (рис. 1), представляющая собой орграф (см. [9-13]). Вершинами (узлами) данного орграфа являются следующие стадии процесса: узел 1 – получение сокоотружечной смеси в ошпаривателе; узел 2 – технологический поток диффузионного сока из ошпаривателя; узел 3 – процесс экстракции сахара в диффузионной колонне; узел 4 – операция выгрузки сырого жома в

верхней части диффузионной колонны; узлы 0 и  $\infty$  – дополнительные формальные узлы,

соответствующие внешним входам и выходам системы.

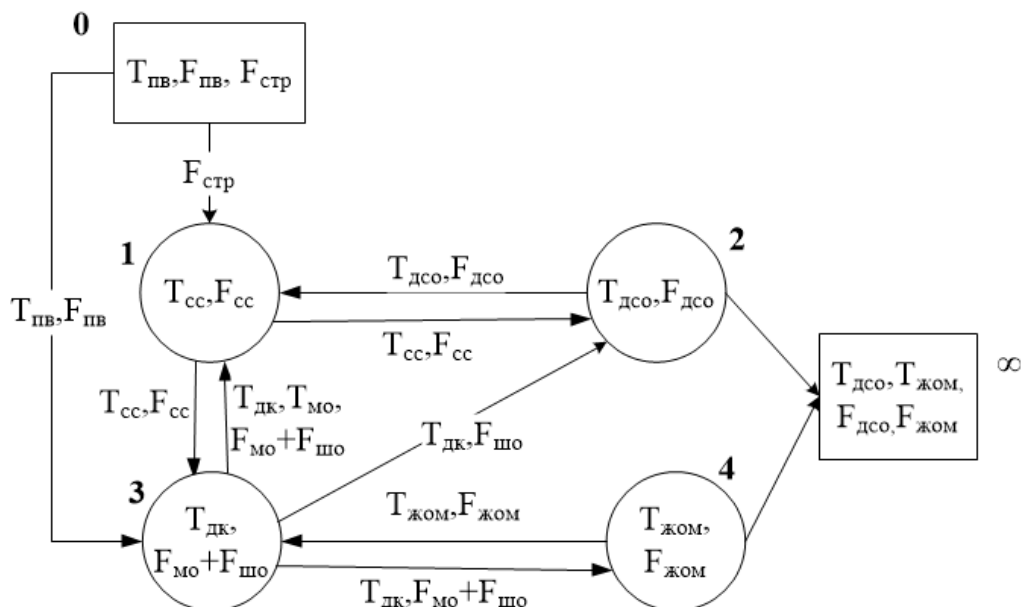


Рис. 1. Окрестностная структура процесса диффузии

Переменные параметры  $T$  и  $F$  с различными индексными обозначениями в структуре процесса (см. рис. 1) показывают соответственно температуры и расходы (объемы) того или иного сырья, участвующего в процессе диффузии и экстрагирования.

Переменными состояниями окрестностной структуры являются  $T_{сс}$ ,  $T_{дк}$ ,  $T_{дсо}$ ,  $T_{жом}$ , остальные переменные являются управлениями и выходами.

При этом основными параметрами, определяющими процесс экстрагирования, являются  $T_{сс}$  и  $T_{дк}$  [4].

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

В работе [1] выводится реляционная окрестностная система, одно из уравнений которой имеет следующий вид:

$$T_{дк} = f(T_{сс}, T_{пв}, T_{жом}, F_{шом} + F_{мо}, F_{сс}, F_{жом}, F_{пв}), \quad (1)$$

являющийся важным для управления температурным режимом.

При этом рассматривается линейная реализация данного уравнения, условием для которой является отсутствие

коррелирующих между собой пар переменных-регрессоров. В ходе выявленных при обработке данных автором [1] коллинеарных пар, уравнение (1) приняло следующий вид:

$$T_{дк} = f(T_{сс}, T_{пв}, F_{сс}, F_{пв}, F_{жом}), \quad (2)$$

в линейном случае оно имеет следующий вид:

$$T_{дк} = a_0 + a_1 T_{сс} + a_2 T_{пв} + a_3 F_{сс} + a_4 F_{пв} + a_5 F_{жом}, \quad (3)$$

где  $T_{дк}$  – температура диффузионного сока в нижней части диффузионной колонны,

$T_{сс}$  – температура сокоотружечной смеси,

$T_{пв}$  – температура питательной воды,

$F_{сс}$  – расход сокоотружечной смеси,

$F_{пв}$  – расход питательной воды,

$F_{жом}$  – расход жома.

Так как идентификация уравнения (2) является важным этапом управления температурными режимами стадии диффузии сахара, обычную множественную линейную регрессию (3), идентифицируемую и используемую в работе [1], можно улучшить с помощью введенных в работах [5-8] алгоритмов рекуррентной иерархической

идентификации, в частности L-алгоритма (алгоритма Лебега):

1. Идентифицируется некоторая начальная (например, линейная) модель  $F^1(x)$  по всем данным.

2. Вычисляются остатки (невязки) начальной модели

$$\hat{d}^1 = \hat{d} - F^1(x). \quad (4)$$

3. Проводится кластеризация [14] (в частности, трихотомия) остатков модели. Получаем ассоциированное с кластеризованными значениями остатков разбиение пространства входов

$$D = D_1 \cup \dots \cup D_r,$$

где  $r$  – число кластеров остатков и, соответственно, разбиений пространства входных данных (множества кортежей входов). При трихотомии остатков  $r = 3$ .

4. Идентифицируются уточняющие линейные (или нелинейные) модели второго уровня  $F_{i(x)}^2(x)$  – модели каждого кластера-

разбиения, для которых выходной величиной служат остатки.

5. Процесс итерируется: для каждой из линейных моделей последнего уровня  $k$  (из уже построенных) проводится кластеризация (трихотомия) невязок этой модели, находятся прообразы в пространстве входов для каждого кластера и идентифицируются уточняющие модели следующего уровня.

В работе [1] была идентифицирована линейная модель (3) (для L-алгоритма она является начальной моделью  $F^1(x)$ ), имеющая вид

$$T_{\text{дк}} = 23,335 + 0,588T_{\text{сс}} + 0,079T_{\text{пв}} + 0,003F_{\text{сс}} + 0,008F_{\text{пв}} - 0,006F_{\text{жом}}; \\ R = 0,8; F_{\text{расч}} = 3885,2; F_{\text{табл}} = 2,21; \bar{A} = 0,58\%. \quad (5)$$

Здесь  $R$  – коэффициент множественной корреляции,  $F_{\text{расч}}$  – расчетное значение критерия Фишера,  $F_{\text{табл}}$  – табличное значение критерия Фишера (для  $p = 0,05$ ),  $\bar{A}$  – среднее отклонение (ошибка) относительно среднего значения в процентах.

#### ПРИМЕНЕНИЕ L-АЛГОРИТМА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ТРИХОТОМИЕЙ НЕВЯЗОК К ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

Применим для модели (2) L-алгоритм идентификации с трихотомией невязок. Выбирается некоторое число  $\varepsilon$  (точность аппроксимации) и после построения аналитической модели  $F^1(d)$ , по величине соответствующих остатков (невязок) множество входных данных  $D \subset \mathbb{R}^n$  разбивается на три подмножества, ассоциированных с этими остатками, по формуле:

$$D = D_\varepsilon \cup D^- \cup D^+ \\ D_\varepsilon = \{d \in D; |\hat{d} - F^1(x)| < \varepsilon\}, \\ D^- = \{d \in D; \hat{d} < F^1(x) - \varepsilon\}, \\ D^+ = \{d \in D; \hat{d} > F^1(x) + \varepsilon\}, \quad (6)$$

где  $\hat{d} \in \mathbb{R}^1$  – это значение выхода для входа  $d \in \mathbb{R}^n$ . Для подмножества  $D_\varepsilon$  процесс

построения модели закончен (требуемая точность уже достигнута); для подмножеств  $D^-$  и  $D^+$  идентифицируем уточняющие

модели (в нашем случае – линейные)  $F^{2,-}(d), d \in D^-$  и  $F^{2,+}(d), d \in D^+$ . Далее процесс итерирован для множеств  $D^-$  и  $D^+$ .

Исходную линейную модель  $F^1(d)$  для всего множества данных можно считать одноуровневой моделью. Иерархичность образуется при первом разбиении множества  $D$  по правилу (6) и идентификации уточняющих моделей  $F^{2,-}(d), d \in D^-$ ,  $F^{2,+}(d), d \in D^+$ , и последующих разбиениях и идентификациях моделей. Выбор значения  $\varepsilon$  определяется исследователем, при этом очевидно, что чем меньше  $\varepsilon$ , тем меньше элементов попадут в  $D_\varepsilon$  и, соответственно, больше в  $D^-$  и  $D^+$ . За этим может следовать более «глубокое» иерархическое разбиение, длина маршрута дерева  $T$ , кодирующего иерархическую окрестностную модель, увеличится (см. [6]). Модель второго уровня представлена по формуле (7).

При идентификации общей трехуровневой квазилинейной модели

$$D = D_\varepsilon \text{ И } D^- \text{ И } D^+, D^- = D_{\varepsilon,-} \text{ И } D^{-,-} \text{ И } D^{-,+}, D^+ = D_{\varepsilon,+} \text{ И } D^{+,-} \text{ И } D^{+,+}$$

1 – й уровень иерархии :

$$\forall d \in D_\varepsilon, F^1(d) = 23,335 + 0,588T_{cc} + 0,079T_{ne} + 0,003F_{cc} + 0,008F_{ne} - 0,006F_{ж.о.м};$$

2 – й уровень иерархии :

$$\forall d \in D^-, F^{2,-}(d) = 22,02 + 0,634T_{cc} + 0,043T_{ne} + 0,004F_{cc} + 0,007F_{ne} - 0,009F_{ж.о.м};$$

$$\forall d \in D^+, F^{2,+}(d) = 24,315 + 0,519T_{cc} + 0,159T_{ne} - 0,00026F_{cc} + 0,0089F_{ne} - 0,00744F_{ж.о.м};$$

(7)

3 – й уровень иерархии :

$$\forall d \in D^{-,-}, F^{3,-,-}(d) = 19,4115 + 0,673T_{cc} + 0,0248T_{ne} + 0,0074F_{cc} + 0,007F_{ne} - 0,0152F_{ж.о.м};$$

$$\forall d \in D^{-,+}, F^{3,-,+}(d) = 22,917 + 0,61T_{cc} + 0,0595T_{ne} + 0,0034F_{cc} + 0,00718F_{ne} - 0,00687F_{ж.о.м};$$

$$\forall d \in D^{+,-}, F^{3,+,-}(d) = 23,86 + 0,556T_{cc} + 0,1147T_{ne} + 0,0017F_{cc} + 0,0077F_{ne} - 0,00645F_{ж.о.м};$$

$$\forall d \in D^{+,+}, F^{3,+,+}(d) = 24,7464 + 0,4885T_{cc} + 0,2355T_{ne} - 0,009F_{cc} + 0,01259F_{ne} - 0,0079F_{ж.о.м};$$

(8)

(модели регрессий на всех уровнях были линейными) по L-алгоритму с трихотомией невязок были получены следующие результаты: трехуровневая квазилинейная модель имеет вид, представленный по формуле (8). Коэффициент множественной корреляции  $R = 0,963$ , расчетное значение критерия Фишера  $F_{расч} = 28407$  (при том же табличном значении критерия, что в формуле (4), а именно 2,21), средняя ошибка относительно среднего значения в процентах  $\bar{A} = 0,18 \%$ .

Также интересным показателем служит средний квадрат ошибки (MSE), который изначально не был отображен в работе [1]; рассчитаем его для моделей (4) и (7). Для модели (4) MSE равен 0,3974. Для модели (8) показатель равен 0,0767. Как видим, все показатели ( $R$ ,  $\bar{A}$ , MSE) при моделировании иерархической модели были улучшены по сравнению с обычной линейной моделью.

## АНАЛИЗ АКФ ОСТАТКОВ МОДЕЛЕЙ

В работе [7] предлагается использовать автокорреляционную функцию (АКФ) (см, например, [15]) остатков моделей в качестве оценки построенных моделей и выводов о целесообразности «достраивания» иерархических окрестностных моделей, т.е. добавления новых уровней иерархии по

L-алгоритму. Рассмотрим коррелограммы для лагов  $\tau = 1, \dots, 15$  остатков улучшаемой в данной работе линейной модели (5), двухуровневой модели по L-алгоритму (7) и трехуровневой модели по L-алгоритму (7). Они представлены на рис. 2–4.

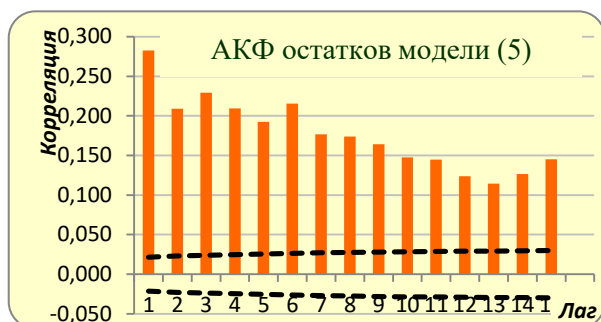


Рис. 2. АКФ остатков модели (5)



Рис. 3. АКФ остатков модели (7)

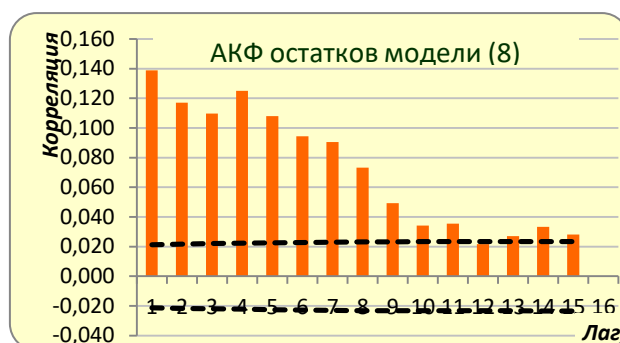


Рис. 4. АКФ остатков модели (8)

На представленных выше рисунках следует обратить внимание на значения автокорреляций остатков моделей (вертикальная шкала). Видно, что с увеличением иерархий (ростом глубины дерева  $T$ , кодирующего иерархичную модель) согласно L-алгоритму, снижается величина корреляций.

Такая ситуация означает, что иерархические модели с добавлением новых уровней точнее аппроксимируют описываемый процесс, оставляя в остатках все меньше информации. Отсутствие какой-либо информации о процессе в остатках модели очередного уровня эквивалентно ситуации, когда АКФ для остатков мало отличима от АКФ для «белого шума». Однако, близкая к полной или полная тождественность модельных значений выходной переменной ее реальным

измеренным значениям, аналогичная ситуации, известной как переобученность модели. Такая модель не будет обладать необходимым качеством прогнозирования, учитывая сложный нелинейный процесс на реальном производстве. В связи с этим обычно проверяют прогностические свойства модели на зарезервированных тестовых данных. Можно предположить, что анализ АКФ в иерархических моделях позволяет в некоторых случаях обойтись без тестовых данных, поскольку приближение АКФ к белому шуму можно считать индикатором остановки алгоритма для исключения дальнейшей переобученности. В данной работе можно остановить L-алгоритм на построенной трехуровневой модели (8).

## ВЫВОДЫ

В результате исследований видно, что все показатели иерархической модели (8) заметно улучшились по сравнению с обычной линейной моделью регрессии, следовательно, можно сделать вывод о целесообразности использования L-

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Канюгина, А.С.** Разработка квазистатических окрестностных систем и их применение в задаче управления температурным режимом стадии диффузии производства сахара: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Канюгина Анастасия Сергеевна; Липецкий государственный технический университет. – Липецк, 2019. – 126 с. – Место защиты: ФБГОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Текст : непосредственный.

2. **Сапронов, А.Р.** Технология сахара / А.Р. Сапронов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 232 с. – Текст : непосредственный.

3. **Силин, П.М.** Технология сахара / П.М. Силин. – Москва : Пищевая промышленность, 1967. – 632 с. – Текст : непосредственный.

4. Инструкция по ведению технологического процесса свеклосахарного производства: Утверждено Министерством пищевой промышленности СССР 11.05.85. – Москва : Б. и., 1985. – 372 с. – Текст : непосредственный.

5. **Щербаков, А.П.** Иерархическая квазилинейная модель прогнозирования свойств клинкера. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19. № 3. – С. 17–22.

6. **Мишачев, Н.М.** Две схемы иерархической идентификации квазилинейных моделей / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, А.П. Щербаков. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического

идентификации иерархических моделей при анализе температурных режимов диффузии сахара с целью последующих этапов прогнозирования и управления процессом диффузии.

университета. – 2023. – Т. 19. № 1. – С. 7–13.

7. **Щербаков, А.П.** Трехуровневая иерархическая регрессионная модель / А.П. Щербаков, А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев. – Текст : непосредственный // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции. – Липецк, 2023. – С. 283–288.

8. **Щербаков, А.П.** Генерирование тестовых данных для регрессионной идентификации казилинейных иерархических моделей. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 3 (49). – С. 41–47.

9. **Блюмин, С.Л.** Окрестностные системы: монография / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин. – Липецк : ЛЭГИ, 2005. – 132 с. – Текст : непосредственный.

10. **Шмырин, А.М.** Линеаризация, идентификация и управление окрестностными системами / А.М. Шмырин, О.А. Шмырина // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – № 3. – С. 40–44. – Текст : непосредственный.

11. **Шмырин, А.М.** Реляционные окрестностные системы / А.М. Шмырин., Н.М. Мишачёв, А.С. Канюгина. – Текст : непосредственный // Современные сложные системы управления: НТCS'2017: материалы XII Международной научно-практической конференции, 25-27 октября 2017 г. В 2 частях. Ч. 2. – Изд-во Липецкого государственного технического университета. – 2017. – С. 74–77.

12. **Шмырин, А.М.** Метрики на множестве узлов окрестностной структуры / А.М. Шмырин, Н.М. Мишачёв, А.С. Косарева (Канюгина). – Текст : непосредственный // Системы управления и

информационные технологии. – 2016. – № 2 (64). – С. 31–35.

13. **Shmyrin, A.M.** The measure of similarity in solving the problem of clustering neighborhood structures / A.M. Shmyrin, A.S. Kosareva (Kanyugina). – Text : immediate.. – Text : immediate // Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis: Proceedings of the XXI-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, Januar 2016). – Yelm, WA, USA:

Science Book Publishing House. – 2016. – P.341–346.

14. **Дюран, Б.** Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл. – Москва : Статистика, 1977. – 128 с. – Текст : непосредственный.

15. **Кизбикенов, К.О.** Прогнозирование и временные ряды: учебное пособие / К.О. Кизбикенов. – Барнаул: АлтГПУ, 2017. – 113 с. – Текст : электронный.

Сведения об авторах:

**Щербаков Артем Петрович**

старший преподаватель кафедры высшей математики,  
Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[6dragon9@mail.ru](mailto:6dragon9@mail.ru)

Information about the authors:

**Shcherbakov Artem Petrovich**

Senior lecturer of the Department of higher mathematics,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[6dragon9@mail.ru](mailto:6dragon9@mail.ru)

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_27

УДК 621.313.1

Р.В. БАТИЩЕВ, Д.С. БЕСТИКОВ, Е.В. ЛАРИНА

### СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ «ТЕПЛОВОЙ ОБЪЕКТ»

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье приводятся результаты моделирования на лабораторной установке «Тепловой объект», используются передаточные функции по каналу входное напряжение – температура. Выполняется синтез и исследование нечетких регуляторов.

**Ключевые слова:** тепловой объект, нечеткий регулятор, MATLAB-SIMULINK, передаточная функция.

R.V. BATISHCHEV, D.S. BESTIKOV, E.V. LARINA

### SYNTHESIS OF A FUZZY PID-CONTROLLER USING *THERMAL OBJECT* LABORATORY SIMULATOR

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** This article presents the results of modeling on the *Thermal Object* laboratory facility, in particular, transfer functions along the input voltage – temperature channel are used. Fuzzy controllers are synthesized and investigated.

**Keywords:** thermal object, fuzzy controller, MATLAB-SIMULINK, transfer function.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача синтеза и настройки регуляторов различного типа является одной из основных при расчете и реализации систем автоматического управления. В данной работе используется лабораторная установка «Тепловой объект» [1-2] и нечеткий ПИД-регулятор [3, 4]. На установке производятся два эксперимента с разными условиями: начальной температурой, мощностью нагрева и

охлаждения и, соответственно, рассчитываются две передаточные функции [5-8].

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК НЕЧЕТКОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Для определения параметров нечеткого ПИД-регулятора необходимо построить в программном комплексе MATLAB-SIMULINK модель [9-13] для первой передаточной функции (рис. 1).

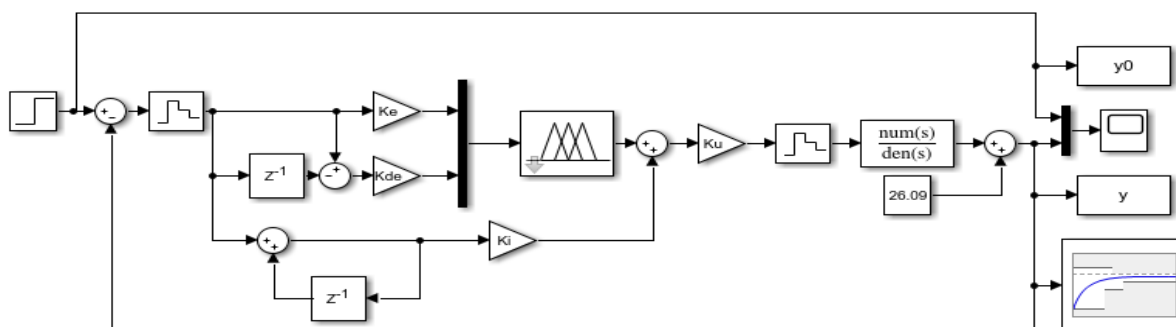


Рис. 1. Модель для определения оптимальных настроек нечеткого ПИД-регулятора

Для создания модели в библиотеке блоков Simulink в разделе FuzzyLogicToolbox выбирается блок

FuzzyLogicControllerwithRuleviewer и устанавливаются параметры (рис. 2).

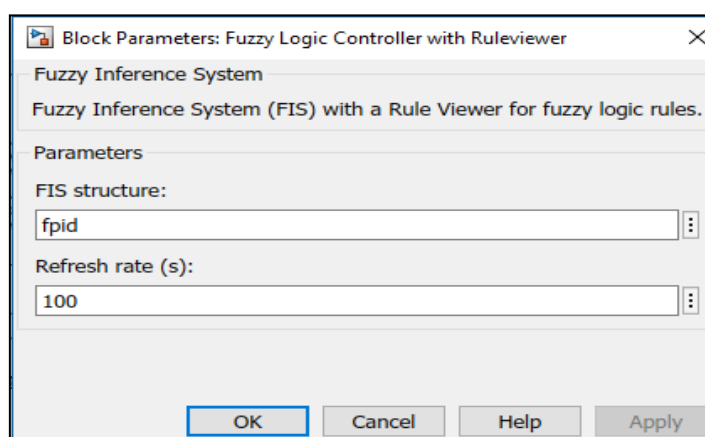


Рис. 2. Настройка параметров блока Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer

В разделе блоков Sinks выбираются два блока ToWorkspace и устанавливаются названия переменных  $y_0$  и  $y$ , как показано на рис. 2. В блоках Gain введены коэффициенты  $K_e$ ,  $K_{de}$ ,  $K_i$  и  $K_u$ , они созданы в разделе Workspace главного окна MATLAB, и приравнены значению 0.1. Настройка остальных блоков

выполнена так, как это производилось при определении передаточной функции объекта [2, 3].

Построение нечеткого ПИД-регулятора производится с помощью редактора системы нечеткого вывода FIS Editor. Устанавливаются правила нечеткого линейного ПИД-регулятора [5]:

$$R_{\text{пд}}^1: \text{если } \hat{e} \text{ есть N, } \dot{\Delta}\hat{e} \text{ есть N, то } \hat{u} \text{ есть NB,}$$

$$R_{\text{пд}}^2: \text{если } \hat{e} \text{ есть N, } \dot{\Delta}\hat{e} \text{ есть Z, то } \hat{u} \text{ есть NM,}$$
(1)

$$R_{\text{пд}}^9: \text{если } \hat{e} \text{ есть P, } \dot{\Delta}\hat{e} \text{ есть P, то } \hat{u} \text{ есть PB.}$$

Заменой  $\hat{e}$  на e1,  $\dot{\Delta}\hat{e}$  на de1 и  $\hat{u}$  на u1, записаны правила нечеткого линейного ПИД- регулятора в более удобном виде:

$$R_{\text{пд}}^1: \text{если e1 есть N, de1 есть N, то u1 есть NB,}$$

$$R_{\text{пд}}^2: \text{если e1 есть N, de1 есть Z, то u1 есть NM,}$$

$$R_{\text{пд}}^3: \text{если e1 есть N, de1 есть P, то u1 есть ZE,}$$

$$R_{\text{пд}}^4: \text{если e1 есть Z, de1 есть N, то u1 есть NM,}$$

$$R_{\text{пд}}^5: \text{если e1 есть Z, de1 есть Z, то u1 есть ZE,}$$

$$R_{\text{пд}}^6: \text{если e1 есть Z, de1 есть P, то u1 есть PM}$$

$$R_{\text{пд}}^7: \text{если e1 есть P, de1 есть N, то u1 есть ZE,}$$

$$R_{\text{пд}}^8: \text{если e1 есть P, de1 есть Z, то u1 есть PM,}$$

$$R_{\text{пд}}^9: \text{если e1 есть P, de1 есть P, то u1 есть PB.}$$
(2)

Для запуска FIS-редактора в командной строке MATLAB вводится команда fuzzy, при этом открывается окно FIS Editor Untitled. Командой File, NewFIS, Mamdani выбирается тип нечеткого вывода Mamdani. Щелчком мыши выделяется блок входной переменной input1, в поле Name

вводится e1, после чего выделяется блок выходной переменной output1 и в поле Name вводится u1. В поле Defuzzification выбирается метод bisector. Верхняя часть FIS-редактора будет иметь вид, показанный на рис. 3.

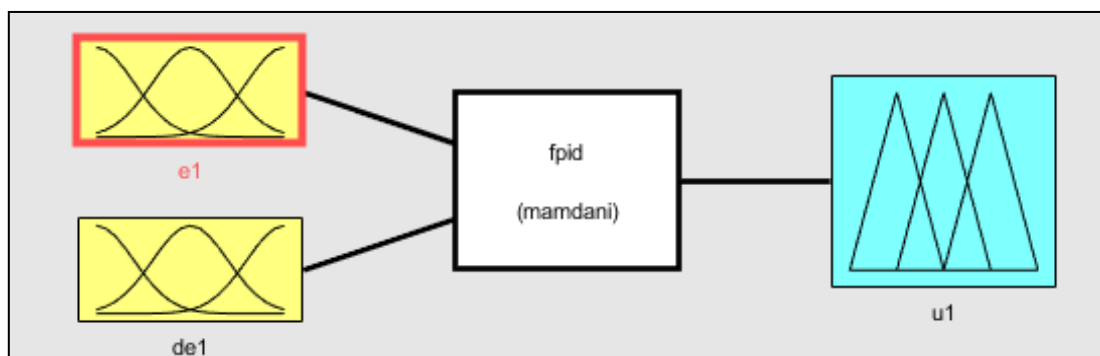


Рис. 3. Структура нечеткого ПИД-регулятора

Двойным щелчком по блоку входной переменной e1 открывается окно MembershipFunctionEditor:Untitled. Щелчком мыши выделяется первая функция принадлежности mf1, которая окрасится красным цветом. В поле Range установлен диапазон [-1 1]. В поле Name введено имя функции принадлежности N,

в поле Type выбрана треугольная функция принадлежности trimf, задано значение Params [-300 -1 0]. Для второй функции принадлежности mf2, в полях Range и DisplayRange установлен диапазон [-1 1], в поле Name введено имя Z. Необходимо проверить в Type наличие треугольной

функции принадлежности trimf, и задать значение Params[-1 0 1].

Для третьей функции принадлежности mf3, в поле Name введено

P, в Type – trimf, задано значение Params [0 1 300]. Функции принадлежности для входной переменной e1 будут иметь вид (рис. 4).

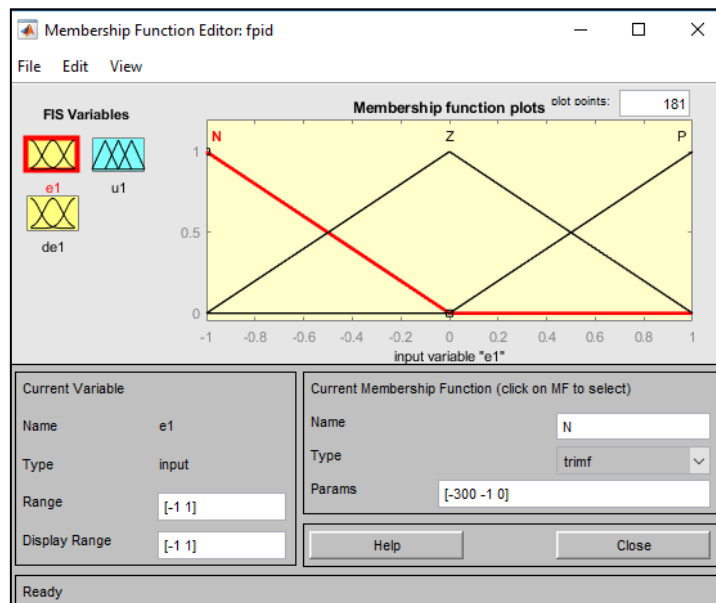


Рис. 4. Входные функции принадлежности

В окне Membership Function Editor: Untitled, щелчком мыши по блоку u1 следует перейти к построению функций принадлежности выходной переменной u1. Командой Edit, AddMFs добавляются три функции trimf. Определяются пределы Range и Display Range, равные [-2 2], после

чего первой mf1 задается имя NB, значение Params [-2 -2 -2]; второй mf2 – имя NM, значение Params [-1 -1 -1]; третьей mf3 – имя ZE, значение Params [0 0 0], четвертой mf4 – имя PM, значение Params [1 1 1], пятой mf5 – имя PB, значение Params [2 2 2] (рис. 5).

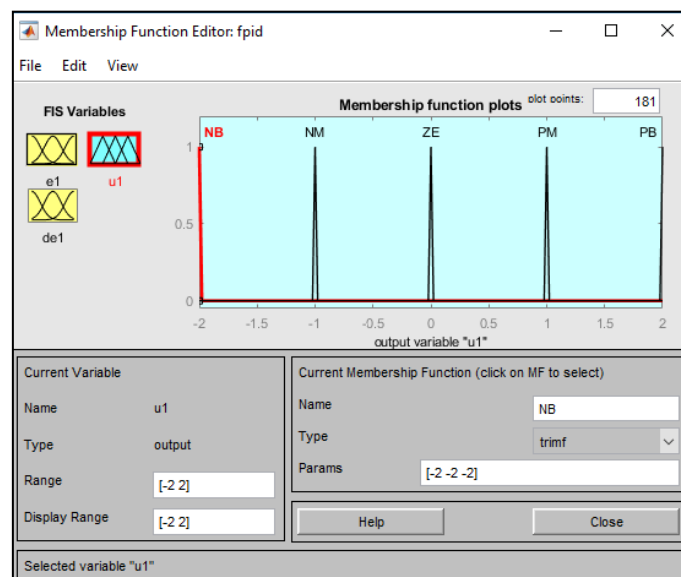


Рис. 5. Выходные функции принадлежности

В окне FISEditor Untitled командой Edit, Rules открывается окно редактора правил RuleEditor: Untitled. Щелчком

мыши в левом поле If e1 is выделяется функция принадлежности N, в поле de1 выделяется функция принадлежности N, а

в правом поле Then u1 is NB, после чего следует нажать кнопку Addrule. В верхнем поле появится первое нечеткое правило.

Аналогичным образом добавляются остальные 8 правил, записанных ранее в формуле (2) (рис. 6).

```

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. Правила нечеткого ПИД-регулятора

После выхода из окна RuleEditor: Untitled и окна MembershipFunctionEditor: Untitled, в окне FIS Editor Untitled сохраняется FIS модель нечеткого ПИД-регулятора командой File, Export, To Disk под именем fpid.fis. Следует поместить FIS модель в рабочую область MATLAB. Для этого командой File, Export, To Workspace нужно открыть окно, в поле Work space variable ввести fpid, чтобы воспользоваться регулятором в Simulink. Свернув окно FIS редактора, нужно

перейти к модели в Simulink: двойным щелчком мыши открыть окно параметров блока Fuzzy Logic Controller with Rule viewer и в поле FISmatrix вместо Fis ввести fpid и свернуть окно FIS редактора.

В окне настройки параметров блока Check Step Response Characteristics запускается модуль Response Optimization кнопкой с соответствующим названием. Появится окно модуля с условиями переходного процесса и переходной функцией системы на воздействие (рис. 7).

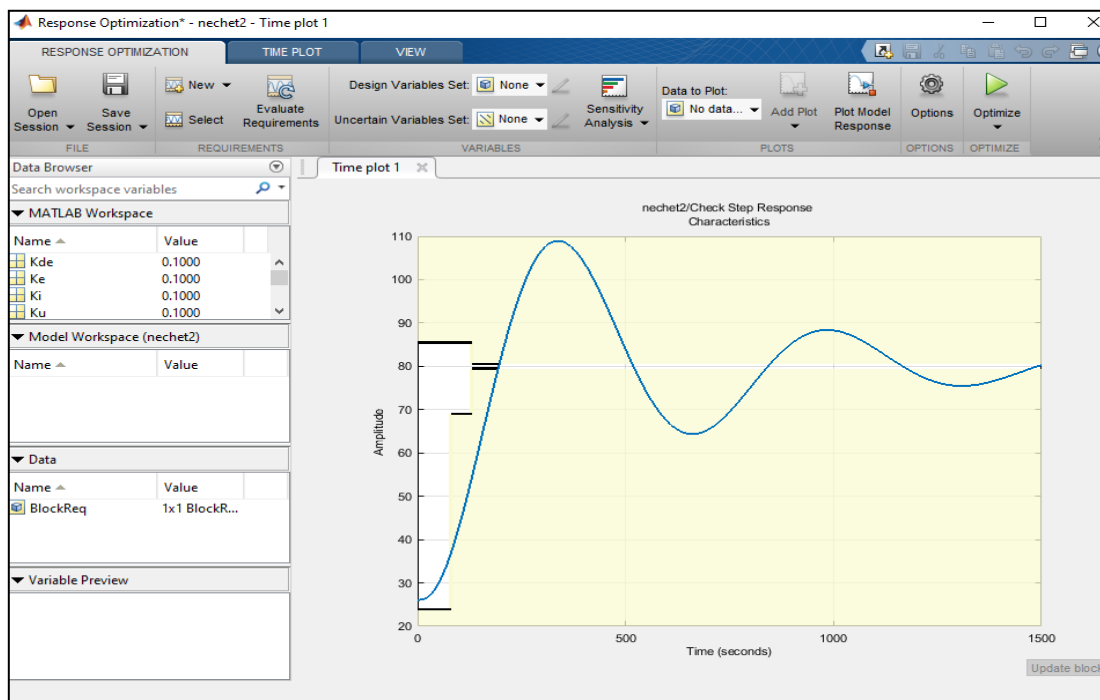


Рис.7. Окно модуля Response Optimization до регулирования

Далее на вкладке Design Variable Set выбирается пункт New и в открывшемся окне отмечаются параметры, которые

необходимо уточнить. Их следует перенести из правого окна в левое с помощью стрелки (рис. 8).

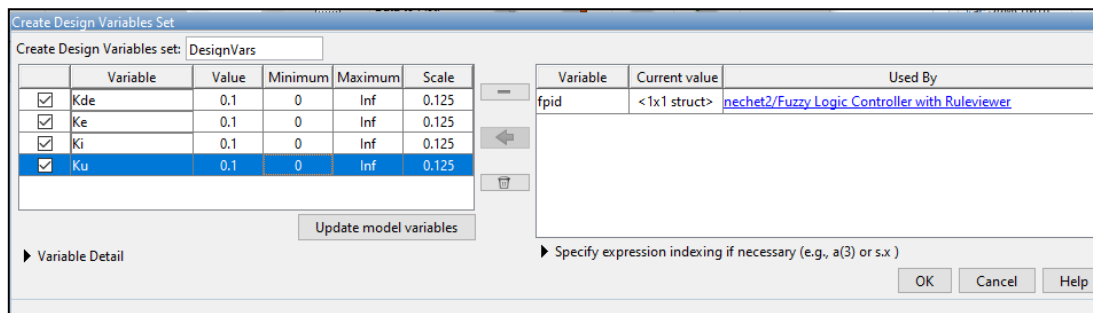


Рис. 8. Выбор параметров для оптимизации

На вкладке Options можно изменять различные настройки оптимизатора для получения наилучшего результата. Для запуска процесса нужно нажать кнопку

Optimize. После окончания процесса значения параметров отобразятся в окне Model Workspace, а на экране переходная функция системы (рис. 9).

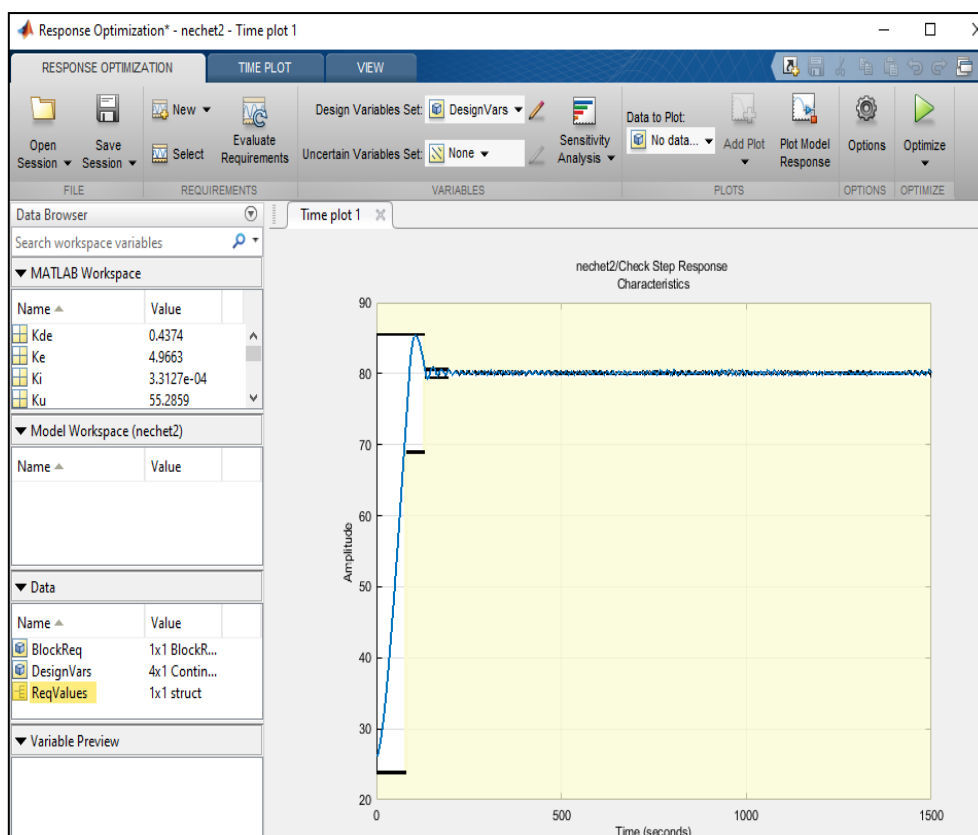


Рис. 9. Окно модуля Response Optimization после регулирования

Согласно произведенным расчетам получены следующие значения коэффициентов:

$$K_e = 4.9663,$$

$$K_{de} = 0.4374,$$

$$K_i = 0.0003,$$

$$K_u = 55.2859.$$

Определение оптимальных настроек нечеткого ПИД-регулятора для второй передаточной функции производится аналогичным образом. В модели Simulink,

в блоке *Температура окружающей среды* введено значение 29.36, в блоке Transferfunction параметры передаточной функции второго эксперимента, а в настройках параметров блоков CheckStepResponseCharacteristics и Step введено значение FinalValue равное 90. Окно модуля ResponseOptimization с условиями переходного процесса и переходной функцией системы на воздействие показано на рис. 10.

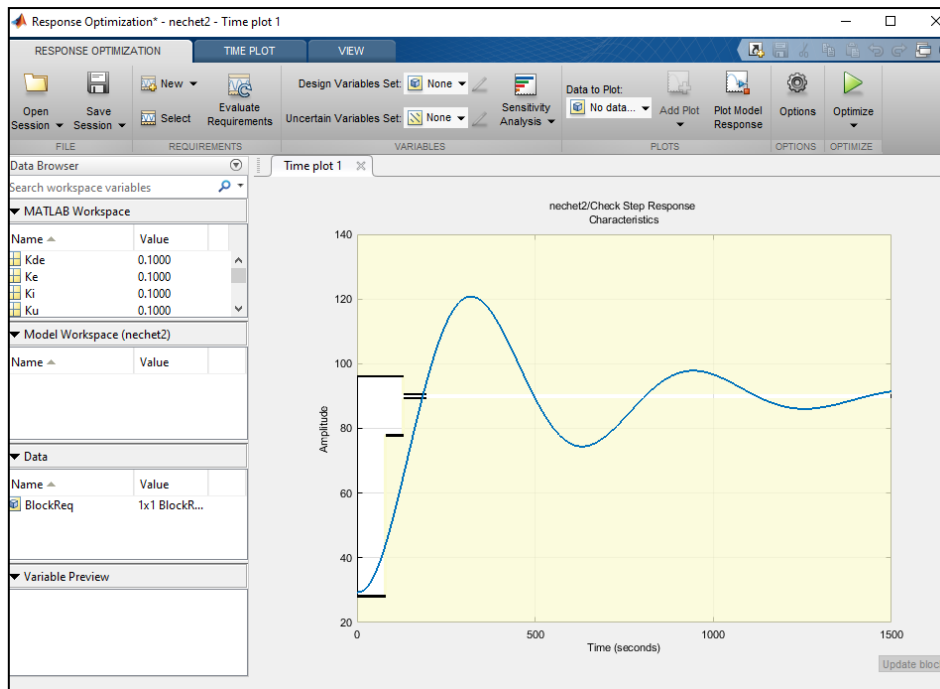


Рис. 10. Окно модуля Response Optimization до регулирования

После окончания процесса оптимизации значения параметров отобразятся в окне ModelWorkspace, а на

экране будет изображена переходная функция системы (рис. 11).

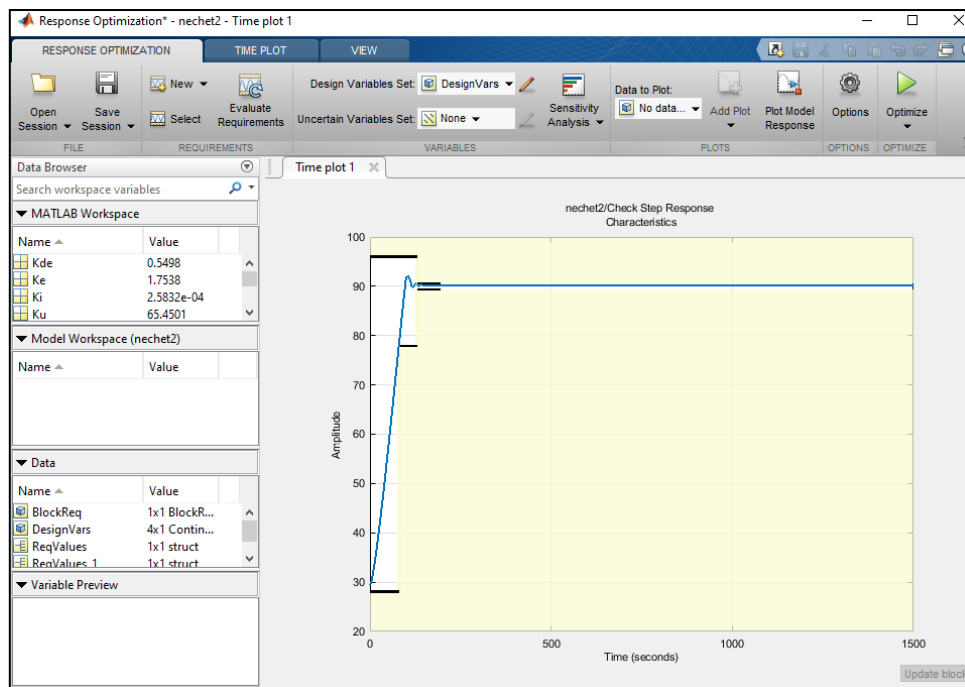


Рис. 11. Окно модуля Response Optimization после оптимизации

Согласно произведенным расчетам получены следующие значения коэффициентов:  $K_e = 1.7538$ ,  $K_{de} = 0.5498$ ,

$$K_i = 0.0002, \\ K_u = 65.4501.$$

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Для исследования полученного регулятора [9-10] необходимо создать

модель Simulink системы управления [14-15] (рис. 12).

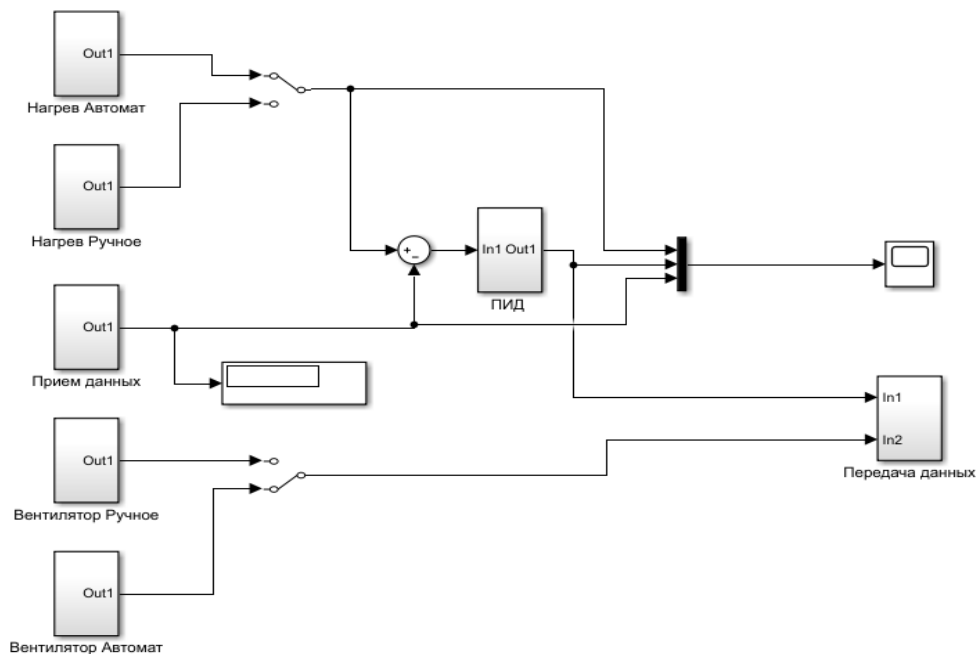


Рис. 12. Модель Simulink для проведения экспериментов на лабораторной установке «Тепловой объект»

При этом, блок ПИД будет иметь подсистему. Структурная схема, которая построена на основе рис. 13.

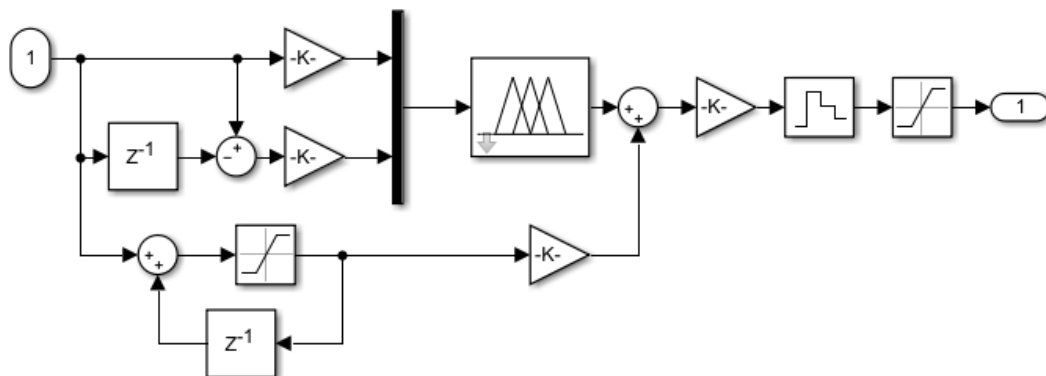


Рис. 13. Подсистема блока нечеткого ПИД-регулятора

Запуск модели Simulink с коэффициентами  $K_e$ ,  $K_{de}$ ,  $K_i$  и  $K_u$ , полученными для первой передаточной функции, приводит к построению графика переходной функции системы управления

при ступенчатом изменении задания от 26.09 °С до 80 °С. Значение мощности вентилятора установлено на уровне 10 %. Результат построения графика переходного процесса приведен на рис. 14.

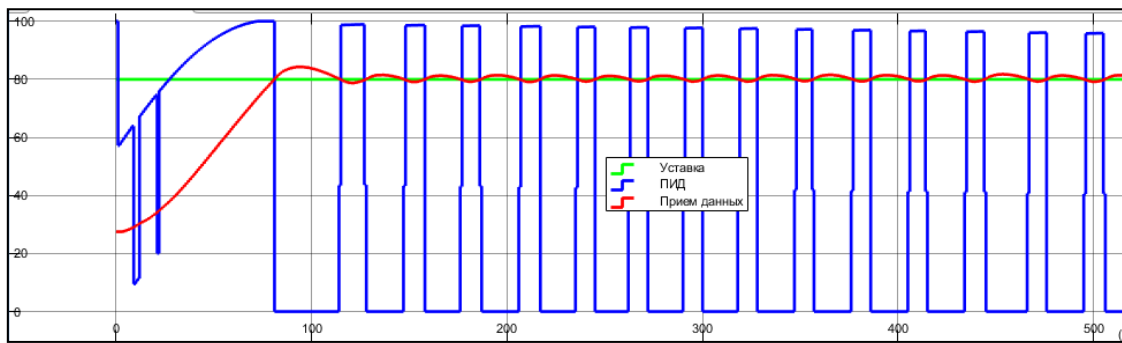


Рис. 14. Переходный процесс системы при изменении задания от 26,09 °С до 80 °С

Для вычисления показателей качества переходного процесса следует рассмотреть более подробно момент

перерегулирования и значение выхода при установившемся значении (рис. 15).

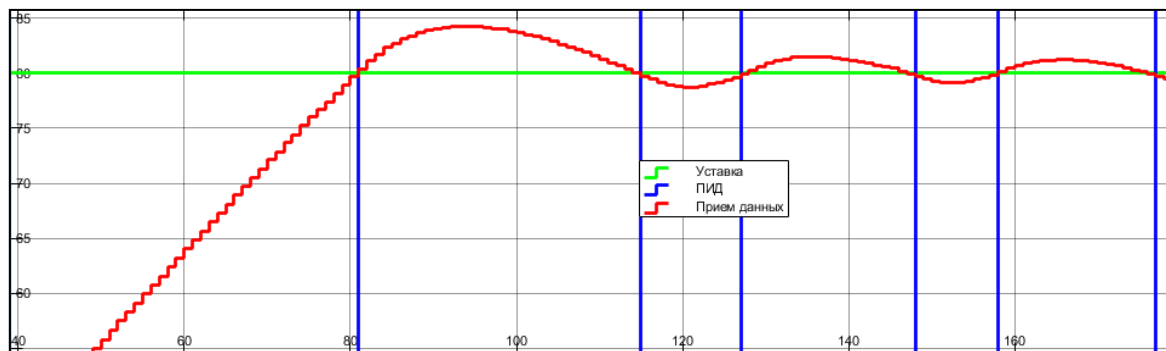


Рис. 15. Установившийся режим переходного процесса

Вычисление перерегулирования производится по формуле

$$\sigma = \frac{y_{\max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

Перерегулирование  $\sigma = 5.31 \%$ , это удовлетворительный показатель переходного процесса. По графику видно, при установившейся ошибке  $\Delta y = 2 \%$  время переходного процесса равно 127 секунд.

Запуск модели Simulink с коэффициентами  $K_e$ ,  $K_{de}$ ,  $K_i$  и  $K_u$ , полученными для второй передаточной функции, приводит к результату в виде построения графика переходного процесса (рис. 15).

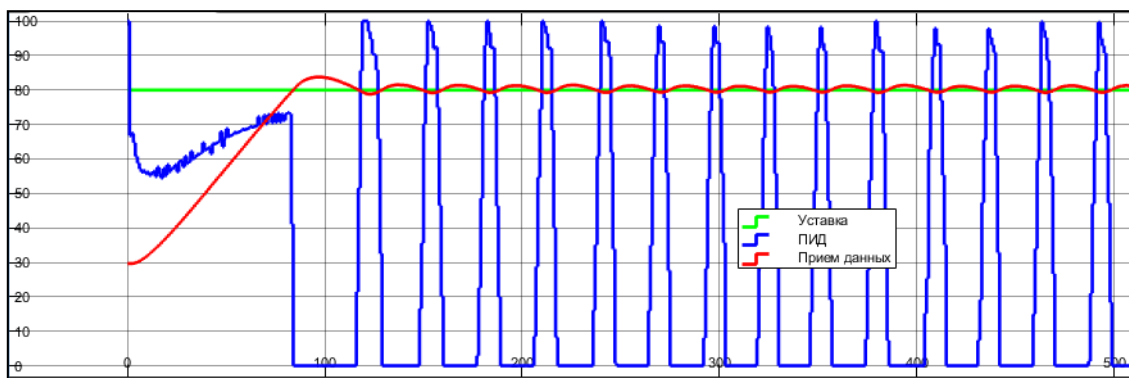


Рис. 16. Переходный процесс системы при изменении задания от 29,14 °С до 80 °С

Момент перерегулирования и выход на установившееся значение приведен на рис. 17.

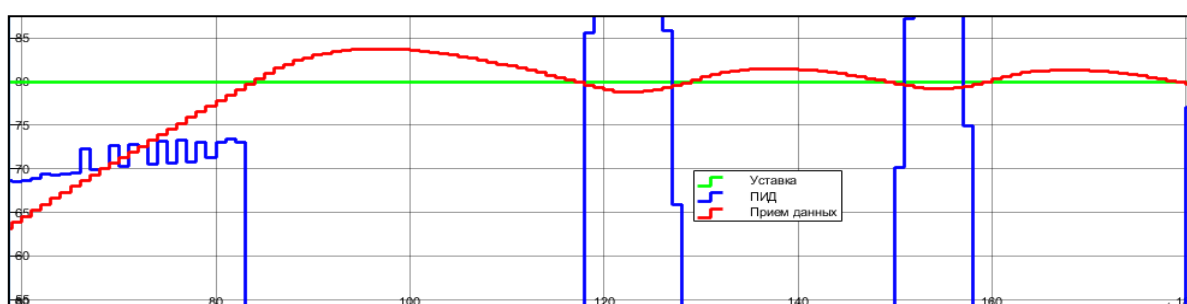


Рис. 17. Момент перерегулирования и выход на установившийся режим переходного процесса

Вычисление перерегулирования по формуле (3) дало  $\sigma = 4,62\%$ . Это удовлетворительный показатель качества переходного процесса. По графику видно, при установившейся ошибке  $\Delta u$ , равной 2 %, время переходного процесса равно 129 секунд. Следовательно, найденные параметры нечеткого регулятора являются оптимальными.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Батищев, Р.В.** Разработка модели теплового объекта и системы управления нагревом и охлаждением / Р.В. Батищев, Д.И. Васютин. – Текст : непосредственный // Автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки: материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. 14-18 апреля 2018 г. – С. 25–27.

2. Расчет ПИ+LQR регулятора и получение его оптимальных настроек для лабораторной установки «Тепловой объект»

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был выполнен синтез нечетких регуляторов в программе MATLAB-SIMULINK для двух различных условий и настроек параметров лабораторной установки «Тепловой объект». Выполнен расчет и построены графики переходных процессов в реальном времени.

/ Р.В. Батищев, Ю.И. Кудинов, Ф.Ф. Пашенко, В.А. Титов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета: научно-технический журнал. – 2018. – № 3(37). – С. 24–33.

3. Construction and analysis of adaptive fuzzy linear quadratic regulator / Y. I. Kudinov, E. S. Duvanov, I. Y. Kudinov [et al.]. – Text : immediate // Journal of Physics: Conference Series : 3, Moscow, 19–23 октября 2020 года. – Moscow, 2020. – P. 042065. – doi: 10.1088/1742-6596/1683/4/042065.

4. **Feng, G.** Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems. A Model-Based Approach / G. Feng. – Hong Kong : CRC Press, 2010. – 278 p. – Text : immediate.

5. **Кудинов, Ю.И.** Теория автоматического управления (с использованием MATLAB–SIMULINK) : учебное пособие для вузов / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашченко. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 308 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/176901> (дата обращения: 22.05.2023).

6. **Симою, М.П.** Определение коэффициентов передаточной функции линеаризованных звеньев систем регулирования / М.П. Симою. – Текст : непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 1957. – Том 18, вып. 6. – С. 514-528

7. Analysis and Synthesis of Adaptive PID Controller with MRAC-MIT System / A.A. Ponomarev, Y. I. Kudinov, F.F. Pashchenko, E. S. Duvanov. – Text : immediate // 2-я Международная конференция по системам управления, математическому моделированию, автоматизации и энергоэффективности (SUMMA). – Lipetsk, 2020. – P.527–532.

8. **Ларина, Е.В.** Определение оптимальных настроек ПИД-регулятора методом расширенных частотных характеристик / Е.В. Ларина, Е.С. Дуванов. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки : сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического

университета, Липецк, 20 апреля – 10 июня 2022 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – С. 600-604.

9. Моделирование систем управления с применением MatLab : учебное пособие / под ред. А.Н. Тимохина. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 256 с. – Текст : непосредственный.

10. **Жиленков, А.А.** Моделирование систем и комплексов. Дискретные системы прогностического управления в теории, задачах и примерах в MATLAB: учебное пособие / А.А. Жиленков. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – 79 с. – Текст : непосредственный.

11. **Петров, А.В.** Моделирование процессов и систем : учебное пособие / А.В. Петров – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 288 с. – Текст : непосредственный.

12. **Демидович, Б.П.** Основы вычислительной математики / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – Москва : Наука, 1966. – 664 с. – Текст : непосредственный.

13. Разработка модели объекта управления, синтез ПИД регулятора и реализация проекта в SCADA системе / Ю.И. Кудинов, Р.В. Батищев, А.А. Волкова [и др.] – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2017. – № 2 (32). – С. 6–11.

14. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – Москва : Наука, 1977. – 240 с. – Текст : непосредственный.

15. **Berger, H.** Automating with SIMATIC S7-1200 / H. Berger. – Berlin : Publicis Publishing, 2013. – 572 p. – Text : immediate.

Сведения об авторах:

**Батищев Роман Вячеславович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информатики, Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.  
[gav\\_1989@bk.ru](mailto:gav_1989@bk.ru)

Information about the authors:

**Batishchev Roman Vyacheslavovich**

Candidate of Technical Sciences, associate Professor, Head of the Department of Computer Science,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[gav\\_1989@bk.ru](mailto:gav_1989@bk.ru)

**Бестиков Дмитрий Семенович**  
магистрант кафедры информатики,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
dima.bestikov@yandex.ru

**Ларина Екатерина Владимировна**  
магистрант кафедры информатики,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
ekaterina\_larina\_00@mail.ru

**Bestikov Dmitry Semenovich**  
Master's student of the Department of  
Computer Science,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[dima.bestikov@yandex.ru](mailto:dima.bestikov@yandex.ru)

**Larina Ekaterina Vladimirovna**  
Master's student of the Department of  
Computer Science,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
ekaterina\_larina\_00@mail.ru

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_38  
УДК 519.71

И.И. СУПРУНОВ, А.М. ШМЫРИН, Б.А. БОНДАРЕВ

## РАСЧЕТ РАВНОМЕРНЫХ ПОСТАВОК ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматривается задача равномерного снабжения доставляемой продукцией пунктов назначения и достижения целевого выхода с использованием алгоритма генерирования путевых кодов. Протяженный объект, представленный транспортными агентами, проходит последовательную обработку, где основное внимание уделяется активному участку зоны обработки. Изменение свойств объекта происходит под воздействием управляющих узлов согласно представленному в предыдущих статьях алгоритму с равномерным расходом ресурсов. Приводится пример применения алгоритма на реальных входных данных, указанный пример выполнен таблично.

**Ключевые слова:** окрестностные структуры, последовательная обработка, алгоритм равномерного расхода, логистика.

I.I. SUPRUNOV, A.M. SHMYRIN, B.A. BONDAREV

## CALCULATING THE UNIFORM PRODUCT SUPPLY ON THE BASIS OF THE ALGORITHM OF PROCESSING A MOVING EXTENDED OBJECT

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article considers the task of uniformly supplying destinations with delivered products and achieving the target output using the algorithm for generating travel codes. An extended object, as represented by transport agents, is sequentially processed, with the main attention paid to the active section of the processing zone. The object's properties change under the influence of control nodes according to the algorithm presented in previous articles with a uniform consumption of resources. An example of applying the algorithm to real input data is given, this example is presented as a table.

**Keywords:** neighborhood structures, sequential processing, uniform consumption algorithm, logistics.

## ВВЕДЕНИЕ

В цикле работ авторов [1–5] рассматривается движение протяженного объекта и его последовательная обработка, приводится описание модели с точки зрения окрестностных структур и окрестностных систем [6–8] в переменных Лагранжа и Эйлера.

В перечисленных работах, а также в [9–10] неоднократно подчеркивалась общность построенных моделей, возможность их практического применения в различных сферах. В частности, в данной статье идет речь о применении разработанных окрестностных моделей и алгоритмов в сфере организации перевозок и логистике.

Особое внимание в серии работ [9–12] уделялось алгоритмам, реализующим разработанные динамические окрестностные модели для активного участка зоны обработки, а именно алгоритмам расчета режимов работы последовательности управляющих узлов в активной зоне.

В контексте задачи организации перевозок, движущийся протяженный объект может быть представлен как последовательность транспортных средств в движении, входные данные протяженного объекта могут представляться как вектор грузоподъемностей последовательности транспортных агентов, управляющие узлы представляются как терминалы для разгрузки или получения груза [13].

На основании результатов и выводов, полученных в [9], [12], для воздействий управляющих узлов на активном участке зоны обработки с учетом равномерных поставок в задаче логистики предпочтительнее оказывается алгоритм с равномерным расходом ресурсов.

Данная статья продолжает работу [10] в части реализации алгоритма генерирования путевых кодов, проиллюстрированного табличным примером. Используя введенные обозначения и терминологию [10], ставится и решается задача равномерного снабжения доставляемой продукцией пунктов назначения и достижения

желаемого выхода с использованием алгоритма генерирования путевых кодов. Для отражения происходящих в ходе перевозок изменений свойств протяженного объекта используется алгоритм с равномерным расходом ресурсов.

## ОБЩИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА

Согласно работам [1–3], рассматривается окрестностная модель в переменных Эйлера. Движущийся протяженный объект состоит из  $N$  фрагментов, с помощью обозначений  $n_1$ ,  $n_2$ , и  $n_3$  получаем длину каждой из зоны обработки, где  $n_1$  и  $n_3$  отвечают за пассивные участки зоны обработки, а  $n_2$  – за активный участок. На основании модификаций алгоритма, изложенных в [9–12], получаем, что в задачах логистики вычисления для динамической окрестностной модели на пассивных участках  $n_1$  и  $n_3$  фактически не используются, что позволяет рассматривать изменения только на участке  $n_2$ . Кроме того, на активном участке зоны обработки  $n_2$  однотипные управляющие узлы, рассматриваемые в [4], в модификациях алгоритма применительно к логистическим задачам заменяются различающимися по мощности терминалами.

Укажем обозначения, согласно [10] и с учетом отсутствия ограничений на максимальные ресурсы терминалов:  $N$  – количество агентов,  $K$  – количество терминалов, вектор максимальных емкостей агентов

$$A_{max} = [A_1, \dots, A_N], \quad (1)$$

вектор номинальных емкостей агентов

$$A_{nom} = [a_1, \dots, a_N], \quad (2)$$

вектор мощностей терминалов

$$M = [m_1, \dots, m_K], \quad (3)$$

вектор текущих ресурсов терминалов

$$R = [r_1, \dots, r_K], \quad (4)$$

путевой код агента  $i$  в виде двоичного вектора

$$C_i = [c_1, \dots, c_K], \quad (5)$$

где каждый элемент путевого кода  $s_j$  агента  $i$  принимает значение 0 или 1, т.е. непосещаемый или посещаемый терминал соответственно.

Условие, при котором возможно достичь целевого, желаемого выхода, состоит в следующем: сумма всех мощностей терминалов в рамках задачи не должна быть меньше какой-либо из номинальных емкостей агентов.

#### ПРИМЕР РАБОТЫ АЛГОРИТМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПУТЕВЫХ КОДОВ

Рассмотрим пример работы алгоритма на исходных данных, представленных ниже. На рис. 1 отмечен общий маршрут перевозок с ключевыми точками, некоторые из них обозначены цифрами. Все потребители находятся по пути следования данного маршрута.

Перевозки могут осуществляться при помощи фур и КамАЗов различного тоннажа. Для каждого средства перевозки формируется список посещаемых и пропускаемых точек назначения (1 и 0 соответственно), куда необходимо доставить груз (или где необходимо получить груз в случае двойственной задачи). Полученная последовательность из нулей и единиц для каждого транспортного агента составит его путевой код.

Для организации перевозок подвижной состав могут составить: КамАЗ-55111 грузоподъемностью 13 т, КамАЗ-65115 грузоподъемностью 15 т, КамАЗ-6520

грузоподъемностью 20 т и КамАЗ-65201 грузоподъемностью 25 т. Пусть для данной схемы доступны КамАЗы различной грузоподъемности.

Рассмотрим пример, в котором представлено 8 транспортных агентов и 7 терминалов. Используя обозначения и векторы (1)–(5), составим путевые коды по алгоритму, согласно [10], с учетом равномерного заполнения терминалов.

Пусть максимальные емкости КамАЗов  $A_{max} = [25, 13, 20, 15, 13, 13, 15, 13]$ , мощность терминалов (сколько агент может загрузить/выгрузить на данном терминале одновременно)  $M = [4, 5, 4, 3, 4, 3, 5]$ .

С учетом мощностей терминалов и максимальных емкостей транспортных агентов по алгоритму получаем номинальные, т.е. реально используемые в данной задаче емкости агентов  $A_{nom} = [23, 9, 19, 14, 11, 12, 12, 12]$  и текущие ресурсы терминалов, т.е. количество срабатываний каждого из терминалов при погрузке или разгрузке  $R = [4, 4, 4, 4, 4, 4, 4]$ .

Ниже в табл. представлен пример работы алгоритма, емкости каждого из транспортных агентов указаны в строках А1–А8, в столбцах Б1–Б7 указаны мощности и текущие ресурсы терминалов.

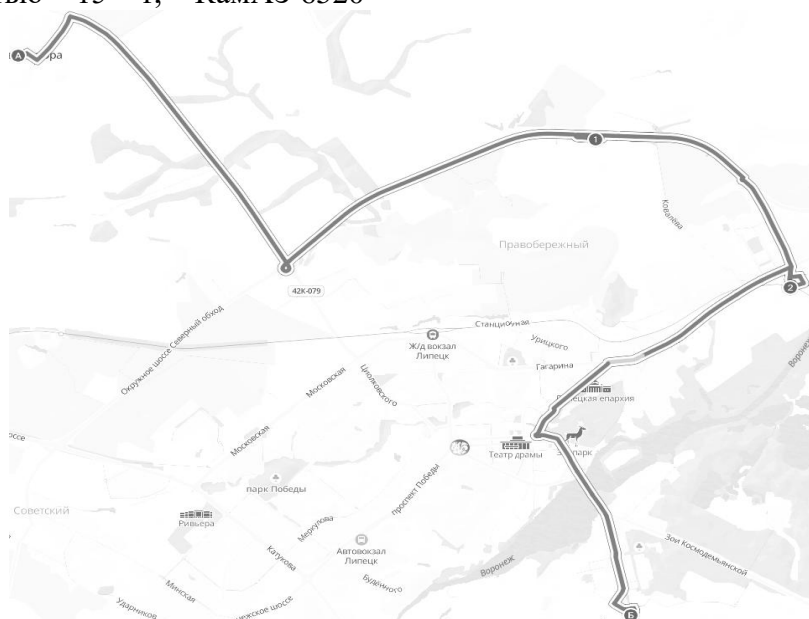


Рис. 1. Схема движения транспортных агентов по маршруту

Таблица

## Равномерная доставка продукции с генерированием путевых кодов для агентов

			Б1	Б2	Б3	Б4	Б5	Б6	Б7		
			R								
			4	4	4	4	4	4	4		
			M								
	$A_{max}$	$A_{nom}$	4	5	4	3	4	3	5	Итого	$C_i$
A1	25	23									<b>1111110</b>
A2	13	9	4								<b>1000001</b>
A3	20	19	4	5							<b>0111110</b>
A4	15	14	0	0	4						<b>1100001</b>
A5	13	11	4	5	0	3					<b>0011100</b>
A6	13	12	0	5	4	0	4				<b>1000011</b>
A7	15	12	4	0	0	3	0	3			<b>0111000</b>
A8	13	12	0	0	4	0	4	0	0		<b>0000111</b>
			0	5	0	3	0	3	5	0	
				0	4	0	4	0	0	0	
					0	3	0	0	5	0	
						0	0	3	0	0	
							4	0	5	0	
								3	0	0	
									5	0	
										0	

Также в столбцах Б1–Б7 представлены мощности каждого из используемых терминалов для каждого из агентов. В этом случае указывается либо мощность текущего терминала, либо нуль в случае пропуска данного терминала транспортным агентом.

Для каждого агента  $i$  представлен путевой код  $C_i$  (в строках А1–А8), который показывает, какие терминалы для доставки посещаются или пропускаются. Вектор текущих ресурсов терминалов состоит из одинаковых элементов, т.е. все терминалы использованы одинаковое количество раз, что подтверждает равномерность их использования по циклу.

Итоговый целевой выход состоит из нулей, что означает, что все реально используемые емкости транспортных агентов доставлены по соответствующим путевым кодам терминалам. Аналогичным образом может быть представлена задача равномерного использования терминалов

для получения грузов транспортными агентами, в этом случае целевым выходом будет являться вектор номинальных емкостей агентов.

### ВЫВОДЫ

Статья продолжает и дополняет работу [10] в части реализации алгоритма генерирования путевых кодов, проиллюстрированного табличным примером. При помощи терминологии и обозначений, использованных в данной статье и в [10], на конкретном примере решена задача равномерного снабжения пунктов назначения доставляемой продукцией. С помощью алгоритма достигнут нулевой целевой выход в случае доставки продукции, а значит, всё количество единиц продукции, перевозимых агентами, доставлено по соответствующим терминалам, указанным в путевых кодах для каждого агента.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мишачев, Н.М.** Окрестностные структуры для модели конвейерной обработки протяженного объекта / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, И.И. Супрунов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2020. – № 1(42). – С. 22–27.
2. **Mishachev N.M.** Simulation of sequential processing of a moving extended object / N.M. Mishachev, A.M. Shmyrin, I.I. Suprunov. – Text : immediate // International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies. – 2020. – Vol. 11, № 7. – P. 1–8.
3. **Шмырин, А.М.** Окрестностное моделирование конвейерной обработки стохастического потока данных / А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев, И.И. Супрунов. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 2(84). – С. 19–22.
4. **Mishachev, N.** Generating Schedule in Linear Additive Neighborhood Model / N. Mishachev, A. Shmyrin, I. Suprunov. – Text : immediate // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021 (3). – P. 15–18.
5. **Мишачев, Н.М.** Прямая и обратная задачи для пассивных зон конвейерной обработки протяженного объекта / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, И.И. Супрунов. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 5. С. 78–84.
6. **Мишачев, Н.М.** Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин. – Текст : непосредственный // Таврический вестник информатики и математики. – 2017. – Т. 37, вып. 4. – С. 87–95.
7. **Мишачев, Н.М.** Дискретные системы и окрестностные структуры / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин. – Текст : непосредственный // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. – 2018. – Т. 23, № 123. – С. 473–478.
8. **Мишачев, Н.М.** Метаструктурная идентификация : монография / Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин. – Воронеж : Ритм, 2019. – 189 с. – Текст : непосредственный.
9. **Супрунов, И.И.** Алгоритмы конвейерной обработки движущегося протяженного объекта на основе окрестностных структур / И.И. Супрунов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 3 (49). – С. 35–40.
10. **Супрунов, И.И.** Применение модели конвейерной обработки в задачах логистики / Супрунов И.И. – Текст : непосредственный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 32–36.
11. **Супрунов, И.И.** Математическая модель и алгоритмы последовательной обработки движущегося протяженного объекта / И.И. Супрунов, А.М. Шмырин, Н.М. Мишачев. – Текст : непосредственный // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – № 1 (91). – С. 16–22.
12. **Супрунов, И.И.** Сравнение двух алгоритмов конвейерной обработки / И.И. Супрунов. – Текст : непосредственный // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2023. – С. 289–294.
13. **Беленький, А.С.** Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования / А.С. Беленький. – Текст : непосредственный. Москва : Мир. – 1992. – 582 с.

Сведения об авторах:

**Супрунов Игорь Иванович**

старший преподаватель кафедры высшей математики,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

i.i.suprunov@yandex.ru

**Шмырин Анатолий Михайлович**

доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой высшей

математики,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

amsh46@mail.ru

**Бондарев Борис Александрович**

доктор технических наук, профессор,

профессор кафедры строительного

материаловедения и дорожных

технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

lnsp-48@mail.ru

Information about the authors:

**Suprunov Igor Ivanovich**

Senior Lecturer of the Department of Higher Mathematics,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

i.i.suprunov@yandex.ru

**Shmyrin Anatoliy Mikhailovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Higher Mathematics Department,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

amsh46@mail.ru

**Bondarev Boris Aleksandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Professor of the Department of Building

Materials Science and Road Technologies,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

lnsp-48@mail.ru

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ «POWER LOCK» ПРИ УСТАНОВКЕ ЕГО В ЗАДНИЙ ВЕДУЩИЙ МОСТ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассмотрена возможность обеспечения работы самоблокирующегося дифференциала ведущего моста колесного трактора с высоким значением коэффициента блокировки в различных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** колесный трактор, дифференциал, коэффициент блокировки.

B.N KAZ'MIN, M.D. YUROV

**PECULIARITIES OF TORQUE DISTRIBUTION BY *POWER LOCK* DIFFERENTIAL WHEN INSTALLED IN THE REAR DRIVE AXLE OF A WHEELED TRACTOR**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article considers the possibility of ensuring the operation of a self-locking differential of the driving axle of a wheel tractor with a high value of the blocking coefficient in various operating conditions.

**Keywords:** wheel tractor, differential, blocking coefficient.

**ВВЕДЕНИЕ**

В ряде случаев потеря проходимости трактора обусловлена свойством дифференциала делить подводимый к его корпусу крутящий момент в определенной пропорции между ведомыми валами [1].

Для устранения этого явления используют принудительную блокировку дифференциала, тогда каждое колесо сможет реализовать свои возможности по сцеплению с почвой. Для осуществления принудительной блокировки дифференциала соединяют между собой любые два центральных звена (корпус дифференциала, полуосевые шестерни) посредством кулачковых, зубчатых и других муфт, что усложняет конструкцию ведущего моста, т.к. в нем надо предусмотреть место для размещения механизма блокировки и его привода. В качестве привода может использоваться

рычажно-тяговая, гидравлическая или пневматическая системы трактора. Более перспективны самоблокирующиеся дифференциалы повышенного трения, которые позволяют подводить больший крутящий момент к ведущему колесу, находящемуся в лучших условиях по сцеплению с опорной поверхностью [1].

**ТЕОРИЯ/РАСЧЕТ**

Распределение крутящего момента между ведущими колесами трактора оценивается коэффициентом блокировки  $K_B$  дифференциала.

В отечественной и зарубежной литературе [1] по тракторам и автомобилям используются две трактовки коэффициента блокировки дифференциала:

а) под коэффициентом блокировки  $K_B$  дифференциала понимают отношение

момента трения  $M_T$  в дифференциале к моменту  $M_0$ , подводимому к корпусу дифференциала

$$K_B = \frac{M_T}{M_0}.$$

Значение коэффициента блокировки  $K_B$  изменяется от 0 до 1. В случае  $K_B = 1$  будет осуществлена полная блокировка дифференциала, аналогичная принудительной. На практике  $M_T$  рассчитают со стороны одной из полуосевых шестерен, следовательно,  $K_B$

изменяется от 0 до 0,5 и при полной блокировке будет соответствовать  $K_B = 0,5$ .

б) под коэффициентом блокировки дифференциала  $K_B^*$  понимают отношение момента  $M_{a2}$ , подводимого к отстающей полуоси дифференциала, к моменту  $M_{a1}$ , подводимому к забегающей полуоси дифференциала

$$K_B^* = \frac{M_{a2}}{M_{a1}}.$$

Схема дифференциала «Power Lock» представлена на рис. 1.

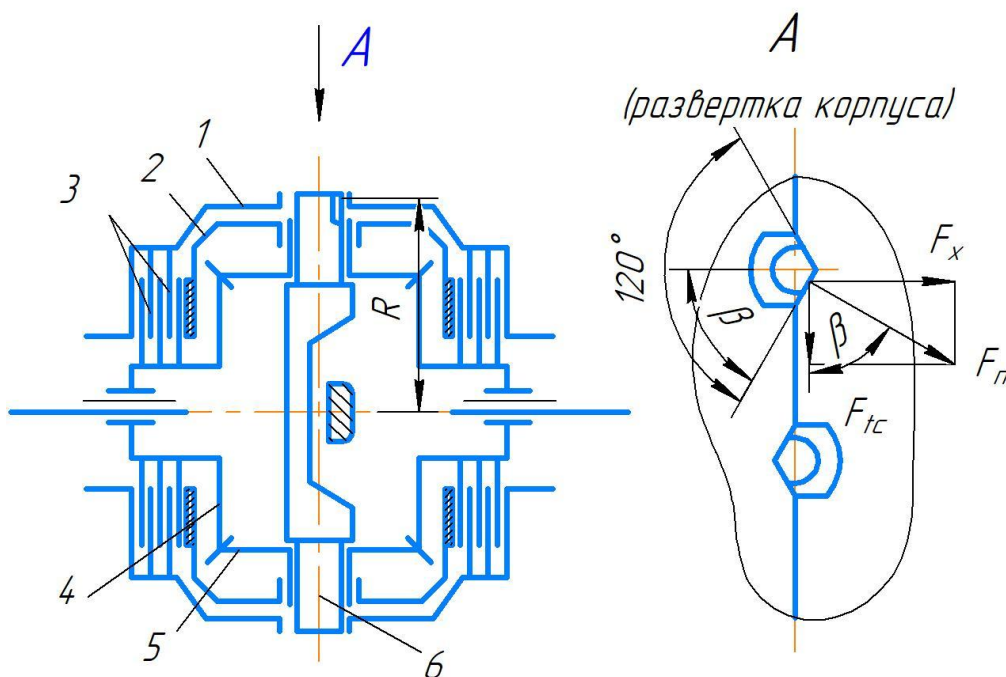


Рис. 1. Схема самоблокирующегося дифференциала повышенного трения «Power Lock»: 1 – корпус; 2 – чаша нажимная; 3 – комплект дисков; 4 – полуосевая шестерня; 5 – спутник; 6 – ось спутника;  $R$  – радиус расположения равнодействующей окружной силы;  $\beta$  – половина угла скоса на корпусе дифференциала,  $\beta=60^\circ$ ;  $F_x$  – сила, сжимающая фрикционные диски;  $F_{tc}$  – окружная сила на скосах оси вращения спутников

Сжатие комплектов блокировочных фрикционных дисков в данном дифференциале осуществляется за счет перемещения нажимных чашек под действием осевой составляющей силы  $F_n$ , возникающей на скосах V-образных пазов полукорпусов дифференциала и действующих через бурты спутников на чашки, и осевых сил, действующих в зацеплении на полуосевые шестерни. При этом сила сжатия пропорциональна моменту, подводимому к корпусу

дифференциала  $M_0$ . Тогда момент:

а) на забегающей оси

$$M_{a1} = \frac{M_0}{2} - M_T;$$

б) отстающей оси

$$M_{a2} = \frac{M_0}{2} + M_T.$$

Трактор передвигается в различных почвенных условиях. Максимальное значение коэффициента сцепления можно

принять для стерни  $\varphi_{\max} = 0,75$ , минимальное для влажной грунтовой дороги –  $\varphi_{\min} = 0,15$ . Тогда перераспределение подводимого момента между полуосями или же минимальный необходимый коэффициент блокировки дифференциала

$$K_{B \min}^* = \frac{\varphi_{\max}}{\varphi_{\min}} = 5.$$

Зная значение  $K_{B}^*$ , можно определить коэффициент пропорциональности ( $K_B$ ) из формулы

$$K_{B \min} = \frac{K_{B \min}^* - 1}{2 \cdot (K_{B \min}^* + 1)}.$$

Подставляя значения  $K_{B \min}^*$ , получаем  $K_{B \min} = 0,333$ , т.е. минимальный момент трения во фрикционной муфте должен составлять 0,333 от момента, подведенного к полуосевой шестерне.

Основной недостаток такого дифференциала заключается в полной потере силы тяги вследствие кинематических особенностей работы [2], когда какое-либо колесо теряет сцепление с опорной поверхностью, т.е. при «вывешивании» одного из колес. В этом случае трактор, выполняя основные работы, полностью теряет проходимость. И данных значений  $K_{B \min}$  и  $K_{B \min}^*$  будет недостаточно для предотвращения этого явления. Считается, что для обеспечения проходимости в данном случае  $K_{B}^*$  должен быть больше 10...12 [3].

В ранних конструкциях с этим недостатком боролись применением в комплекте фрикционных дисков тарельчатых пружин [2]. Диск, ближайший к корпусу дифференциала, выполнялся тарельчатой формы и в целях получения предварительного сжатия, необходимого при отсутствии нагрузки, работал как тарельчатая пружина.

Для применения такого типа самоблокирующегося дифференциала в заднем мосту трактора необходимо, чтобы  $K_B$  стремился к большему значению из диапазона  $K_B = 0,333...0,5$  [4]. После расчетов дифференциала «Power Lock» заднего ведущего моста для колесного трактора класса 2,0 было получено:

а) при использовании шести пар трения (с каждой из сторон)  $K_B = 0,38$  и  $K_{B}^* = 7,3$ ;

б) при использовании семи пар трения (с каждой из сторон)  $K_B = 0,44$  и  $K_{B}^* = 15,3$ .

Эффективность заднего моста с самоблокирующимся дифференциалом по сцеплению [5]

$$\Theta_{\varphi} = \frac{(1 + K_B^*) \cdot (1 - A_{\varphi})}{(2 - A_{\varphi})} \times \left[ \frac{2 - \varphi_{\max} \cdot (2 - A_{\varphi}) \cdot \frac{h_{кр}}{L}}{2 - \varphi_{\max} \cdot (1 - A_{\varphi}) \cdot (1 + K_B^*) \cdot \frac{h_{кр}}{L}} \right],$$

где  $A_{\varphi}$  – асимметрия коэффициентов сцепления колес моста;  $h_{кр}$  – высота точки прицепа;  $L$  – продольная база трактора.

Асимметрия коэффициентов сцепления определяется

$$A_{\varphi} = \frac{\varphi_c - \varphi_v}{\varphi_c} = 1 - \frac{\varphi_v}{\varphi_c},$$

где  $\varphi_c$  и  $\varphi_v$  – коэффициенты сцепления колес соответственно с постоянными и сниженными сцепными свойствами ( $\varphi_v \leq \varphi_c$ ).

Значение  $A_{\varphi}$  зависит от блокировочных свойств дифференциала повышенного трения и находится из выражения

$$A_{\varphi B} = 1 - \frac{1}{K_B^*}.$$

Тогда значения  $A_{\varphi B}$  будет составлять: при  $K_{B \min}^* = 0,8$ ; при шести парах трения – 0,86; при семи – 0,94. Расчеты показали, что задний ведущий мост с самоблокирующимся дифференциалом «Power Lock» будет работать аналогично ведущему мосту с принудительной блокировкой дифференциала ( $\Theta_{\varphi} = 1$ ) для всех вышерассмотренных случаев. Следовательно, при значениях  $A_{\varphi} \leq A_{\varphi B}$  тяговая эффективность ведущего моста с дифференциалом повышенного трения не уступает тяговой эффективности ведущего моста с полностью заблокированным дифференциалом, а для варианта с семью парами трения это свойство будет верным и при потере сцепления одним из колес.

Вариант с шестью парами трения получается компактным, но не решает

проблему «вывешивания» и имеет высокие удельные давления на диски, что может создать условия напряженно деформированного состояния дисков [6, 7]. При использовании варианта с семью парами трения необходимо учитывать особенности движения трактора на транспортных работах на дорогах с твердым покрытием, т.к. движение с заблокированным дифференциалом может привести к интенсивному изнашиванию шин и, в ряде случаев, к потере управляемости трактора.

Движение по дорогам с твердым покрытием обеспечивается подведением небольшого момента к корпусу дифференциала, и не требует обязательной

блокировки дифференциала. Однако при высоких значениях  $K^*_B$  он будет блокироваться даже при незначительном пробуксовывании одного из колес. Кроме этого, требуется разблокировка при движениях на поворотах. Для решения этих проблем устанавливаются упругие элементы (пружины) между корпусом и осями сателлитов, прижимающие фасонные цапфы к V-образным пазам [10]. Пружины устанавливаются в отверстия, выполненные в разъемных частях корпуса дифференциала.

Принципиальная схема модернизированного дифференциала представлена на рис. 2.

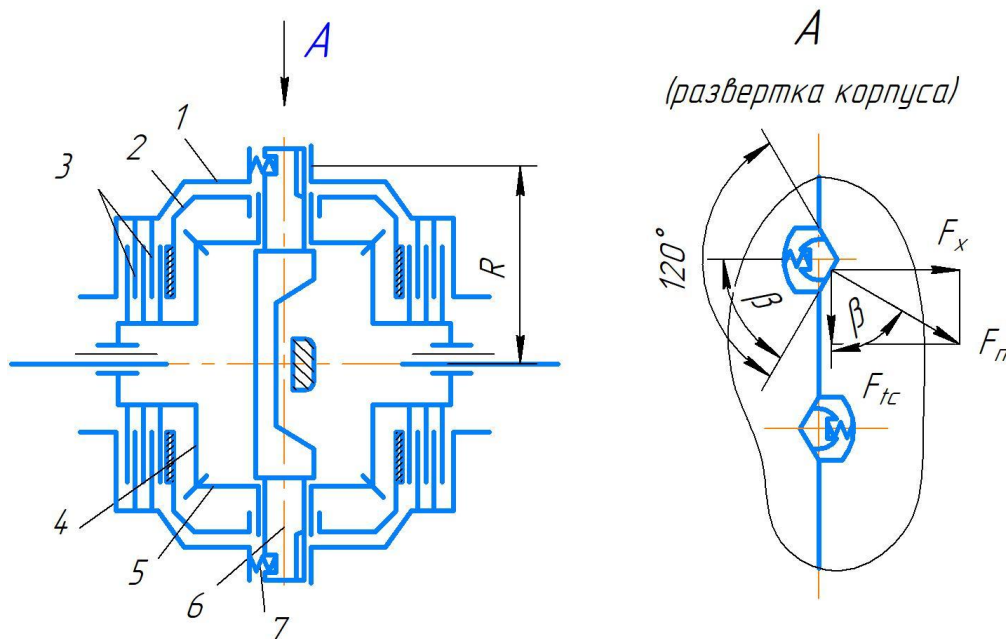


Рис. 2. Схема модернизированного самоблокирующегося дифференциала повышенного трения «Power Lock»: 1 – корпус; 2 – чаша нажимная; 3 – комплект дисков; 4 – полуосевая шестерня; 5 – сателлит; 6 – ось сателлита; 7 – упругий элемент;  $R$  – радиус расположения равнодействующей окружной силы;  $\beta$  – половина угла скоса на корпусе дифференциала,  $\beta=60^\circ$ ;  $F_x$  – сила, сжимающая фрикционные диски;  $F_{tc}$  – окружная сила на скосах оси вращения сателлитов

При передаче дифференциалом незначительных крутящих моментов результирующая осевая сила меньше или равна силе сжатия  $R_{пр}$  пружин и, как следствие, оси остаются неподвижными в пазах и соответственно перемещения нажимных чашек не происходит. Таким образом, фрикционные диски не сжаты, момент трения отсутствует, дифференциал не заблокирован и может обеспечивать

движение с небольшой пробуксовкой колес и при маневрировании без блокировки. При дальнейшем увеличении крутящего момента на корпусе дифференциала и достижении им значения, близкого к эксплуатационному, результирующая осевая сила преодолевает силу сжатия  $R_{пр}$  пружин. При этом оси вместе с сателлитами смещаются в V-образных пазах, последние воздействуют на нажимные чашки, что приводит к сжатию

дисков. Происходит блокировка дифференциала.

Для определения силы предварительного сжатия пружин необходимо выполнить условия:

а) обеспечение неподвижности оси сателлитов при нормальных условиях движения и небольшом подводимом моменте

$$P_{np1} \geq \frac{M_0}{2R};$$

б) обеспечение неподвижности оси сателлитов при создании  $(0,35 \dots 0,4)M_T$

$$P_{np2} \geq \frac{(0,3 \dots 0,4)M_T}{i_T \cdot f \cdot r_c},$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $r_c$  – средний радиус фрикционных дисков;  $i_T$  – число пар трения.

Следовательно, при выполнении этих требований предварительное сжатие пружин  $P_{пр} = P_{пр1} + P_{пр2}$  обеспечит работу дифференциала без пульсаций момента при небольших значениях крутящего момента, подводимого к корпусу дифференциала. Конструктивное исполнение такого дифференциала для колесного трактора класса 2.0 представлено на рис. 3.

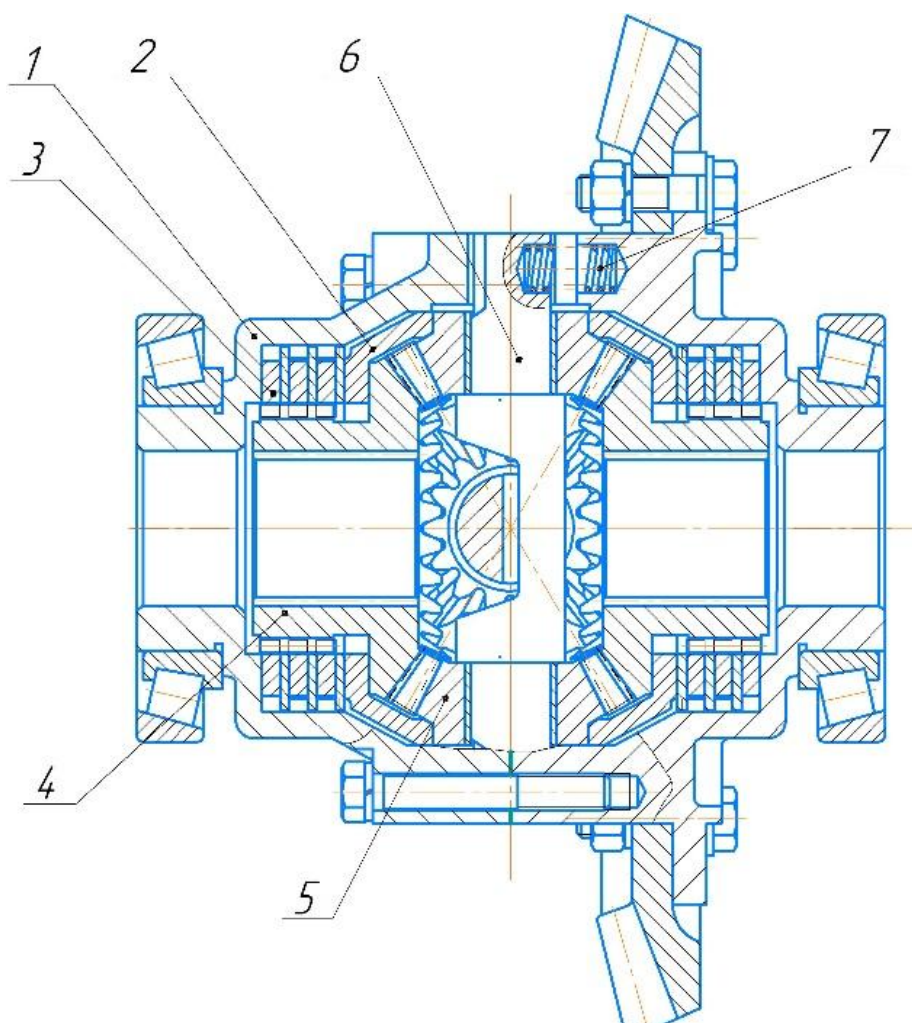


Рис. 3. Дифференциал «Power Lock» для колесного трактора класса 2.0:  
1 – корпус; 2 – чаша нажимная; 3 – комплект дисков; 4 – полуосевая шестерня;  
5 – сателлит; 6 – ось сателлита; 7 – упругий элемент

#### ВЫВОДЫ

Применение самоблокирующихся дифференциалов «Power Lock» способствует упрощению и снижению

стоимости конструкции без серьезных конструктивных изменений ведущего моста, что также способствует повышению конкурентоспособности трактора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов: учебник для студентов вузов/ В.М. Шарипов. – Москва: Машиностроение, 2009. – 752 с. – Текст : непосредственный.

2. Хусаинов, А.Ш. Теория автомобиля: конспект лекций/ А.Ш. Хусаинов, В.В. Селифонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 121 с. – Текст : непосредственный.

3. Яскевич, Э. Ведущие мосты/ Э. Яскевич. – Москва : Машиностроение, 1985. – 600 с. – Текст : непосредственный.

4. Кудяева, К.О. Повышение надежности работы самоблокирующегося дифференциала ведущего моста / К.О. Кудяева, Б.Н. Казьмин. – Текст: непосредственный// МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ : сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (19-20 мая 2022 года). В 5 томах. Том 5. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 56–59.

5. Котовсков, А.В. Расчет тяговой эффективности заднего ведущего моста при наиболее типичных принципах блокировки дифференциала/ А.В. Котовсков. – Текст : непосредственный// Колесные и гусеничные машины: сборник научных трудов. – Москва : МГТУ «МАМИ», 2004. – С. 100–106.

6. Zyuzin, A.A. Roughness and wear of frictional surfaces in slip bearings/ A.A Zyuzin, B.N. Kaz'min, M.D. Yurov. –

Text : immediate // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32. № 9–10. – P. 646–660.

7. Влияние гармонических составляющих некруглости и нецилиндричности на формирование НДС поверхностных слоев деталей в соединениях с натягом / А.А. Зюзин, И.С. Константинова, Б.Н. Казьмин [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник машиностроения. – 2020. – № 4. – С. 4–7.

8. Развитие исследований по повышению точности геометрической формы и качества основных поверхностей деталей машин/ А.А. Зюзин, И.С. Константинова, Б.Н. Казьмин, М.Д. Юров. – Текст : непосредственный // Российская наука : прошлое и будущее: монография. В 2 томах. Том 1. Под науч. ред. В.И. Левина. – Пенза; Москва : Приволжский Дом знаний; МИЭМП, 2014. – С. 48–64.

9. Юров, М.Д. Обоснование 3-D моделирования дифференциала повышенного трения / М.Д. Юров, А.В. Черных. – Текст : непосредственный // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – Липецк : ЛГТУ. – 2009. – С. 243–245.

10. Патент 5901 Республика Беларусь, МПК F16H 48/20 (2000.01). Самоблокирующийся дифференциал: № а 20000857: заявл. 15.09.2000: опубл. 30.03.2004 /Романюк В.В. [и др.]; патентообладатель Минский орден Ленин и Октябрьской революции тракторный завод им. В.И. Ленина. – 4 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

**Казьмин Борис Николаевич**  
старший преподаватель кафедры  
транспортных  
средств и техносферной безопасности,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк, ул.  
Московская, д. 30.  
[bkazmin@mail.ru](mailto:bkazmin@mail.ru)

Information about the authors:

**Kaz'min Boris Nikolaevich**  
Senior Lecturer  
Department of Transport means and  
technosphere safety,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[bkazmin@mail.ru](mailto:bkazmin@mail.ru)

**Юров Максим Дмитриевич**  
старший преподаватель кафедры  
транспортных  
средств и техносферной безопасности,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк, ул.  
Московская, д. 30.  
[mdyurov@mail.ru](mailto:mdyurov@mail.ru)

**Yurov Maksim Dmitrievich**  
Senior Lecturer  
Department of Transport means and  
Technosphere Safety,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[mdyurov@mail.ru](mailto:mdyurov@mail.ru)

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_50  
УДК 519.876.5

А.В. ГРИНЧЕНКО, Е. СКВОРЦОВ

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОБУСОВ ПАССАЖИРСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В ANYLOGIC

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Рассматривается процесс создания имитационной модели технической эксплуатации автобусов в пассажирском предприятии. Проанализированы результаты проведенного на модели эксперимента и предложены мероприятия по повышению эффективности технической эксплуатации автобусов. Получено обоснование предложенных мероприятий по результатам эксперимента с новыми параметрами.

**Ключевые слова:** техническая эксплуатация автобусов, имитационное моделирование, Anylogic.

A.V. GRINCHENKO, E. SKVORTSOV

## DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF PASSENGER BUSES OPERATION AND MAINTENANCE IN ANYLOGIC

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The process of creating a simulation model of operation and maintenance of passenger buses in a public transport enterprise is considered. The results of the experiment conducted on the model are analyzed and measures to improve the efficiency of operation and maintenance of buses are proposed. The proposed measures are justified based on the results of the experiment with new parameters.

**Keywords:** buses operation and maintenance, simulation modeling, Anylogic.

Цифровизация процессов производства, создание имитационных моделей технических систем и технологических процессов является актуальным направлением в вопросах их оптимизации и повышения технико-экономической эффективности [1, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 14, 15]. Среда имитационного моделирования Anylogic является универсальным

инструментом, поддерживающим все основные подходы имитационного моделирования: дискретно-событийный, агентный и системную динамику. Anylogic предоставляет возможность создавать адекватные реальным процессам и системам модели с необходимым уровнем детализации. Имитационная модель позволяет проводить различные

эксперименты над реальной системой или процессом в виртуальном цифровом пространстве. Это помогает принимать обоснованные эффективные управленческие решения по совершенствованию исследуемых систем и процессов, сокращая при этом вероятность технико-экономических рисков.

В настоящей статье представлены результаты разработки имитационной модели системы технической эксплуатации автобусов в пассажирском предприятии в программе Anylogic. Использовалось дискретно-событийное моделирование, библиотека моделирования процессов программы Anylogic. Предпосылки создания имитационной модели изложены в работах [2, 3, 6, 7, 12, 13].

Структурная схема системы технической эксплуатации автобусов представлена на рис. 1. В соответствии с этой схемой автобусы по возвращении в парк проходят КПП и при необходимости направляются на участок уборочно-моечных работ (зона ЕО) или на стоянку. Автобусы, подлежащие плановым техническим воздействиям, ставятся на обозначенные места зоны ожидания или направляются на соответствующие участки, если они свободны.

Автобусы, запланированные на ТО-1, вначале подвергаются воздействиям ТО-1 на соответствующем участке, а затем попадают на участок диагностирования Д-1. Если в процессе ТО-1 и диагностирования Д-1 выявляются неисправности, которые не удается устранить, то автобус направляется на

текущий ремонт (ТР), после чего при необходимости повторно диагностируется. Автобусы, запланированные на ТО-2, вначале подвергаются диагностированию Д-2. Если при диагностировании Д-2 выявляются неисправности, требующие трудоемких ремонтных работ, то автобусы направляются на участок постовых работ ТР, а потом уже на участок ТО-2. Если при Д-2 неисправности не выявлены, то автобус продолжает эксплуатироваться, а через 1-2 подвергается воздействиям на ТО-2. Автобусы с явными неисправностями и заявками на текущий ремонт направляются на соответствующие посты участка ТР.

Заключительному диагностированию Д-1 подвергаются также автобусы, прошедшие воздействия ТО-2 непосредственно после их завершения, а также автобусы, которым производился ремонт систем и механизмов, отвечающих за безопасность движения (рулевое управление, тормозная система, ходовая часть).

Кроме плановых диагностирований Д-1 и Д-2 автобусы, не создавая помех плановым воздействиям, на тех же участках могут проходить выборочное диагностирование. На участок Д-1 с контрольно-пропускного пункта выборочно направляются автобусы для контроля систем, отвечающих за безопасность движения, с подозрением на неисправности для их уточнения или из зоны ТР для контроля качества после их устранения.

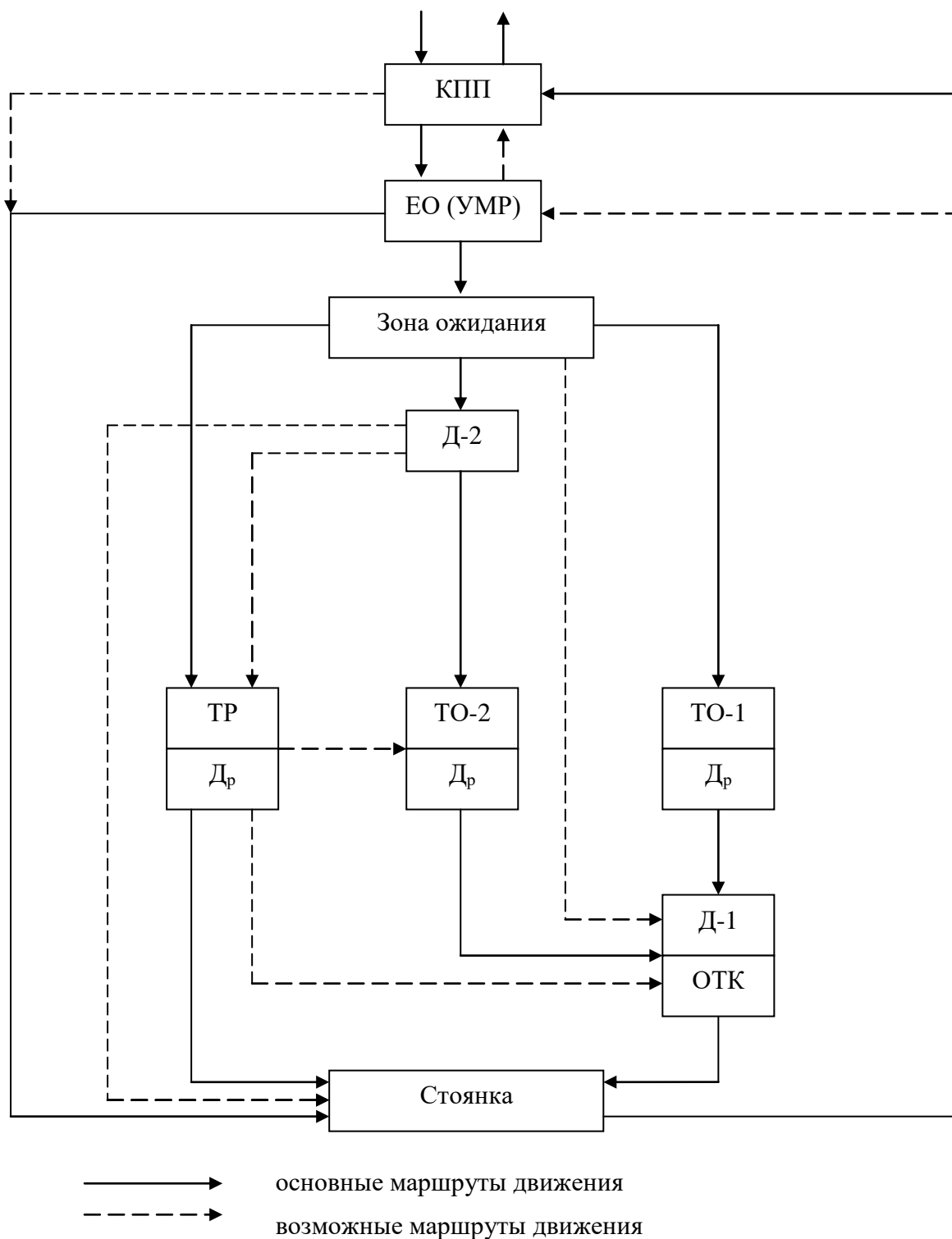


Рис. 1. Структурная схема системы технической эксплуатации автобусов

Разработка алгоритма функционирования имитационной модели выполнена на основе разработанной структурной схемы.

Разработанные в системе Anylogic диаграммы дискретно-событийных процессов показаны на рис. 2-3.

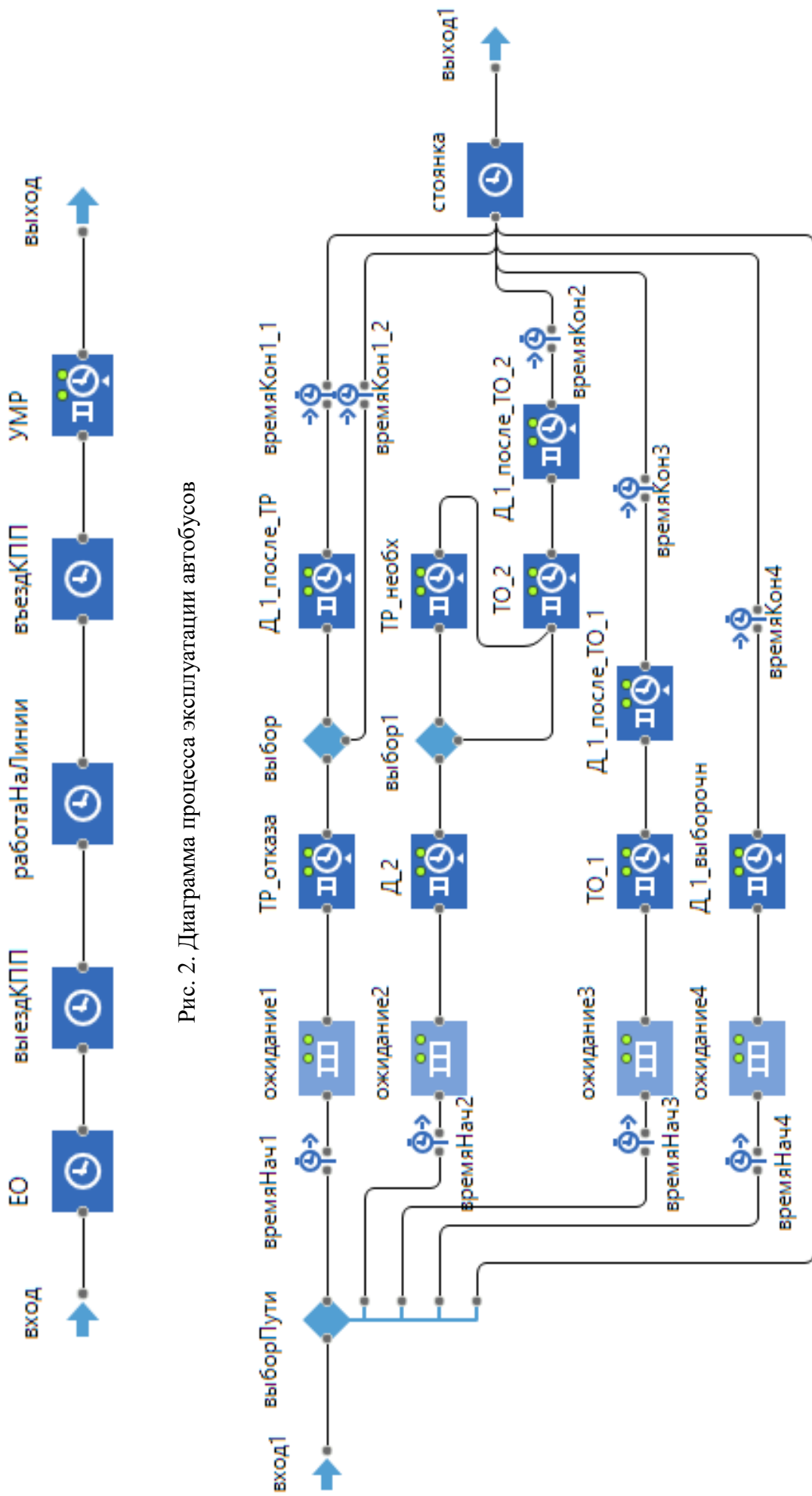


Рис. 2. Диаграмма процесса эксплуатации автобусов

Рис. 3. Диаграмма процессов диагностирования, ТО и ТР автобусов

Диаграмма (рис. 2) моделирует процесс эксплуатации автобусов на линии. Блок Enter («вход») является блоком входа агентов-автобусов в данную диаграмму. В этот блок автобусы попадают после срабатывания события, которое их создает в данной модели.

Следующий блок Delay («ЕО») моделирует прохождение автобусами ежедневного технического обслуживания. Далее блок Delay («выездКПП») моделирует задержку автобусов на КПП при выезде. Блок Delay («работаНаЛинии») моделирует работу автобусов на линии. Блок Delay («въездКПП») моделирует задержку автобусов на КПП при въезде. Блок Service («УМР») моделирует выполнение уборочно-моечных работ. Для этого задействованы ресурсы – посты УМР.

Блок Exit («выход») является блоком выхода агентов-автобусов из данной диаграммы. Из этого блока автобусы попадают в диаграмму процессов ТО и ТР автобусов в блок «вход1» (рис. 3). Затем в диаграмме следует разветвитель «выборПути» с пятью возможными путями:

- 1) выполнение ТР автобуса по потребности в результате отказа на линии, вероятность выбора пути 0,1;
- 2) выполнение планового ТО-2, вероятность выбора пути 0,05;
- 3) выполнение планового ТО-1, вероятность выбора пути 0,15;
- 4) выполнение выборочного диагностирования Д-1, вероятность выбора пути 0,05;
- 5) возвращение автобуса на стоянку, вероятность выбора пути 0,65.

После прохождения каждого из этого путей автобус попадает на стоянку, которую моделирует блок Delay («стоянка»). Заканчивается диаграмма блоком Exit («выход1»). Из этого блока автобусы попадают в диаграмму процессов эксплуатации автобусов в блок «вход» (рис. 2) и процесс повторяется.

Рассмотрим подробнее разные пути прохождения автобусов в диаграмме процессов ТО и ТР автобусов. В каждой ветке диаграммы присутствуют блоки «TimeMeasureStart» («времяНач») и

«TimeMeasureEnd» («времяКон»). «TimeMeasureStart» задает начальную точку, он запоминает момент времени, в который агент проходит через этот объект. «TimeMeasureEnd» вычисляет для каждого поступившего в него агента разность между текущим моментом времени и значением момента времени, записанным объектом «TimeMeasureStart».

Если автобусу требуется текущий ремонт. Блок Queue («ожидание1») моделирует нахождение автобуса в зоне ожидания, в случае если посты ТР заняты. Блок Service («ТР\_отказа») моделирует выполнение ТР по потребности. Для этого задействованы ресурсы – посты ТР. Затем в диаграмме следует разветвитель «выбор» с двумя возможными путями:

- 1) если при ТР затронуты системы, отвечающие за безопасность движения (системы ОБД), то автобус подвергается диагностированию Д-1, вероятность выбора пути 0,5;
- 2) если при ТР не затронуты системы ОБД, то автобус направляется на стоянку, вероятность выбора пути 0,5.

Блок Service («Д\_1\_после\_ТР») моделирует выполнение диагностирования Д-1. Для этого задействованы ресурсы – посты Д-1.

Если автобусу требуется плановое ТО-2. Блок Queue («ожидание2») моделирует нахождение автобуса в зоне ожидания, в случае если посты Д-2 заняты. Блок Service («Д\_2») моделирует выполнение Д-2 перед ТО-2. Для этого задействованы ресурсы – посты Д-2. Затем в диаграмме следует разветвитель «выбор1» с двумя возможными путями:

- 1) если при Д-2 выявлены неисправности, которые целесообразно устранить до проведения ТО-2 в зоне ТР, то автобус направляется в зону ТР, а потом в зону ТО-2, вероятность выбора пути 0,3;
- 2) если при Д-2 не выявлены неисправности, требующие трудоемкого ремонта, то автобус направляется в зону ТО-2, вероятность выбора пути 0,7.

Блок Service («ТР\_необх») моделирует выполнение ТР перед ТО-2. Для этого задействованы ресурсы – посты ТР. Блок Service («ТО\_2») моделирует выполнение

ТО-2. Для этого задействованы ресурсы – посты ТО-2. Блок Service («Д\_1\_после\_ТО\_2») моделирует выполнение Д-1 как заключительное воздействие после ТО-2. Для этого задействованы ресурсы – посты Д-1.

Если автобусу требуется плановое ТО-1. Блок Queue («ожидание3») моделирует нахождение автобуса в зоне ожидания, в случае если посты ТО-1 заняты. Блок Service («ТО\_1») моделирует выполнение ТО-1. Для этого задействованы ресурсы – посты ТО-1. Блок Service («Д\_1\_после\_ТО\_1») моделирует выполнение Д-1 как заключительное воздействие после ТО-1. Для этого задействованы ресурсы – посты Д-1.

Если автобус подвергается выборочному диагностированию Д-1. Блок Queue («ожидание4») моделирует нахождение автобуса в зоне ожидания, в случае если посты Д-1 заняты. Блок Service («Д\_1\_выборочн») моделирует

выполнение Д-1. Для этого задействованы ресурсы – посты Д-1.

Разработанный алгоритм описывает процессы технической эксплуатации автобусов в АТП, что позволяет проводить численные эксперименты и исследовать отдельные процессы в системе эксплуатации. Для более точного функционирования имитационной модели необходима настройка каждого блока в соответствии с реальными данными процессов технической эксплуатации автобусов в АТП.

Для примера создана имитационная модель технической эксплуатации 30 автобусов. В модели различные посты заданы в следующих количествах: посты УМР – 2 ед., посты ТР – 3 ед., посты Д-1 – 2 ед., посты Д-2 – 1 ед., посты ТО-2 – 3 ед., посты ТО-1 – 2 ед.

Для исследований задана работа модели в течение полугода. Полученные в результате эксперимента данные приведены в табл. 1-2.

Таблица 1

Статистические данные в базовом варианте

Параметр	Значение
Среднее время простоя в ТР по потребности систем ОБД, ч	25,8
Среднее время простоя в ТР по потребности без систем ОБД, ч	24,5
Среднее время простоя в плановом ТО-1, ч	11,5
Среднее время простоя в плановом ТО-2, ч	42,6
Среднее время простоя в выборочном Д-1, ч	1,9

Таблица 2

Загруженность постов в базовом варианте

Вид поста	Кол-во постов, ед.	Загруженность, %
Посты УМР	2	32
Посты ТР	3	77
Посты Д-1	2	29
Посты Д-2	1	14
Посты ТО-1	2	62
Посты ТО-2	3	50

По результатам анализа полученных данных можно отметить высокую загруженность постов ТР: 77 %. Высокая загруженность постов ТР вызывает довольно длительное время нахождения автобусов в зоне ожидания, пока освободится пост ТР. В результате общее время простоя автобусов, запланированных на выполнение ТР, увеличивается.

Для оптимизации процессов технической эксплуатации автобусов в автотранспортном предприятии предлагается увеличить количество постов ТР с 3 ед. до 4 ед. Как и в базовом варианте, в ускоренном режиме задана имитация технической эксплуатации автобусов в течение полугода. Полученные в результате имитационного эксперимента данные приведены в табл. 3-4.

Таблица 3

Статистические данные в новом варианте

Параметр	Значение	Сокращение времени, %
Среднее время простоя в ТР по потребности систем ОБД, ч	21,8	15,5
Среднее время простоя в ТР по потребности без систем ОБД, ч	19,9	18,8
Среднее время простоя в плановом ТО-1, ч	11,7	-1,7
Среднее время простоя в плановом ТО-2, ч	40,4	5,2
Среднее время простоя в выборочном Д-1, ч	1,9	0,0

Таблица 4

Загруженность постов в новом варианте

Вид поста	Кол-во постов, ед.	Загруженность, %
Посты УМР	2	33
Посты ТР	4	59
Посты Д-1	2	30
Посты Д-2	1	14
Посты ТО-1	2	62
Посты ТО-2	3	51

Анализ сравнения результатов моделирования в базовом и новом вариантах показывает, что среднее время простоя в ТР по потребности систем ОБД сократится на 15,5 %; среднее время простоя в ТР по потребности без систем ОБД сократится на 18,8 %; загруженность постов ТР сократится на 18 %.

Таким образом, имитационное моделирование технической эксплуатации автобусов пассажирского предприятия позволяет оптимизировать его работу. На основе статистических данных за

определенный период с использованием имитационной модели можно спрогнозировать загруженность различных технологических постов предприятия, время простоя автобусов при различных технологических операциях, время ожидания выполнения операций. Полученные результаты позволят принять управленческие решения и повысить экономическую эффективность технической эксплуатации автобусов.

## 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. **Бузин, В.А.** Имитационная модель потока требований на техническое обслуживание автомобилей / В.А. Бузин. – Текст : непосредственный // Транспортное дело России. – 2018. – № 5. – С. 194–197.

3. **Гринченко, А.В.** Имитационное моделирование обслуживания автомобилей в автосервисе / А.В. Гринченко, Е.К. Погодина. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 3 (46). – С. 60–73.

4. **Гринченко, А.В.** Имитационное моделирование пассажирских перевозок во внутриобластном сообщении / А.В. Гринченко, Е.К. Погодина. – Текст : непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : сборник материалов международной научно-практической конференции. Липецкий государственный технический университет. – 2022. – С. 133–140.

5. **Гринченко, А.В.** Оптимизация расписания движения городских автобусов методами имитационного моделирования / А.В. Гринченко, Е. Скворцов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического

университета. – 2022. – № 2 (48). – С. 18–26.

6. **Гринченко, А.В.** Разработка модели обслуживания автомобилей на автозаправочной станции города Липецка в среде Anylogic / А.В. Гринченко, А.А. Коростелев. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 1 (72). – С. 111–116.

7. **Гринченко, А.В.** Моделирование городского автобусного маршрута в Anylogic / А.В. Гринченко, Т.Р. Антонова. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2019. – № 2 (40). – С. 58–64.

8. **Зими́на, Л.В.** Имитационное моделирование как инструмент поддержки принятия управленческих решений / Л.В. Зими́на. – Текст : непосредственный // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. – 2018. – № 7. – С. 156–162.

9. **Козин, Е.С.** Система поддержки принятия решений по управлению технической эксплуатацией автомобильного транспорта / Е.С. Козин, А.В. Базанов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 1-2 (80). – С. 9–17.

10. **Попова, К.В.** Применение имитационных моделей для совершенствования процессов автосервиса / К.В. Попова, И.В. Макарова. – Текст : непосредственный // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и

перспективы рационального использования. – 2016. – Т. 3. – № 1 (4). – С. 110–114.

11. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств / С.В. Сусарев, С.П. Орлов, Е.Е. Бизюкова и [др.]. – Текст : непосредственный // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2021. – № 58 (84). – С. 98–104.

12. **Побединский, В.В.** Совершенствование службы эксплуатации парка техники на основе имитационного моделирования / В.В. Побединский. – Текст : непосредственный // Современный транспортно-технологический комплекс. – 2018. – № 1 (7). – С. 4–8.

13. **Суетова, А.А.** Решение задач технической эксплуатации автомобилей методом имитационного

моделирования (методом Монте-Карло) / А.А. Суетова, А.В. Олейников, В.А. Васильев. – Текст : непосредственный // Транспортные и транспортно-технологические системы : сборник материалов международной научно-практической конференции. Тюменский индустриальный университет. – 2010. – С. 285–288.

14. **Тимченко, В.С.** Имитационная модель автосервиса / В.С. Тимченко. – Текст : непосредственный // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2015. – Т. 1. – С. 138–141.

15. **Хабибуллин, Р.Г.** Имитационное моделирование автосервиса / Р.Г. Хабибуллин, И.В. Макарова. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2008. – Т. 6, № 3 (23). – С. 110–115.

Сведения об авторах:

**Гринченко Александр Викторович**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры управления  
автотранспортом,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[grinchav@mail.ru](mailto:grinchav@mail.ru),  
[grinchenko\\_av@stu.lipetsk.ru](mailto:grinchenko_av@stu.lipetsk.ru)

**Скворцов Евгений**  
магистрант института машиностроения и  
транспорта  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

**Grinchenko Alexander Viktorovich**  
Candidate Of Technical Sciences,  
Associate Professor, Department of Motor  
Transport Management,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[grinchav@mail.ru](mailto:grinchav@mail.ru),  
[grinchenko\\_av@stu.lipetsk.ru](mailto:grinchenko_av@stu.lipetsk.ru)

**Skvortsov Evgeny**  
Master's Student at the Institute of Mechanical  
Engineering and Transport,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

Ю.А. АБРОСИМОВА, А.Т. ПОПОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматривается эффективность применения систем управления запасами на предприятиях и предлагаются способы определения наиболее эффективного их использования.

**Ключевые слова:** система управления запасами, XYZ – анализ, ABC – классификация, оптимальный размер заказа (ОРЗ).

Yu.A. ABROSIMOVA, A.T. POPOV

## DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF INVENTORY MANAGEMENT SYSTEMS AT ENTERPRISES

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article examines the effectiveness of using inventory management systems at enterprises and suggests ways of determining their most effective application.

**Keywords:** Inventory management system, XYZ - inventory analysis, ABC - classification, economic order quantity (EOQ).

Статья была написана под руководством кандидата технических наук, доцента Попова А.Т. В современном мире существует большое количество организаций, в которых необходимо контролировать запасы, поэтому были созданы несколько методов управления запасами [1]. Рассмотрим основные из них:

1. Система с фиксированным размером заказа.

В системе с фиксированным размером заказа основополагающий параметр – размер заказа, который не меняется ни при каких условиях работы системы. Определение оптимального размера заказа (ОРЗ) является поэтому первой задачей, которая решается при работе с данной системой управления запасами. Он определяется по формуле

$$\text{ОРЗ} = \sqrt{\frac{2AS}{i}}, \quad (1)$$

где  $A$  – затраты на поставку единицы заказанной продукции;

$i$  – затраты на хранение.

2. Система с фиксированным интервалом времени между заказами.

В системе с фиксированным интервалом времени между заказами главной особенностью является то, что заказ делается через определенные интервалы времени, 1 неделя, месяц и тд. Интервал ( $I$ ) можно определить по формуле

$$I = N: \frac{S}{\text{ОРЗ}}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество рабочих дней в течении интервала;

$S$  – потребность в заказываемом продукте;

Эти системы используются в современном мире для достижения наилучших результатов, но как понять какая из систем наиболее рентабельна на производстве. Возьмём компанию и определим, какая система будет показывать наилучший результат.

Возьмем для примера локомотивный цех, в котором будут присутствовать 2 проблемы: 1. Недостаточность контроля за запасами; 2. Несоответствие сроков заказа и поставки потребностям локомотивного цеха.

Чтобы определить, как лучше решить имеющиеся проблемы применим ABC- классификацию и ХУZ-анализ.

В основе ABC-классификации лежит принцип Парето и каждый из критериев означает его значимость: А – наиболее ценные ресурсы, В – промежуточные ресурсы, С – наименее ценные ресурсы.

Таблица 1

Итоговые результаты ABC-классификации

Класс	Кол-во наименований, ед.	Удельный вес в общем количестве наименований, %	Удельный вес в потребном кол-ве запчастей, %	Удельный вес цены и единицы в общих издержках по закупкам единицы каждой позиции, %	Удельный вес в общих издержках, %	Удельный вес в общем количестве потреблённых запчастей, %
А	9	7,563	64,387	0,408	42,164	66,382
В	67	56,303	29,414	96,940	55,703	28,650
С	43	36,134	6,199	2,652	2,132	4,968
Итого	119	100	100	100	100	100

Основная цель ХУZ-анализа – классифицировать по характеру потребления и основным критерием этой классификации является коэффициент вариации. Признаком, на основе которого конкретную позицию ассортимента относят к группе X, Y или Z, является коэффициент вариации спроса по этой позиции, если он лежит в пределах  $0,15 > v > 0$ , то это почти стационарный поток, группа X, если  $0,3 > v > 0,15$ , то колебания спроса значительны, группа Y, при  $v > 0,3$  вариации весьма существенны, группа Z. Рассчитать коэффициенты вариации можно по формуле (3) [3]

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}} * 100 \% \quad (3)$$

где  $x$  –  $i$ -значение спроса по оцениваемой позиции;

$\bar{x}$  – среднеквартальное значение спроса по оцениваемой позиции;

$n$  – число кварталов, за которые произведена оценка.

Совмещенный анализ ABC – ХУZ в первую очередь поможет нам объединить и конкретизировать результаты по расходуемым материалам, которые помогут предприятию минимизировать расходы на приобретение, перевозку необходимых материалов.

В табл. 2 мы выделили и посчитали оптимальный размер заказа для 9 самых важных комплектующих по формуле Вильнюса (1), которая претерпела изменения в соответствии с работой рассматриваемого предприятия:

$$OPZ = \sqrt{\frac{2(A_1 + A_2)S}{(iC + ak)}}, \quad (4)$$

где  $A_1$  – затраты на размещение 1 заказа, у.е;  $A_1 = 937,836$  у.е.

$A_2$  – затраты на размещение заказа, связанные с транспортными расходами по доставке одного заказа, у.е

$i$  – процентная ставка на хранение ресурсов;  $i = 0,2$ ;

$C$  – цена единицы закупаемых ресурсов, у.е;

$a$  – затраты на хранение единицы продукции с учетом занимаемой площади склада, руб/м<sup>2</sup>;

$a = 66,48$  у.е./м<sup>2</sup>.

$k$  – коэффициент, учитывающий пространственные габариты единицы каждого вида запчастей, м<sup>2</sup>/шт.

По итогам расчёта мы получили следующие результаты.

Таблица 2

Значение ОРЗ

Класс	Наименование	ОРЗ
AX	Элемент фильтрующий ФМ 22110СБ	1 292
AУ	Рукав Р-17Б	356
AZ	Часть магистрального воздухораспределителя (чугун) 483А.010-01	117
BX	Диск муфты ТЭМ1.40.20.116-01	553
BУ	Секция охлаждения 7317-0000	41
BZ	Кольцо маслоъемное НД 32.03.00.02-008 ВД 32.03.00.02-005	543
CX	Сухарь клапана Д50.09.007	368
CУ	Кольцо компенсатора 1-ПД4А.18.075	260
CZ	Диафрагма 34.06.00.05-006	716

Если мы проанализируем данные, полученные в табл. 2, то увидим, что для определённых позиций совмещенного анализа, нам необходима определённая система управления запасами. Можно сделать следующие выводы:

1. Для позиций AX и BX подойдет система с фиксированным размером заказа, так как на эти ресурсы наибольшая потребность и они всегда должны находиться в достаточном количестве на предприятии.

2. Для позиций BX, AУ, BУ, CX подходящим вариантом будет система с фиксированным интервалом времени между заказами, основным её достоинством будет

то, что необходимо гораздо меньше ресурсов, потраченных на контроль уровня запасов определённых позиций.

Помимо двух основных систем управления запасами, о которых рассказывалось ранее, существуют также комбинированные – это система с установленной периодичностью пополнения запаса до максимального уровня и система «минимум-максимум».

Для внедрения системы с установленной периодичностью пополнения запаса до максимального уровня и эффективного её использования подойдут позиции AУ, AZ, CУ, а для системы «минимум-максимум» подойдут позиции CZ и BZ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Стерлигова, А.Н.** Управление запасами широкой номенклатуры: с чего начать? / А.Н. Стерлигова. – Текст : непосредственный // Логинфо. – 2003. – № 12. – С. 50–55.
2. **Попов А.Т.** Транспортная логистика / А.Т. Попов, М.А. Гнедаш. – Липецк: ЛГТУ, 2004. – 19 с. – Текст : непосредственный.
3. **studme** : сайт. – URL: <https://studme.org/171122/logistika/klassifikats>

Сведения об авторах:

**Абросимова Юлия Алексеевна**  
студент кафедры организации перевозок,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[yuabrosimowa@yandex.ru](mailto:yuabrosimowa@yandex.ru)

**Попов Алексей Тимофеевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой организации  
перевозок, профессор кафедры организации  
перевозок,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[a.t.popov1955@gmail.com](mailto:a.t.popov1955@gmail.com)

iya (дата обращения: 1.05.2023) – Текст :  
электронный.

4. **ABC XYZ АНАЛИЗ** : сайт. – URL:  
<https://activesalesgroup.ru/abc-xyz-analiz/>  
(дата обращения: 18.05.2023). – Текст :  
электронный.

5. **Макаров, В.М.** Логистика.  
Управление запасами в логистических  
системах : учебное пособие /  
В.М. Макаров. – Санкт-Петербург : Изд-во  
Политехнического университета, 2007. –  
93 с. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

**Abrosimova Yulia Alekseevna**  
Specialist student  
Department of transportation organization,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[yuabrosimowa@yandex.ru](mailto:yuabrosimowa@yandex.ru)

**Popov Alexey Timofeevich**  
Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor, Head of the Department of  
Transportation Organization, Professor of the  
Department of Transportation Organization,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
[a.t.popov1955@gmail.com](mailto:a.t.popov1955@gmail.com)

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_63  
УДК 669.162

В.Н. ТИТОВ, И.В. КУПРИЯНОВА, Т.В. КРАВЧЕНКО

**ВЛИЯНИЕ КОЛЕБЛЕМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ  
НА СТАБИЛЬНОСТЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Приведены результаты оценки степени влияния колеблемости параметров доменной плавки на стабильность теплового состояния доменной печи. Отмечено влияние стабильности дутьевых параметров, шлакового режима, а также тепловых потерь с охлаждающей водой по высоте печи. Полученные результаты могут использоваться при анализе результатов работы доменной печи.

**Ключевые слова:** среднеквадратичное отклонение, тепловое состояние, ТТГ, тепловые потери.

V.N. TITOV, I.V. KUPRIYANOVA, T.V. KRAVCHENKO

**INFLUENCE OF THE BLAST FURNACE MELTING PARAMETER VARIABILITY  
ON THE STABILITY OF THE BLAST FURNACE THERMAL STATE**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The results of assessing the degree of influence of the blast furnace melting parameter variability on the stability of the blast furnace thermal state are presented. The influence of blowing parameters stability, slag practice, and heat losses with cooling water along the furnace height is noted. The results obtained can be used in analyzing the results of blast furnace operation.

**Keywords:** mean-square deviation, thermal state, heat loss.

Обязательным и важным элементом управления доменным процессом является анализ причин отклонений между плановыми и фактическими значениями таких основных технико-экономических показателей плавки, как расход кокса и производительность. В настоящее время широко применяется такая методика анализа причин изменений расхода кокса и производительности печей при плановом изменении или незапланированных колебаниях технологических факторов доменной плавки, как пофакторный анализ, которая

оценивает влияние на производственные показатели различных параметров доменного процесса в виде их удельных расходов с применением утвержденных нормативных коэффициентов влияния, определенных аналитически на основе теоретических положений доменного процесса и эмпирически по данным практики доменного производства [1-2].

Анализ технической литературы по доменному производству показал, что при описании влияния параметров доменной плавки на технико-экономические показатели работы доменных печей

основной упор делается на абсолютное влияние [3-11]. При этом в отдельных работах [12-14] авторы касались стабильности теплового состояния доменной печи и влияния на него отдельных технологических параметров. Влияние стабильности параметров на показатели работы печи представлено в работе [15]. При этом следует отметить, что в данной работе автор сделал упор на содержание железа в агломерационной шихте и агломерате.

В связи с изложенным выше, актуальным является вопрос оценки связи стабильности параметров доменной плавки с показателями работы доменной печи. В качестве критерия, характеризующего величину среднеквадратичного отклонения (СКО) содержания кремния в чугунах. Это связано с тем, что содержание кремния в чугунах является основным показателем теплового состояния доменной плавки.

На первом этапе оценивалось влияние дутьевых параметров, в качестве которых использовались температура дутья, расход природного газа и теоретической температуры горения (ТТГ). Результаты оценки приведены на рисунках 1-3.

Анализ полученных результатов показал, что стабилизация дутьевых параметров приводит к снижению среднеквадратичного содержания кремния в чугунах. Так снижение колеблемости температуры дутья на 10 °С снижает СКО кремния на 0,012 %. Аналогично по расходу природного газа снижение СКО кремния составляет 0,004 % на каждую 1 тыс. м<sup>3</sup>/ч, по теоретической температуре горения 0,009 % на каждые 10 °С.

Можно отметить, что наибольшее влияние оказывает стабильность температуры дутья, что обусловлено непосредственным влиянием данного параметра на тепловое состояние доменной печи. Низкое влияние величины колебаний природного газа обусловлено знакопеременным характером его влияния на содержание кремния в чугунах. Что касается теоретической температуры горения, то влияние величины ее изменений занимает промежуточное положение и может быть связано с комплексным характером данного показателя, в который входит как расход природного газа, так и температура дутья.

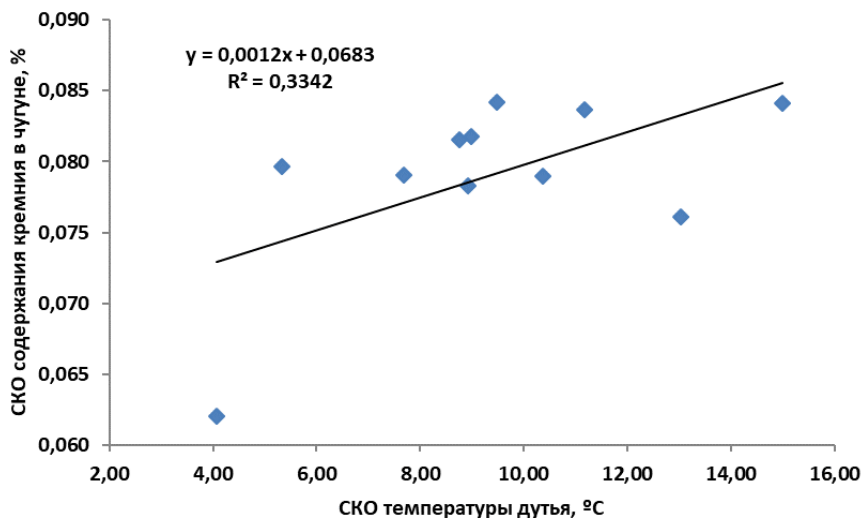


Рис. 1. Влияние колебаний температуры дутья на колебания химического состава чугуна по содержанию кремния

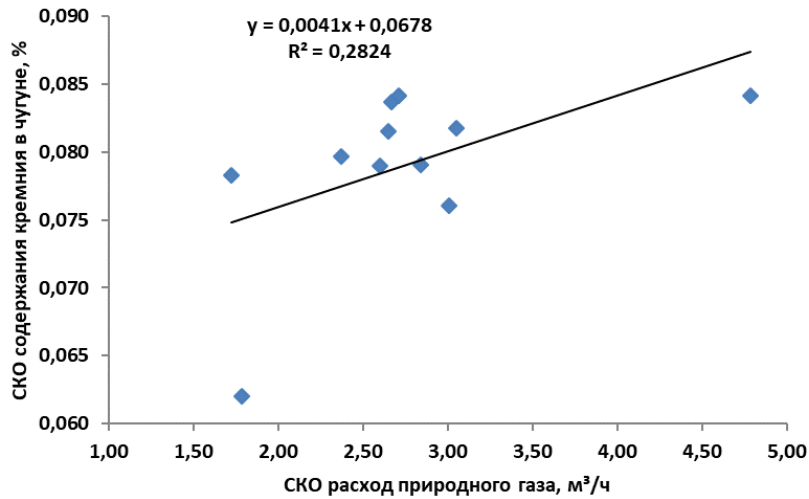


Рис. 2. Влияние колебаний расхода природного газа на колебания химического состава чугуна по содержанию кремния

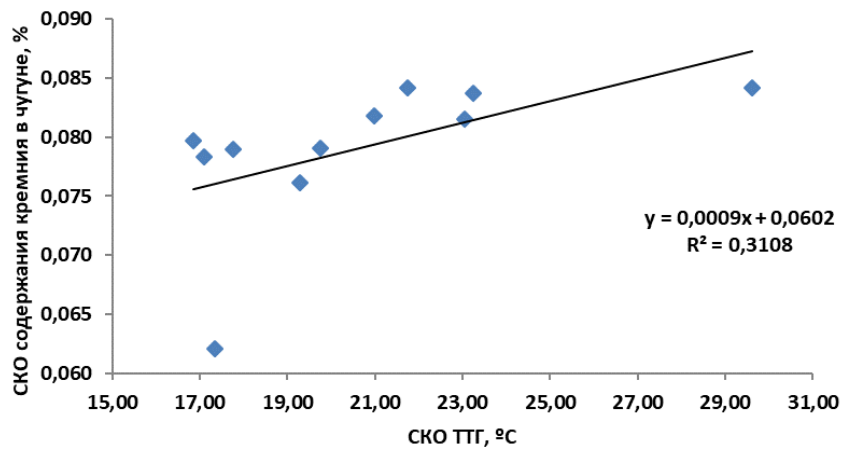


Рис. 3. Влияние колебаний теоретической температуры горения на колебания химического состава чугуна по содержанию кремния

В ходе дальнейшей работы было оценено влияние колеблемости рудной нагрузки на величину среднеквадратичного отклонения

содержания кремния в чугуна. Полученная зависимость представлена на рис. 4.

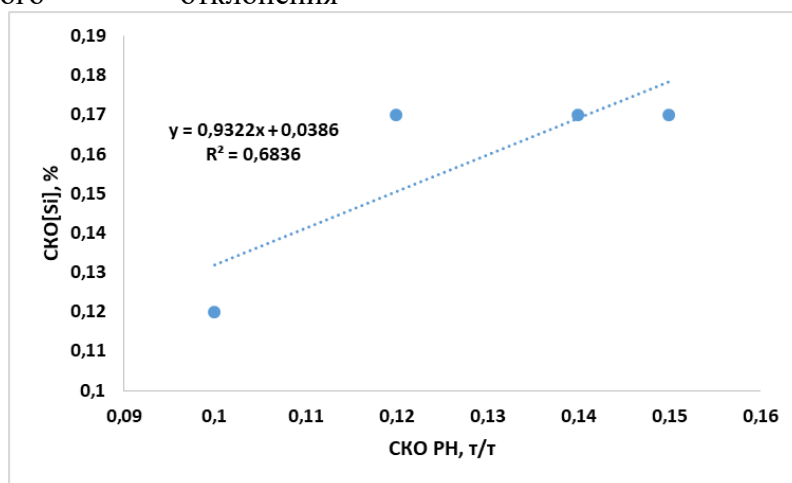


Рис. 4. Влияние стабильности рудной нагрузки на СКО содержания кремния в чугуна

Дополнительно было оценено влияние стабильности шлакового режима. Стабильность шлакового режима оценивали по величине

среднеквадратичного отклонения основности шлака по модулю ВЗ ((CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub>). Результаты оценки представлены на рис. 5.

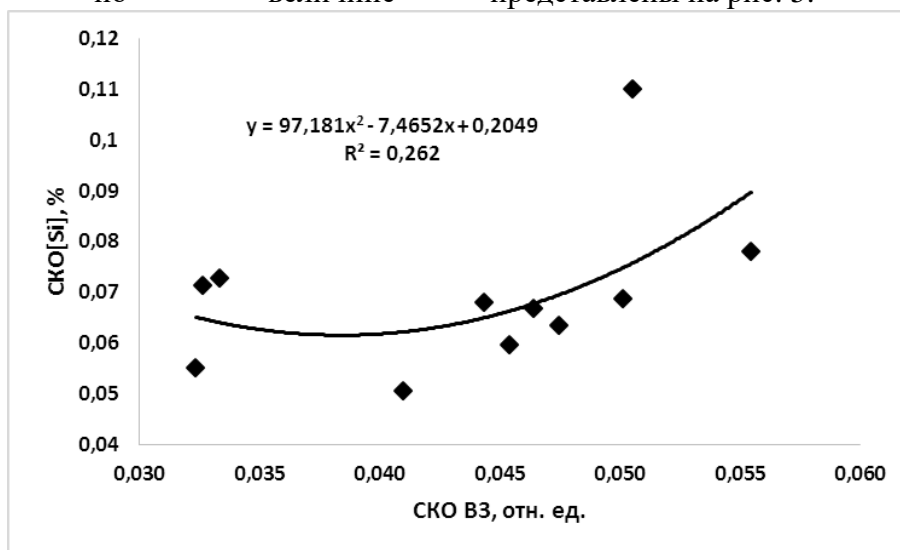


Рис. 5. Влияние стабильности основности шлака по модулю ВЗ на стабильность теплового состояния

Анализ полученных результатов показывает, что снижение стабильности основности шлака способствует дестабилизации содержания кремния в чугуне. Особенно сильно данное влияние проявляется при увеличении SKO основности по модулю ВЗ более 0,04 отн. ед. Это обусловлено тем, что дестабилизация основности по модулю ВЗ способствует колебаниям положения и толщины зоны когезии, что приводит к нестабильности газодинамического режима в нижней части печи. Помимо этого, колебания положения и толщины

зоны когезии способствуют изменению объемов высокотемпературной зоны, в которой осуществляется восстановление кремния в доменной печи. Линеаризация влияния SKO ВЗ при уровне более 0,04 отн. ед. показывает, что увеличение SKO ВЗ на 0,01 отн. ед. увеличивает SKO [Si] на 0,025 %.

Также была произведена оценка влияния стабильности тепловых потерь на колеблемость содержания кремния в чугуне. Результаты оценки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Уравнения связи стабильности тепловых потерь ( $\sigma Q$ ) с величиной среднеквадратичного отклонения содержания кремния в чугуне

№ ряда	Уравнение	Коэффициент корреляции
5	$\sigma[\text{Si}] = 0,0915\sigma Q - 0,215$	0,51
6	$\sigma[\text{Si}] = 0,0439\sigma Q - 0,0454$	0,48
7	$\sigma[\text{Si}] = 0,0452\sigma Q - 0,0461$	0,42
8	$\sigma[\text{Si}] = 0,0306\sigma Q + 0,1177$	0,35
9	$\sigma[\text{Si}] = 0,0149\sigma Q + 0,1836$	0,17

Из приведенных данных видно, что наиболее сильно на величину

среднеквадратичного отклонения кремния в чугуне влияет колеблемость тепловых

потерь на 5-7 рядах холодильников (район заплечиков – распар). Это связано с тем, что колеблемость теплоотвода в данном районе наиболее сильно сказывается на тепловом балансе в нижней зоне печи (при усилении теплоотвода возникает дефицит тепла, при снижении теплоотвода – избыток), что и отражается в колебаниях теплового состояния печи. Помимо этого, в данном районе происходит наиболее динамичное

обновление гарнисажа, что также оказывает влияние на стабильность теплового режима горна.

В табл. 2 представлены сводные результаты проведенного анализа. Полученная информация позволяет принимать управляющие воздействия и описывать возможные причины дестабилизации теплового состояния доменной печи.

Таблица 2

Сводная информация о влиянии колеблемости технологических параметров на стабильность содержания кремния в чугуне.

Параметр	Величина изменения	$\Delta$ СКО[Si], %
Среднеквадратичное изменение		
Температура дутья	+10 °С	+0,012
Природный газ	+1 тыс. м <sup>3</sup> /час	+0,004
Теоретическая температура горения	+10 °С	+0,009
Рудная нагрузка	+0,01 т/т	+0,009
Основность шлака ВЗ	+0,01	+0,025
Тепловые потери в заплечиках	+1 тыс. ккал/(м <sup>2</sup> час)	+0,068
Тепловые потери в распаре	+1 тыс. ккал/(м <sup>2</sup> час)	+0,045
Тепловые потери в низу шахты	+1 тыс. ккал/(м <sup>2</sup> час)	+0,031

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы факторы, обуславливающие колебания кремния в чугуне.

2. Анализ влияния СКО дутьевых параметров показал наличие достаточно тесной связи со стабильностью теплового состояния доменной печи.

- Снижение СКО температуры дутья на 10 °С понижает СКО [Si] на 0,012 %;
- Снижение СКО расхода природного газа 1 тыс. м<sup>3</sup>/ч понижает СКО [Si] на 0,004 %;
- Снижение СКО теоретической температуры горения на 10 °С понижает СКО [Si] на 0,009 %;

3. Отмечено влияние стабильности рудной нагрузки и основности шлака на величину среднеквадратичного отклонения содержания кремния в чугуне. Увеличение СКО рудной нагрузки на 0,01 т/т и основности шлак на 0,01 способствуют росту СКО содержания кремния в чугуне на 0,009 % и 0,025 % соответственно.

4. Зафиксировано наличие связи колеблемости тепловых потерь со стабильностью теплового состояния печи. Наиболее сильно на величину среднеквадратичного отклонения кремния в чугуне влияет колеблемость тепловых потерь на 5-7 рядах холодильников (район заплечиков – распар).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Третяк, А.А.** Доменные печи. Нормативы расхода кокса. Руководящий документ Минчермета СССР / А.А. Третяк. – Москва, 1987 г. с. 16. – Текст : непосредственный.
2. **Товаровский, И.Г.** Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк. – Днепропетровск : Пороги, 2001. – 424 с. – Текст : непосредственный.
3. **Плискановский, С.Т.** Достижения и перспективы развития доменного производства / С.Т. Плискановский, В.И. Большаков. – Текст : непосредственный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 4. – С. 4–9.
4. **Борисов, А.Ф.** Советы начальнику доменного цеха / А.Ф. Борисов. – Москва : Фирма «ПРОГРЕСС», 1996. – 256 с. – Текст : непосредственный.
5. **Щербаков, В.П.** Основы доменного производства / В.П. Щербаков. – Москва : Metallurgy, 1969. – 326 с. – Текст : непосредственный.
6. **Товаровский, И.Г.** Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность / И.Г. Товаровский. – Текст : непосредственный // *Сталь*. – 2014. – № 5. – С. 4–11.
7. Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / Н.М. Можаренко, Ю.С. Семенов, В.В. Горупаха [и др.] – Текст : непосредственный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 5. – С. 2–9.
8. **Товаровский, И.Г.** Доменная плавка / И.Г. Товаровский. – 2-е издание. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 764 с. – Текст : непосредственный.
9. *Металлургия чугуна : учебник для вузов*. – 3-е изд., переработанное и дополненное / под редакцией Ю.С. Юсфина. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с. – Текст : непосредственный.
10. Опыт работы доменных печей на коксе улучшенного качества и замены природного газа пылеугольным топливом / Ю.В. Филатов, А.Н. Рыженков, А.В. Емченко [и др.]. – Текст : непосредственный // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 4 (215). – С. 9–14.
11. **Подкорытов, А.Л.** Опыт освоения и оптимизации технологии на доменной печи № 5 ОАО «ЕМЗ» / А.Л. Подкорытов, А.М. Кузнецов. – Текст : непосредственный // *Черная металлургия*. – 2008. – № 11. – С. 59–70.
12. **Тараканов, А.К.** Возможность эффективного управления тепловым режимом доменной плавки в современных условиях / А.К. Тараканов, А.С. Костомаров, В.П. Лялюк. – Текст : непосредственный // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 4. – С. 9–12.
13. **Тараканов, А.К.** О рациональных технологических принципах построения алгоритмов управления тепловым режимом доменной плавки / А.К. Тараканов. – Текст : непосредственный // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1987. – № 4. – С. 134–138.
14. Влияние переходных режимов доменной плавки на изменение температуры холодильников системы охлаждения / В.В. Горупаха, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик [и др.] – Текст : непосредственный // *Сталь*. – 2019. – № 6. – С. 4–8.
15. **Товаровский, И.Г.** Аналитическая оценка влияния колеблемости содержания железа в шихте на показатели доменной плавки и качество чугуна / И.Г. Товаровский, Я.М. Ободан, В.П. Миршавка. – Текст : непосредственный // *Доменное производство: научные труды*. – № 2. Москва : Metallurgy, 1975. – С. 122–130.

Сведения об авторах:

**Титов Владимир Николаевич**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: [kaf-mt@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-mt@stu.lipetsk.ru)

**Куприянова Ирина Вячеславовна**

старший преподаватель кафедры  
металлургических технологий,

Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

**Кравченко Татьяна Викторовна**

старший преподаватель кафедры  
металлургических технологий,

Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: [kaf-mt@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-mt@stu.lipetsk.ru)

Information about the authors:

**Titov Vladimir Nikolaevich**

Associate Professor of the Department of  
Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

e-mail: [kaf-mt@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-mt@stu.lipetsk.ru)

**Kupriyanova Irina Vyacheslavovna**

Senior lecturer of the Department of  
Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

e-mail: [kaf-mt@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-mt@stu.lipetsk.ru)

**Kravchenko Tatiana Viktorovna**

Senior lecturer of the Department of  
Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University.

3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

e-mail: [kaf-mt@stu.lipetsk.ru](mailto:kaf-mt@stu.lipetsk.ru)

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_69

УДК 168.18

А.Н. РОГОТОВСКИЙ, А.А. ШИПЕЛЬНИКОВ, С.В. СКАКОВ, Н.А. БОБЫЛЕВА

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВДУВАНИЯ СТРУИ КИСЛОРОДА В МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ВАННУ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРОВ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** в статье приводятся особенности проблематики корректной постановки задачи компьютерного моделирования процесса вдувания струи кислорода в металлическую ванну большегрузных конвертеров, аналогичного наблюдаемому в работе конвертеров Конверторного цеха № 1 и № 2 ПАО «НЛМК». Получены компьютерные модели конвертеров с расплавом и распределением потоков кислорода, позволяющие оценивать изменение конфигурации реакционной зоны расплава при изменении параметров истечения кислорода из многосопловой фурмы. Тестирование модели на независимость результатов расчёта от размера сетки показывает ее устойчивость и адекватность для применения с целью изучения эффекта перемешивания вдуваемого кислорода с металлической ванной.

**Ключевые слова:** модель, продувка кислородом, конвертер, компьютерное моделирование, сталь, шлак, газ.

A.N. ROGOTOVSKY, A.A. SHIPELNIKOV, S.V. SKAKOV, N.A. BOBYLEVA

## FORMULATING THE PROBLEM OF MATHEMATICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF INJECTING THE OXYGEN JET INTO THE METAL BATH OF HEAVY LOAD CONVERTERS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** This article specifies several aspects of correctly formulating the problem of computer simulation of the process of injecting the oxygen jet into the metal bath of heavy load converters, which is similar to that observed in the operation of converters of NLMK Converter Shops #1 and #2. Computer models of converters with melt and oxygen flow distribution were obtained, which makes it possible to assess the change in the melt reaction zone configuration at the change of the parameters of oxygen flow from a multi-nozzle tuyere. The model was tested for the independence of calculation results on the grid size; the test results show its stability and adequacy when applied to study the effect of mixing of the blown oxygen with the metal bath.

**Keywords:** model, oxygen purge, converter, computer simulation, steel, slag, gas.

### ВВЕДЕНИЕ

Геометрическая модель представляет полномасштабную трехмерную модель конвертера с верхней продувкой через кислородную фурму. Поскольку кислородные сопла в головке кислородной фурмы распределены симметрично, для сокращения

времени расчета, расчетная область была задана таким образом, чтобы рассматривать только одну шестую всей модели; модель включает одно сопло Лаваля и часть конвертера [1–3]. Геометрическая модель показана на рис. 1.

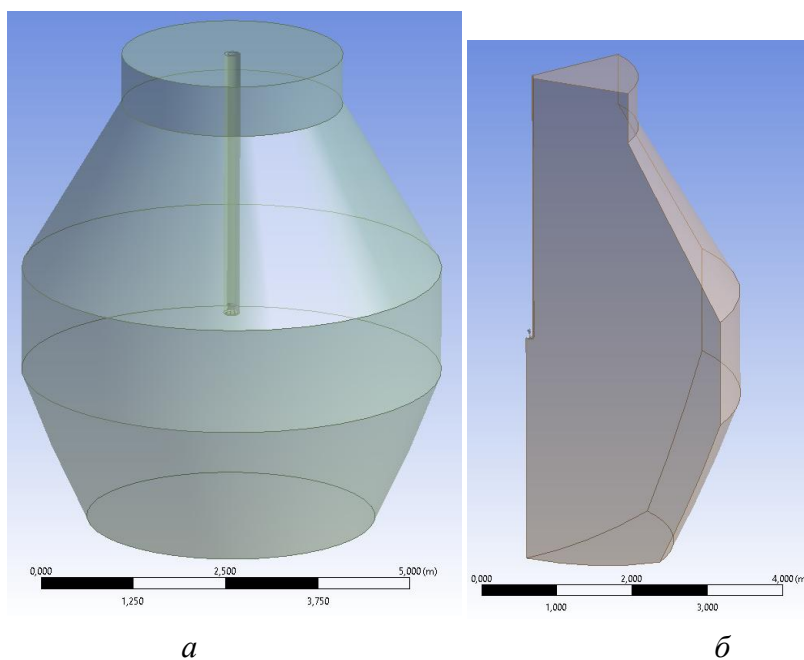


Рис. 1. Геометрическая модель конвертера:  
а – геометрическая модель; б – расчетная область

В данном исследовании применялась структурированная блочная гексаэдрическая расчетная сетка. С целью адаптации к большим градиентам скорости, температуры и давления, а также описания движения на границе раздела фаз были увеличены количество ячеек сетки во внутренней части сопла кислородной фурмы, область выхода из

сопла, области основного потока струи и вблизи границы раздела «газ–жидкость». Количество элементов сетки составляло около  $(1,5-2,0) \cdot 10^6$  в соответствии с размером конвертера. Основной вид сеточной модели и частично увеличенный вид сетки в районе выхода кислородной струи из сопла показаны на рис. 2, 3.

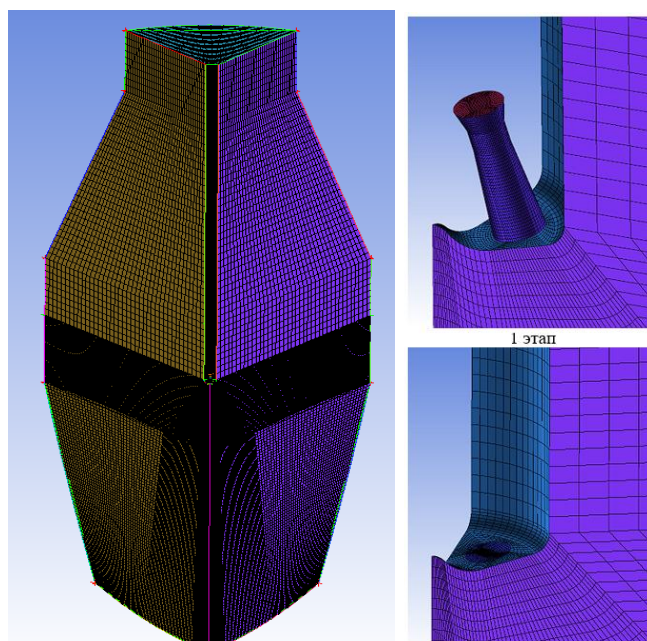


Рис. 2. Основной вид сеточной модели и частично увеличенный вид сетки в районе выхода кислородной струи из сопла для модели конвертера КЦ-1

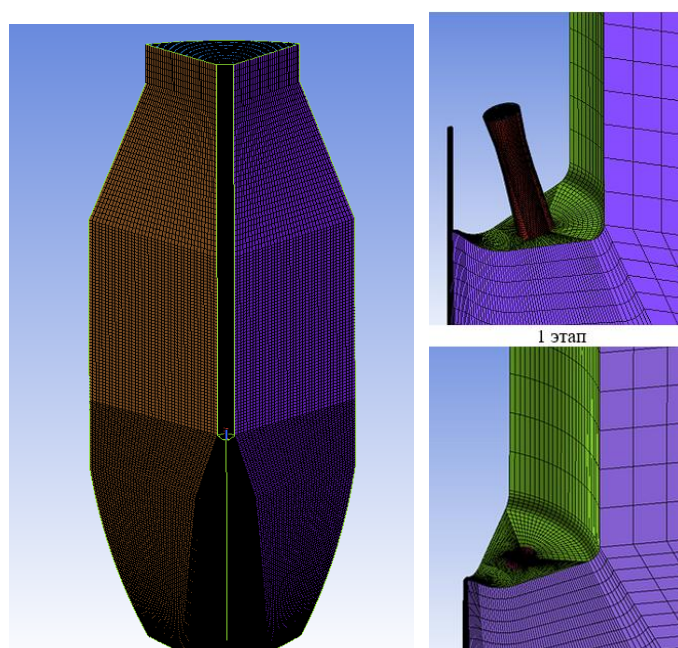


Рис. 3. Основной вид сеточной модели и частично увеличенный вид сетки в районе выхода кислородной струи из сопла для модели конвертера КЦ-2

Полученные сеточные 3D-модели (рис. 2, 3) полностью соответствуют требованиям рабочих чертежей конвертеров и типовых кислородных фурм, применяемых в КЦ-1 и КЦ-2 ПАО «НЛМК».

### ПРИМЕНЯЕМАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Поток кислорода, расплава и шлака моделируется с помощью многофазной нестационарной модели Volume Of Fluid (VoF). Для всего поля течения решается

Уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla(\rho \mathbf{U}\mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla\left\{(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)\right\} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s;$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla(\alpha_i \mathbf{U}) + \nabla(\alpha_i(1 - \alpha_i)\mathbf{U}_r) = \frac{\alpha_i}{\rho_g} \left( \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla \rho_g \right).$$

Здесь  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $F_s$  – сила поверхностного натяжения для единицы объема:

$$\mathbf{F}_s = \sigma \kappa \nabla \alpha_i,$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, а  $\kappa = \nabla \cdot (\nabla \alpha_i |\nabla \alpha_i|)$  – кривизна границы раздела;  $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_g - \mathbf{U}_l$  – относительная скорость между различными фазами. Объемная доля  $i$ -й фазы  $\alpha_i$  определяется как:  $\alpha_i = 0$  для точки внутри газовой фазы,  $0 < \alpha_i < 1$  для точки в переходной области и  $\alpha_i = 1$  для точки в фазе расплава. Плотность  $\rho$  и динамическая вязкость  $\mu$  являются функцией объемной доли  $\alpha_i$  и определяются по формулам

$$\rho = \sum \alpha_i \rho_i;$$

$$\mu = \sum \alpha_i \mu_i,$$

где  $\rho_i$  – плотность  $i$ -й фазы;  
 $\mu_i$  – динамическая вязкость  $i$ -й фазы.

Уравнение переноса энергии

Поскольку градиент температуры между сверхзвуковыми струями кислорода и горячим расплавом значителен, температурное поле в системе

один набор уравнений переноса массы, импульса и энергии вместе с уравнением конвективного движения для объемной доли  $\alpha$  каждой фазы [4–7, 8–14].

Уравнение переноса массы имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{U}) = 0,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  
 $t$  – время;  
 $\mathbf{U}$  – вектор скорости.

должно решаться с помощью уравнения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\mathbf{U}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T).$$

В модели VOF энергия  $E$  и температура  $T$  рассматриваются как переменные, усредненные по массе:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i E_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i},$$

где  $E_i$  для каждой фазы зависит от удельной теплоты этой фазы и общей температуры. Свойства  $\rho$  и  $\lambda_{eff}$  (эффективная теплопроводность) являются общими для фаз:

$$\lambda_{eff} = \sum \frac{\alpha_i}{c_{p_i}} + \frac{\mu_t}{Pr_t},$$

где  $c_{p_i}$  – удельная теплоемкость  $i$ -й фазы.

Модель турбулентности

В данном исследовании использовалась стандартная  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности [13, 15]. Выражения кинетической энергии турбулентности  $k$  и турбулентной диссипации  $\epsilon$  имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M;$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где  $G_k$  – учитывает образование кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости;

$G_b$  – учитывает образование кинетической энергии турбулентности за счёт плавучести;

$\sigma_k$  и  $\sigma_\varepsilon$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$  соответственно;  
 $Y_M$  – представляет вклад флуктуационного расширения в сжимаемой турбулентности в общую скорость рассеяния;

$C_{3\varepsilon}$  – степень плавучести.

Константы модели:

$$C_{1\varepsilon}=1,44; \quad C_{2\varepsilon}=1,92;$$

$$\sigma_k=1,0; \quad \sigma_\varepsilon=1,3.$$

$\mu_t$  – турбулентная (или вихревая) вязкость, которая рассчитывается путём объединения  $k$  и  $\varepsilon$  следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где  $C_\mu$  – эмпирический коэффициент, равный  $C_\mu = 0,09$ ;

Кислородно-конвертерный процесс с верхней продувкой чрезвычайно сложен и труден для наблюдения. Поэтому сложные химические реакции, происходящие между расплавом, шлаком и газом не учитывались.

В связи со сложностью и процесса моделирование гидродинамики конвертерной ванны при продувке

кислородом через верхнюю фурму проводилось в два этапа [3, 13–16]. На первом этапе моделирования отдельно рассчитывалось течение в сопле Лавалья в стационарном режиме. Граничные условия, применяемые на первом этапе, представлены на рис. 4, 5. Рассчитанные значения давления, скорости и температуры кислорода на выходе из сопла Лавалья использовались в качестве граничных условий на входных поверхностях расчетной области на втором этапе моделирования. Граничные условия, применяемые на втором этапе моделирования представлены на рис. 6, 7.

Для упрощения процесса моделирования были сделаны следующие допущения:

1. Течение в сопле представляет собой трехмерный стационарный неизотермический процесс.

2. При моделировании течения в конвертере расплав и шлак принимаются ньютоновскими несжимаемыми жидкостями.

3. Кислород принимается идеальным газом.

4. На поверхности футеровки применяется условие отсутствия проскальзывания, а процесс теплообмена между футеровкой и расплавленной ванной игнорируется. Для определения поля скоростей в пограничном слое вблизи стены применяется стандартная пристеночная функция.

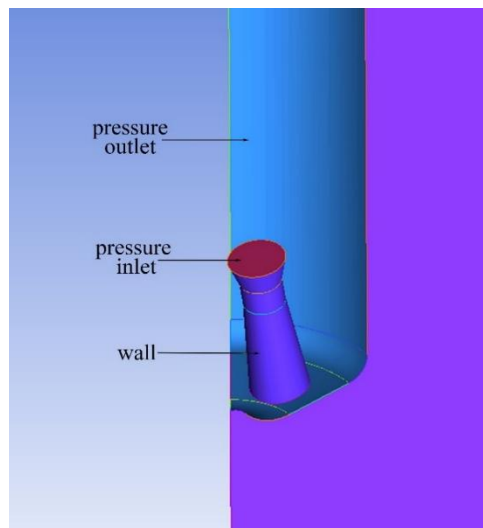


Рис. 4. Граничные условия для первого этапа моделирования для модели конвертера КЦ-1

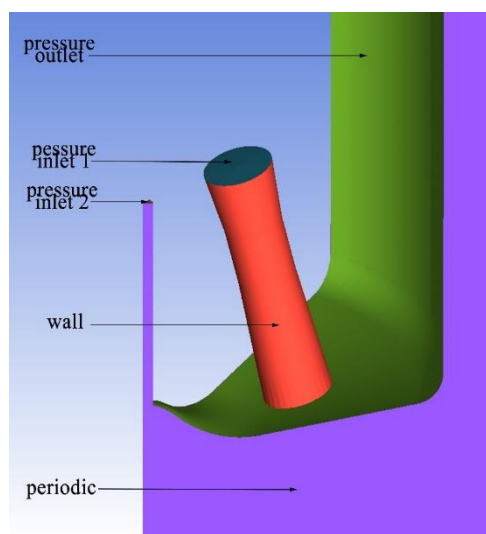


Рис. 5. Граничные условия для первого этапа моделирования для модели конвертера КЦ-2

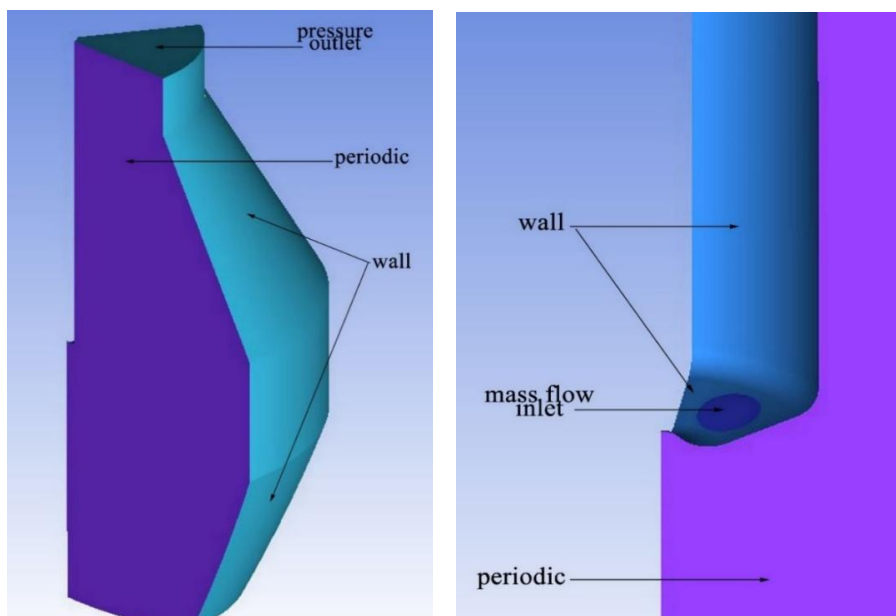


Рис. 6. Граничные условия для второго этапа моделирования для модели конвертера КЦ-1

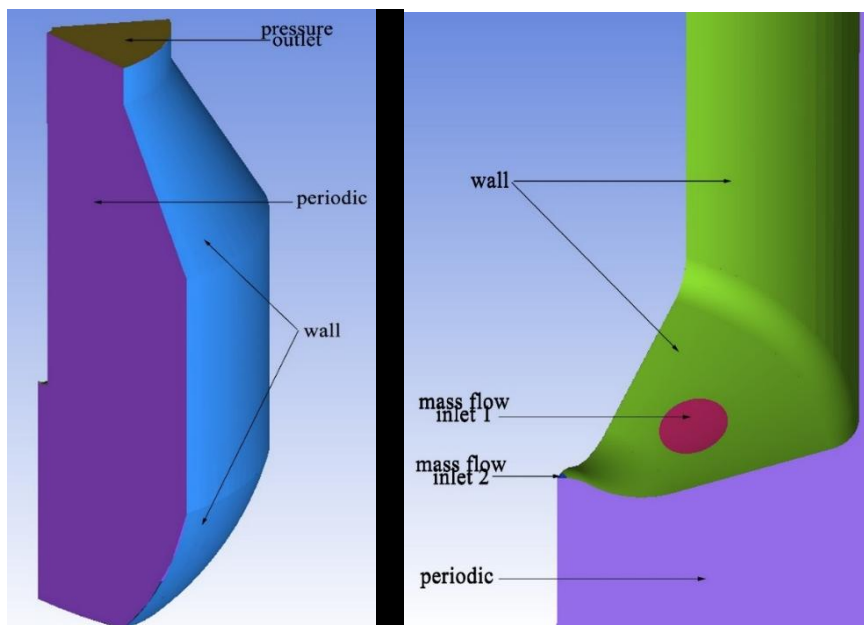


Рис. 7. Граничные условия для второго этапа моделирования для модели конвертера КЦ-2

Физические параметры расплавленной стали, шлака, кислорода

принятые при моделировании приведены в табл.

Таблица

Физические параметры расплавленной стали, шлака, кислорода

Параметр		Сталь	Шлак	Кислород
Плотность, кг/м <sup>3</sup>		7000	3000	расчет по 1-му этапу
Вязкость, кг/(м·с)		0,0052	0,1	$1,919 \cdot 10^{-5}$
Температура, °С		1550	1550	25
Теплоемкость, Дж/(кг·К)		500	1200	f(T)
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		25	1,7	0,0246
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	Кислород–сталь	1,6		
	Кислород–шлак	0,55		
	Сталь–шлак	1,15		

Система Навье–Стокса решается методом конечных объемов алгоритмом Coupled, реализованным в Ansys Fluent. Для расчета градиента используется основанный на ячейках метод наименьших квадратов (Least squares cell-based method), для расчета давления – схема PRESTO!, для момента – схема Upwind второго порядка и для турбулентной кинетической энергии – схема Upwind второго порядка.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ НА НЕЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА ОТ РАЗМЕРА СЕТКИ

Плотность расчетной сетки оказывает большое влияние на точность и достоверность численных результатов. Поэтому, чтобы проверить чувствительность результатов расчета к сетке, были проведены сравнение и анализ распределения скорости вдоль центральной оси потока кислорода для четырех вариантов сетки с количеством

ячеек  $4 \cdot 10^5$ ;  $8 \cdot 10^5$ ;  $1,5 \cdot 10^6$ ;  $3,3 \cdot 10^6$ . Результаты сравнения (рис. 7) показывают, что увеличение числа элементов сетки более  $1,5 \cdot 10^6$  не оказывает существенного влияния

на результаты расчета, но позволяет существенно сократить машинное время проведения расчетов.

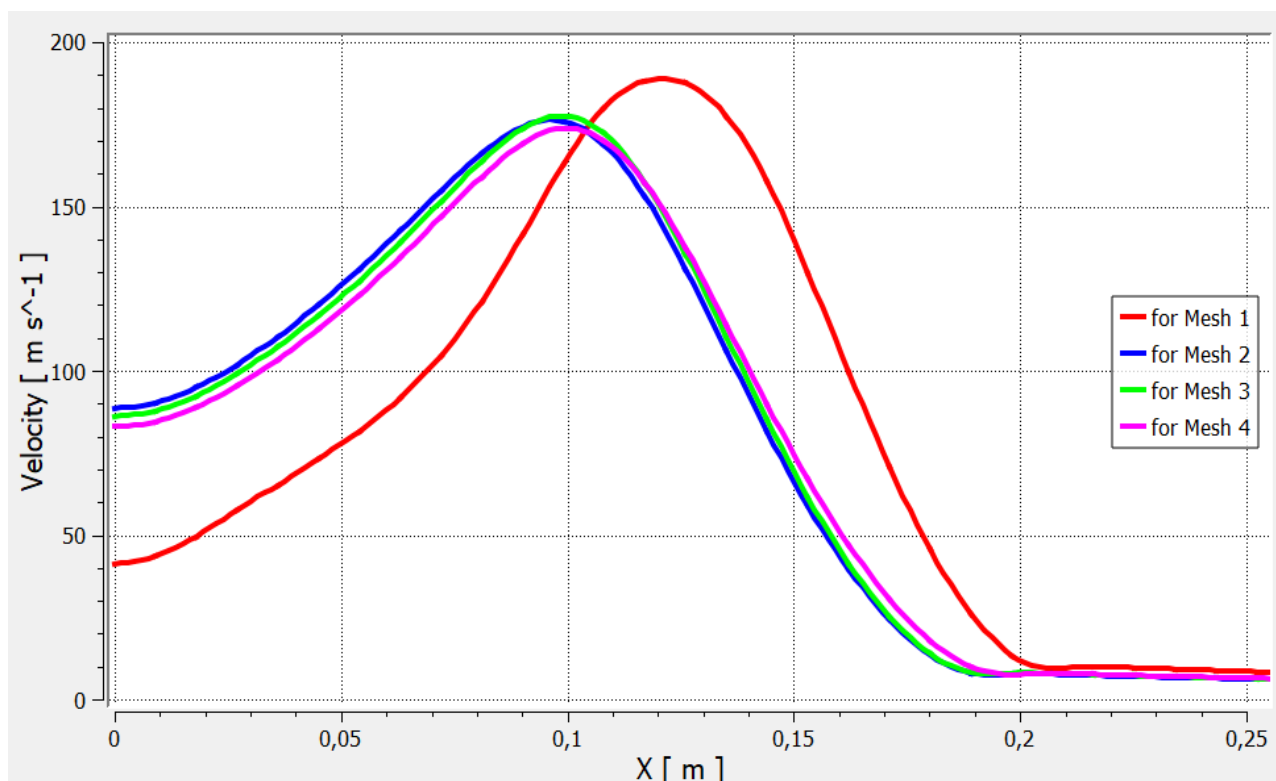


Рис. 7. Изменение скорости газа вдоль центральной оси сопла Лавала для сеток с различным количеством ячеек: 1 –  $4 \cdot 10^5$ ; 2 –  $8 \cdot 10^5$ ; 3 –  $1,5 \cdot 10^6$ ; 4 –  $3,3 \cdot 10^6$  ячеек

Поэтому для численного моделирования выбрана сетка с  $1,5 \cdot 10^6$  ячеек, что хорошо соотносится с опубликованными результатами исследований зарубежных коллег для условий моделирования подобных процессов в большегрузных конвертерах [1–3, 8–10].

#### ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы нами получены компьютерные модели большегрузных конвертеров с расплавом и распределением потоков кислорода,

позволяющих оценивать изменение конфигурации реакционной зоны расплава при изменении параметров истечения кислорода из многосопловой фурмы. Тестирование модели на независимость результатов расчёта от размера сетки показывают ее устойчивость и адекватность для возможности применения с целью изучения эффекта перемешивания вдуваемого кислорода с металлической ванной.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rymarchyk, N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations / N. Rymarchyk. – Text : immediate // Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 445–449.
2. Further process improvements at

- Severstal Sparrows Point via new technology implementation / R.P. Stone, D. Neith, S. Koester [et al.]. – Text : immediate // AIS Tech 2009 Proceedings. – 2009. – № 1. – P. 737–747.
3. Ughadpada, K.S. Production improvement of No. 2 BOSP at ESAI /

K. Ughadpada, S. Briglio, G. Mohammed. – Text : immediate // Iron and Steel Technology. – 2010. – № 11. – P. 59–64.

4. Перспективная конструкция кислородной фурмы для 350-т конвертеров ОАО «Евраз ЗСМК» / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.А. Филиппенко [и др.] – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 2 (4). – С. 4–7.

5. In book: Improvement of BOP Steel Refining Blowing Control using Wide Angle Lance Nozzles / Y. Tabata, R.C. Marsh, P. Kelly [et al.] – Text : immediate // Steelmaking Conference Proceedings. – 1998. – P. 451–457.

6. Кислородные фурмы с составными соплами для продувки низкоуглеродистого металла в большегрузных конвертерах / В.В. Солоненко, Е.В. Протопопов, А.В. Амелин, М.В. Темлянцев. – Текст : непосредственный // XV Международный конгресс сталеплавильщиков : сборник трудов, к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. – 2018, Новокузнецк : Издательство РПК ПринтАП. – 94 с.

7. Разработка и оптимизация конструкции головок четырехсопловых кислородных фурм для большегрузных конвертеров, работающих в условиях передувки / Е.В. Протопопов, М.Н. Корвякова, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2013. – № 4 (6). – С. 3–7.

8. **Rogotovskiy, A.N.** MODELING AND DEVELOPMENT OF A FORGING INGOT OF RATIONAL DESIGN AND MASS / A.N. Rogotovskiy, A.A. Shipelnikov, N.A. Bobyleva. – Text : immediate // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2018. – Т. 53, № 5. – С. 936–942.

9. Особенности гидродинамики

расплава в процессе продувки аргоном в сталеразливочном ковше / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Н.А. Бобылева, С.В. Скаков. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2020. – № 2 (43). – С. 73–81.

10. Современные проблемы и перспективы развития компьютерного моделирования движения расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Н.А. Бобылева [и др.] – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 374–380.

11. **Фейлер, С.В.** Использование составных сопел в кислородных фурмах для продувки металлического расплава в большегрузных конвертерах / С.В. Фейлер, Е.В. Протопопов, Д.Т. Неунывахина. – Текст : непосредственный // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2016. – № 18. – С. 111–117.

12. **Сущенко, А.В.** Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко. – Текст : непосредственный // Вестник Приазовского государственного технического университета. – 2009. – № 19. – С. 36–41.

13. **Сущенко, А.В.** К вопросу об оптимизации дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров / А.В. Сущенко. – Текст : непосредственный // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 21–26.

14. **Чернятевич, А.Г.** Современное состояние и направления совершенствования конструкций дутьевых устройств для кислородно-конвертерных процессов / А.Г. Чернятевич. – Текст : непосредственный // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 7. – С. 20–23.

15. **Stone, R.P.** Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation / R.P. Stone, D. Neith, S. Koester. – Text : immediate // AIS Tech 2009 Proceedings. – 2009. – № 1. – P. 737–747.

16. Исследование особенностей формирования металлошлаковых

настывшей на двухъярусных кислородных фурмах при продувке конвертерной ванны / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, С.В. Фейлер [и др.] – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия . – 2015. – № 58 (4). – С. 248–257.

Сведения об авторах:

**Роговский Александр Николаевич**  
кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.

**Шипельников Алексей Александрович**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.

e-mail: [ashipelnikov@yandex.ru](mailto:ashipelnikov@yandex.ru)

**Скаков Сергей Викторович**  
старший преподаватель  
кафедры металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.

**Бобылева Наталия Александровна**  
учебный мастер кафедры  
металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
mail: [bobyleva.n.a@yandex.ru](mailto:bobyleva.n.a@yandex.ru)

Information about the authors:

**Rogovsky Alexander Nicolaevich**  
candidate of Technical Sciences,  
Head of the Department of Metallurgical Technologies  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

**Shipelnikov Alexey Alexandrovich**  
candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

**Skakov Sergey Viktorovich**  
Senior Lecturer  
of the Department of Metallurgical Technologies  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

**Bobyleva Natalia Alexandrovna**  
Training Master of the Department of Metallurgical Technologies  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

DOI 10.53015/23049235\_2023\_3\_79  
УДК 621.791

А.О. ДОЛЖНИКОВА, В.В. НЕВЕРОВ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СВАРКИ ЁМКОСТЕЙ  
ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С УЧЁТОМ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Работа посвящена исследованию влияния величины погонной энергии на качество металла сварного шва при изготовлении резервуаров для химической промышленности из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Показаны результаты металлографических исследований и испытаний прочности сварных соединений. На их основании разработаны технологические решения (определены режимы сварки), позволяющие получить качественное сварное соединение с обеспечением максимальной производительности процесса.

**Ключевые слова:** сварка под флюсом, резервуар, качество сварного шва, погонная энергия, прочность.

A.O. DOLZHNIKOVA, V.V. NEVEROV

**DETERMINATION OF OPTIMAL MODES FOR WELDING TANKS  
FOR CHEMICAL INDUSTRY WITH ACCOUNT OF PROCESS PERFORMANCE**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The paper studies the influence of the heat input value on the weld metal quality in manufacturing tanks for the chemical industry of corrosion-resistant steel 12H18N10T. The results of metallographic studies and welded joint strength tests are given. They are used as the basis for developing technological solutions (welding modes are determined) to obtain a high-quality welded joint ensuring maximum process performance.

**Keywords:** submerged arc welding, tank, weld quality, heat input, strength.

В химической промышленности для производства и хранения продукции часто используются сварные резервуары из коррозионностойких сталей. Как правило, они представляют собой герметичные стальные резервуары, предназначенные для хранения химических веществ (концентрированные и

разбавленные кислоты, окислители, соляные растворы, щелочи, сжиженные газы и другие химикаты). Выполняются такие резервуары в основном из высоколегированных коррозионностойких сталей.

В ООО «Импульс» были изготовлены такие резервуары из стали 12Х18Н10Т (рис. 1).

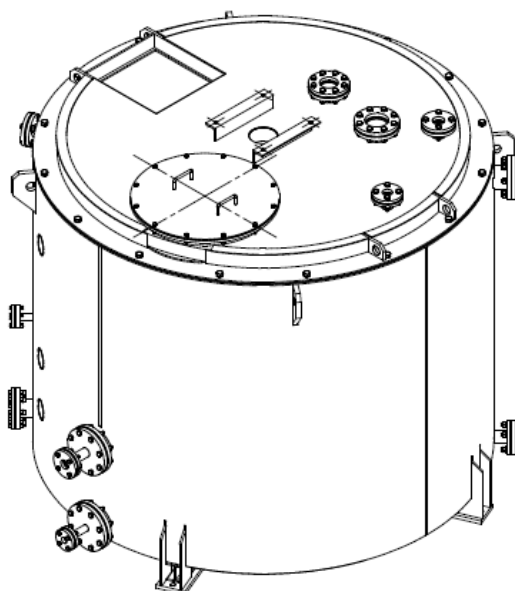


Рис. 1. Общий вид резервуара для химической промышленности

Резервуар представляет собой сварную конструкцию, состоящую из отдельных элементов. На изделии имеются стыковые соединения с толщиной металла 8 мм.

Технология сварки подобных резервуаров должна обеспечивать:

- высокую производительность и экономическую эффективность сварочного процесса с учётом объёмов изготовления;
- однородность металла сварных соединений с учётом конкретных условий и требуемых механических свойств (прочность, пластичность, твёрдость, ударная вязкость, хладостойкость);
- минимальный уровень деформаций свариваемых элементов резервуара;
- герметичность резервуара.

Месячная программа выпуска резервуаров была достаточно большой и составляла 320 шт. В связи с этим при разработке технологического процесса сварки было принято решение об использовании автоматизированного способа, а именно автоматической сварки под флюсом. При этом необходимо было обеспечить максимальную производительность процесса, но без потери

качества. Данный способ позволил осуществить сварку соединения в один проход, что обеспечило максимальную производительность процесса без потери качества.

Таким образом, цель данной работы заключалась в исследовании зависимости качества сварных соединений от величины погонной энергии и поиске оптимальных параметров режима сварки. Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) определить диапазон допустимых режимов сварки для данного способа;
- 2) обосновать использование погонной энергии как критерия, связывающего режимы сварки с производительностью процесса и качеством сварного соединения;
- 3) провести испытания образцов, изготовленных из материала изделия, при различных значениях параметров режима сварки для подтверждения качества сварного соединения;
- 4) на основании исследований определить оптимальные параметры режима сварки, обеспечивающие необходимое качество сварного соединения.

Расчёт режимов автоматической сварки под флюсом был произведён по методике, описанной в [1]. В результате был определён следующий диапазон параметров режима сварки:

- Диаметр электрода  $d_э = 3$  мм;
- Сила сварочного тока  $I_{св} = 280 \dots 400$  А;
- Напряжение на дуге  $U_д = 35$  В;

- Скорость сварки  $v_{св} = 28 \dots 32$  м/ч;
- Скорость подачи проволоки  $v_{п.п} = 53 \dots 60$  м/ч.

Для сварки использовалась проволока Св-06Х19Н9 (ГОСТ 2246-70). В качестве флюса применяли пассивный плавный флюс АН-20С. Его химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав флюса АН-20С, % [1]

SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P
19-24	3-9	9-13	27-32	25-33	2-3	0,5	0,8	0,06	0,03

Коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т обладает хорошей свариваемостью при наличии качественной защиты сварного соединения. Она не склонна к образованию холодных и горячих трещин и не требует дополнительных технологических приёмов (предварительный или сопутствующий подогрев, термообработка после сварки и т.д.). Поэтому оптимальным критерием качества сварного соединения было решено взять его прочность. Для этого образцы, сваренные на исследуемых режимах, испытывали на разрывной машине Р-20. Образцы были той же толщины и материала, что и в изделии. В качестве критерия, связывающего режимы сварки с качеством сварного соединения, была взята погонная энергия сварки, которая представляет собой количество тепла, выделяемое сварочной дугой на один

сантиметр длины однопроходного сварного шва. Погонная энергия определяется по следующей формуле [1]:

$$q_{пог} = \frac{I_{св} U_{д} \eta}{v_{св}}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – КПД процесса (для автоматической сварки под флюсом  $\eta = 0,9 \dots 0,95$  [1, 2]).

Как видно из формулы, скорость сварки является основной составляющей погонной энергии, поэтому она и будет определять производительность процесса и качество сварного шва. Для исследований из ранее определённого диапазона было выбрано семь значений погонной энергии, которые приведены в табл. 2 (для скорости сварки указаны значения, показывающие технологически обусловленные показатели, и значения, необходимые для расчёта погонной энергии):

Таблица 2

## Экспериментальные значения погонной энергии

$I_{св}$ , А	280	300	320	340	360	380	400
$U_{д}$ , В	35	35	35	35	35	35	35
$v_{св}$ , М/ч	28	28,5	29	29,5	30	30,5	31
$v_{св}$ , М/с (для расчёта $q_{пог}$ )	0,0078	0,0079	0,008	0,0082	0,0083	0,0084	0,0086
$v_{тп}$ , М/ч	53	54	55	56	57	58	59
$q_{пог}$ , кДж/м	1193	1262	1330	1379	1442	1504	1547

На указанных режимах были сварены образцы и проведены их испытания на прочность. Испытанные образцы представлены на рис. 2.



Рис. 2. Сварные образцы после испытания на разрывной машине

Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Таблица 3

## Влияние погонной энергии на прочность сварного соединения

$q_{пог}$ , кДж/м	1193	1262	1330	1379	1442	1504	1547
$\sigma_{св}$ , МПа	520	540	565	760	765	710	680

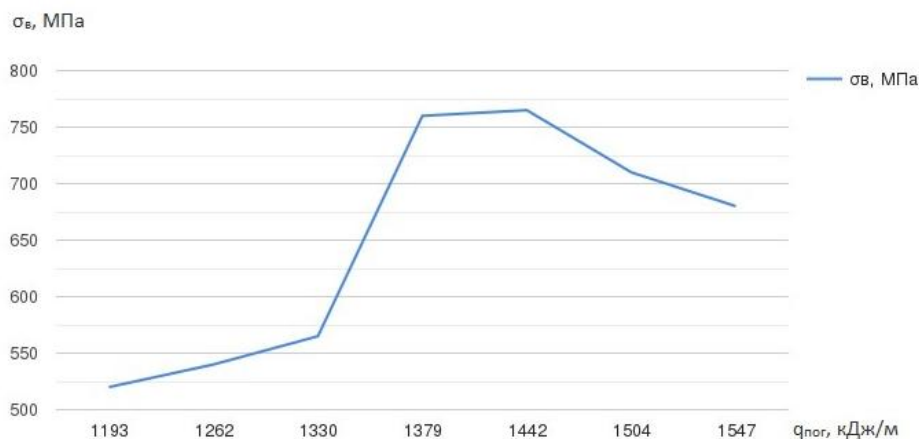


Рис. 3. График зависимости предела прочности сварного соединения  $\sigma_v$  от погонной энергии  $q_{пог}$

Анализ полученных результатов показал, что при первых трёх значениях погонной энергии есть непровар, что и обуславливает сравнительно небольшие значения прочности сварного соединения. Непровар, вероятно, вызван теплоотводом в свариваемое изделие и в расплавление флюса. Примечательно, что при увеличении погонной энергии наблюдается падение прочности сварного соединения. Для выявления причин такого явления были проведены металлографические исследования образцов.

На образцах, сваренных на минимальных и оптимальных режимах погонной энергии, была выявлена мелкозернистая структура аустенита с

отдельными неметаллическими включениями, возможно, шлаковыми (рис. 4). С дальнейшим увеличением погонной энергии имеется тенденция к увеличению роста зерна (рис. 5), а это отрицательно сказывается на механических свойствах [3, 4], что и подтвердили испытания прочности образцов (см. рис. 3). При дальнейшем увеличении погонной энергии вместе с увеличением размера зерна появляются участки с межкристаллитной коррозией (рис. 6). В результате было установлено, что с увеличением погонной энергии увеличивается размер зерна в металле сварного шва и возникают участки с межкристаллитной коррозией.

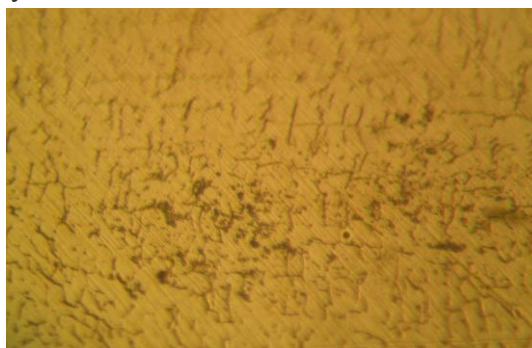


Рис. 4. Структура металла сварного шва, сваренного на оптимальном значении погонной энергии 1442 кДж/м (видны неметаллические (вероятно, шлаковые) включения, балл зерна 7 – 8), x100

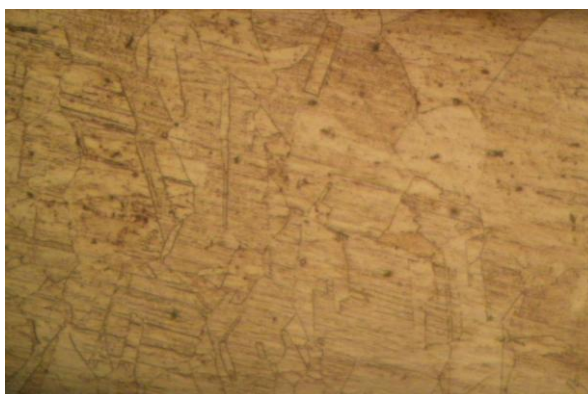


Рис. 5. Структура металла сварного шва при повышении значения погонной энергии до 1504 кДж/м (балл зерна 3–4),  $\times 100$



Рис. 6. Участок металла сварного шва, сваренного на повышенном значении погонной энергии 1547 кДж/м (балл зерна 2–3, видна развитая межкристаллитная коррозия),  $\times 100$

Вероятно, что межкристаллитная коррозия образовалась из-за длительного пребывания металла выше критической точки  $A_3$  и образования оксидов хрома по границам зёрен в тыльной части закристаллизовавшейся ванны. Образование оксидов хрома произошло под влиянием отслаивания шлаковой корки в тыльной части ванны и попадания под неё атмосферного воздуха, что и приводит к образованию межкристаллитной коррозии. Увеличение погонной энергии и, соответственно, производительности процесса сварки возможно в случае принудительного охлаждения сварного

соединения [2]. Однако введение в технологический процесс такого приёма потребует дополнительных затрат, что нецелесообразно.

Таким образом, в ходе проведённых исследований были получены следующие выводы:

1. Оправдано использование погонной энергии как критерия прогнозирования качества сварного соединения.

2. Проведённый комплекс исследований позволил определить оптимальные режимы сварки для конкретного изделия:  $d_3 = 3$  мм,  $I_{св} = 360$  А,  $U_0 = 35$  В,  $v_{св} = 30$  м/ч,  $v_{n.n} = 57$  м/ч.

3. Подобная методика поиска оптимальных режимов сварки может быть использована при проектировании

технологического процесса изготовления изделий из подобных материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х томах. Т. 2. / К.В. Васильев, В.И. Вилль, В.Н. Волченко [и др.] / под редакцией Н.А. Ольшанского. – Москва : Машиностроение, 1978. – 501 с. – Текст : непосредственный.
2. **Масаков, В.В.** Сварка нержавеющей сталей : учебное пособие / В.В. Масаков, Н.И. Масакова, А.В. Мельзитдинова. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 184 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

**Должникова Алина Олеговна**

магистрант кафедры оборудования и процессов машиностроительных производств, Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
e-mail: [alya.dolzhnikova00@mail.ru](mailto:alya.dolzhnikova00@mail.ru)

**Неверов Виктор Валентинович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры оборудования и процессов машиностроительных производств, Липецкий государственный технический университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
e-mail: [svarka\\_lip@mail.ru](mailto:svarka_lip@mail.ru)

3. **Ефименко, Л.А.** Металловедение и термическая обработка сварных соединений : учебное пособие / Л.А. Ефименко, А.К. Прыгаев, О.Ю. Елагина. – Москва : Логос, 2007. – 456 с. – Текст : непосредственный.

4. **Неверов, В.В.** Прогнозирование работоспособности паровых котлов на основе результатов дефектоскопии сварных соединений / В.В. Неверов, П.Н. Клевцов, С.В. Лебедев. – Текст : непосредственный // Сварка и диагностика. – 2016. – № 5. – С. 50–54.

Information about the authors:

**Dolzhnikova Alina Olegovna**

Master's student of group of the Departments of Equipment and Processes of Machine-building Industries,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
e-mail: [alya.dolzhnikova00@mail.ru](mailto:alya.dolzhnikova00@mail.ru)

**Neverov Viktor Valentinovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the  
Department Equipment and Processes of  
Machine-building Industries,  
Lipetsk State Technical University.  
3988055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.  
e-mail: [svarka\\_lip@mail.ru](mailto:svarka_lip@mail.ru)

И.А. ПУГАЧЕВ, А.И. ВОЛОДИН, Р.Р. ГУЛЕВСКИЙ

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ПО ТЕХНОЛОГИИ BINDER JETTING

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматриваются некоторые специфические особенности конструирования и проектирования песчаных литейных форм, получаемых способом печати на 3D-принтерах по технологии Binder Jetting.

**Ключевые слова:** литейная форма, аддитивные технологии, 3D-печать, Binder Jetting.

I.A. PUGACHEV, A.I. VOLODIN, R.R. GULEVSKIY

## PECULIARITIES OF DESIGN OF CASTING MOLDS FOR BINDER JETTING 3D- PRINTING TECHNOLOGY

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses some specific peculiarities of designing and constructing sand casting molds obtained on the Binder Jetting 3D-printers

**Keywords:** casting mold, additive technologies, 3D-printing, Binder Jetting.

В настоящее время одной из самых бурно развивающихся технологий, широко применяемых в машиностроении, являются аддитивные технологии (АТ). В частности, в литейном производстве применяются следующие виды АТ: при изготовлении выжигаемых/выплавленных моделей – SLA, DLP, FDM; при изготовлении модельной и стержневой оснастки из пластика и металла – FDM, FGF, SLS, SLM, WAAM; при изготовлении песчаных форм без

применения модельно-стержневой оснастки – Binder Jetting (BJ) [1]. Для литейщиков особенно привлекательной является технология BJ, так как позволяет полностью отказаться от длительного и дорогостоящего этапа проектирования и изготовления модельных комплектов и стержневых ящиков. Сущность технологии заключается в непосредственной печати песчаных форм на специальном 3D-принтере (рис. 1) [2].



Рис. 1. 3D-принтер для печати песчаных форм по технологии BJ

Схема устройства печатающего узла ВJ-принтера представлена на рис. 2.

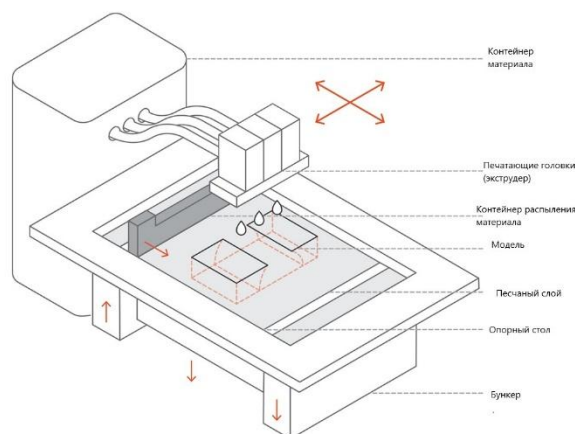


Рис. 2. Схема устройства печатающего узла ВJ-принтера

Технология ВJ представляет собой процесс послойного нанесения связующего вещества на тонкий слой сыпучего материала – песка. Печатающая микро-капельная головка принтера наносит связующее на соответствующие участки слоя песка. После цикла отверждения рабочий стол принтера опускается на высоту 0,2–0,5 мм, затем наносится следующий слой сыпучего материала, и цикл нанесения связующего печатающей головкой принтера повторяется. В качестве сыпучего материала, как правило, применяется формовочный кварцевый песок определенной фракции. Реже используют цирконовый или хромитовый пески,

керамические порошки т.п. А в качестве связующего применяются фурановые и фенольные смолы, а также модифицированное жидкое стекло. Перед началом процесса печати песок тщательно смешивают с катализатором отверждения. В случае применения фурановой смолы катализатором отверждения обычно служат органические кислоты.

Таким образом, технология формовки Binder Jetting позволяет быстро и с высокой точностью получать песчаные формы без применения модельно-стержневой оснастки. На рис. 3 приведен пример изготовления песчаных форм и стержней, полученных по ВJ-технологии 3D-печати [3].

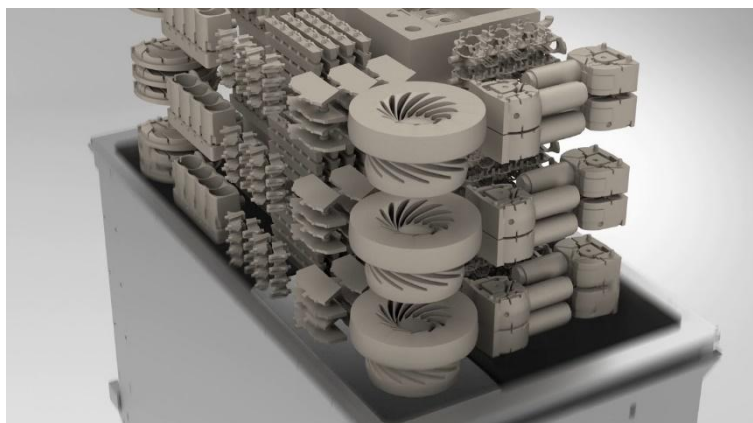


Рис. 3. Пример песчаных форм и стержней, полученных по ВJ-технологии 3D-печати

Основной особенностью технологии ВJ является то, что песок, на который не подается связующее вещество через печатную головку в процессе

печати, остается внутри и снаружи формы в рабочем бункере 3D-принтера. При этом при разработке литейной технологии нет необходимости предусматривать

формовочные уклоны. Возможно даже изготовление литейных форм для отливок, имеющих отрицательные уклоны, «карнизные нависания» и «поднутрения», так как неотвержденный песок в процессе печати играет роль «опорной среды» для таких элементов формы.

Проектирование литейных форм для 3D-печати по технологии VJ имеет еще ряд особенностей, которые также необходимо учитывать при проектировании таких форм.

Прежде всего необходимо предусматривать возможность удаления оставшегося неотвержденного песка из внутренних полостей литейной формы.

Достигается это тем, что такие формы проектируют составными, собираемыми из отдельных частей (сборочных единиц). Каждая сборочная единица печатается как отдельный элемент литейной формы. После окончания процесса печати неотвержденный песок удаляется из рабочего бункера 3D-принтера, а также из всех внутренних полостей и поднутрений отпечатанных сборочных единиц. В дальнейшем сборочные единицы подлежат сборке в литейную форму и жесткой фиксации перед заливкой. Пример такой сборной литейной формы представлен на рис. 4.

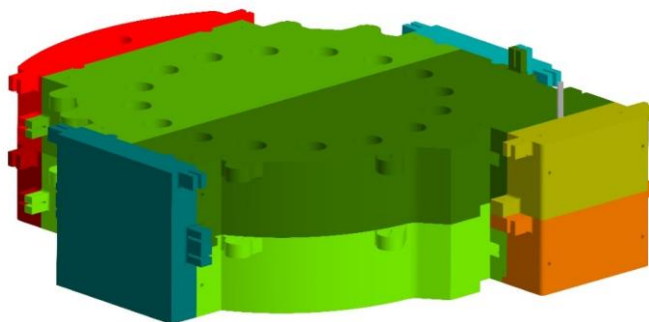


Рис. 4. Сборная литейная форма для VJ-печати

Для облегчения процесса сборки в конструкции каждой сборочной единицы составной литейной формы предусматривают центрирующие и направляющие конструктивные элементы. А для транспортировки при сборке каждая сборочная единица снабжается либо специальными выемками-захватами для ручной сборки элементов небольшого веса, либо специальными цапфами и

буртиками для захвата грузоподъемным механизмом при механизированной сборке. При этом эти конструктивные элементы проектируют и изготавливают при 3D-печати как неотъемлемые части каждой сборочной единицы. Для большей наглядности на рис. 5 представлена та же сборная литейная форма (см. рис. 4) в режиме «разнесения компонентов».

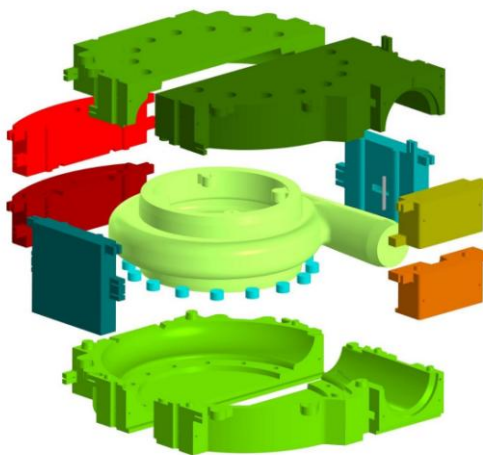


Рис. 5. Сборная литейная форма для VJ-печати в режиме «разнесения компонентов»

На рис. 5 нетрудно разглядеть как центрирующие и направляющие элементы, так и конструктивные элементы для захвата грузоподъемными механизмами каждой сборочной единица литейной ВJ-формы.

Еще одной немаловажной особенностью при проектировании литейных форм для 3D-печати по технологии Binder Jetting является возможность конструирования и изготовления сборочных единиц ВJ-формы ячеистыми, структурированными, например сотовыми структурами. Геометрия ячеистых структур может варьироваться в широких пределах. Каждая из этих структур представляет

массив из полых ячеек, образуемых относительно тонкими стенками. Ячеистые структуры обеспечивают высокую прочность и жесткость конструкционного материала при минимальной плотности изделий из него [4]. Применительно к изготовлению литейных форм по технологии ВJ применение сотовых структур позволяет значительно экономить песок, а главное, дорогостоящее связующее. Как правило, сотовые структуры таких форм проектируют со свободным выходом на внешние поверхности. На рис. 6 изображена сборная ВJ-форма, структурированная такими «сотами».

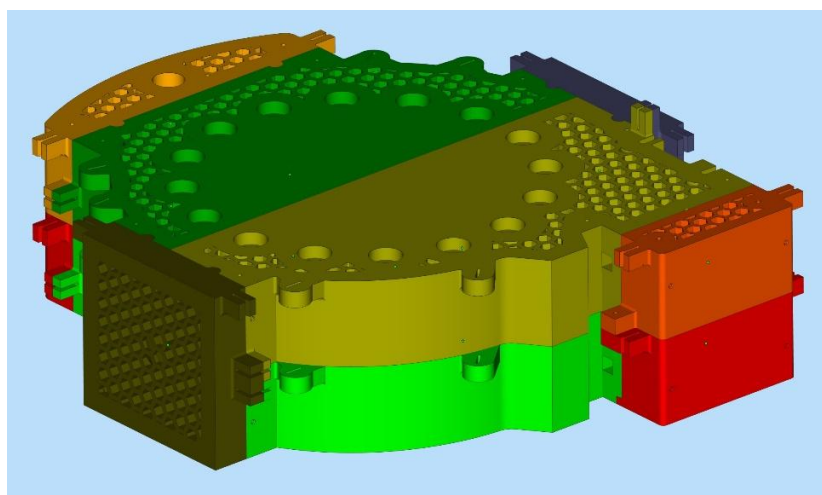


Рис. 6. Сборная ВJ-форма, структурированная «сотами»

Эти «соты» для придания дополнительной прочности и жесткости литейной форме перед заливкой обычно заполняют «опорным составом», например отработанной формовочной смесью.

Однако ячеистые структуры сборных элементов ВJ-форм могут быть не только «внешними», но и «внутренними», армирующими. Пример такой структуры представлен на рис. 7. Для наглядности форма представлена «в разрезе».

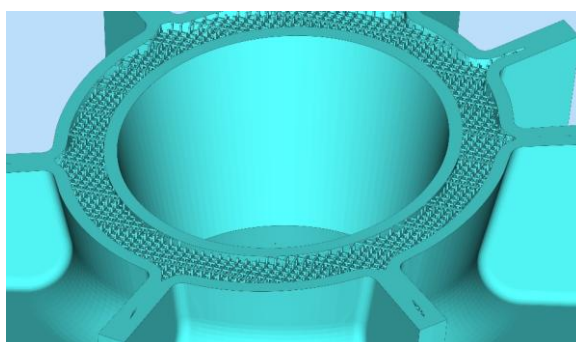


Рис. 7. Армирующие ячеистые структуры

Для создания ячеистых структур технолог, разрабатывающий и проектирующий литейные формы для 3D-печати по технологии Binder Jetting, должен уметь работать в средах нескольких специализированных

программных пакетов и обладать компетенциями в области 3D-моделирования. Специалисты кафедры ОПМП ЛГТУ обладают такими компетенциями.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зленко, М.А.** Аддитивные технологии в машиностроении : учебное пособие / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – Санкт-Петербург : Изд-во политехнического университета, 2013. – 221 с. – Текст : непосредственный.

2. ООО НПО «3D-Интеграция»: 3D-принтеры FHZL : [сайт]. – URL: <http://www.i3d.ru/fhzl> (дата обращения 15.08.2023). – Текст : электронный.

3. ООО «Роботех»: Промышленные 3D принтеры для литейных форм : [сайт] – URL: <http://www.robotech.digital> (дата обращения 15.08.2023). – Текст : электронный.

4. **Иванов, А.А.** Новое поколение сотовых наполнителей для авиационно-космической техники /А.А. Иванов, С.М. Кашин, В.И. Семенов. – Москва : Энергоатомиздат, 2000. – 436 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

**Пугачев Игорь Александрович**

доцент кафедры оборудования и процессов  
машиностроительных производств,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

**Володин Александр Игоревич**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры оборудования  
и процессов машиностроительных  
производств,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

**Гулевский Родион Ренатович**

магистр кафедры оборудования  
и процессов машиностроительных  
производств,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

**Pugachev Igor Alexandrovich,**

Assistant Professor  
Department Equipment and Processes of  
Machine-Building Industries,  
Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya str., 30.

**Volodin Alexander Igorevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department  
Equipment and Processes of Machine-  
Building Industry,  
Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya str., 30.

**Gulevskiy Rodion Renatovich**

Master of the Department  
Equipment and Processes of Machine-  
Building Industry,  
Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya str., 30.

## 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, 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, в две колонки. 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. Перечень литературных источников должен содержать не менее 15 наименований.

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

7. К статье прилагаются: аннотации ( 200–250 слов); ключевые слова (не менее трех); имена и фамилии авторов, ученые звания, должности и адрес места работы, электронный адрес; на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов.

## ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ

DOI (присваивается редакцией)  
УДК 656.078:338.2

Ю.Н. РИЗАЕВА, В.А. ЛОГИНОВ

### ПЛАНИРОВАНИЕ ПОСТАВОК ПРОДУКЦИИ ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ВО ВРЕМЕНИ СПРОСЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматриваются подходы к планированию поставок продукции. Предложен алгоритм сокращения потерь у потребителя и производителя при изменяющемся во времени спросе потребителя. Акцент сделан на современные требования в развитии отрасли за счет совершенствования планирования деятельности предприятий по показателям, которые являются функцией от спроса. Применение нового подхода к планированию поставок продукции заключается в учете изменяющегося во времени спросе потребителя. Математическое моделирование выполняется применительно к реальным эксплуатационным условиям. Планирование реализуется за счет разработанной математической модели и методики, направленных на сокращение общесистемных потерь. Применение разработанного подхода в практике работы предприятий позволит формировать общесистемные потери и использовать новое программное обеспечение для разработки и принятия управленческих решений.

**Ключевые слова:** поставка продукции, спрос, потери потребителя, потери производителя, планирование поставок продукции.

Yu.N. RIZAEVA, V.A. LOGINOV

### SUPPLY PLANNING AT TIME-VARYING CONSUMER DEMAND

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses approaches to product supply planning. An algorithm is proposed for reducing consumer and producer losses at time-varying consumer demand. Modern requirements are emphasized in the industry development by improving production planning according to indicators that are a function of demand. The new approach to supply planning is manifested in taking into account the time-varying consumer demand. Mathematical modeling is performed with respect to real operating conditions. Planning is implemented through the developed mathematical model and methodology aimed at reducing system-wide losses. The practical application of the developed approach will form system-wide losses and use new software to develop and make managerial decisions.

**Keywords:** product supply, demand, consumer losses, producer losses, product supply planning.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим процесс производства и поставки продукции в дискретные моменты времени  $t=0,1, \dots, T$ ,

где  $T$  – период планирования [1, 2].

Спрос потребителя на продукцию в эти моменты времени задан и определяется функцией  $q(t)$ . Обозначим неизвестный размер поставки в момент времени как  $x(t)$ . При несовпадении поставки  $x(t)$  и спроса  $q(t)$  возникают общесистемные потери. При дефиците, то есть когда

$$d(t) = x(t) - q(t) < 0,$$

общесистемные потери обуславливаются неудовлетворенностью спроса [3–5]. При превышении поставки над спросом, когда  $d(t) > 0$ , потери вызваны дополнительными затратами на хранение избытка продукции.

Так как потери от превышения объема поставки продукции над спросом  $d(t) > 0$  меньше, чем потери от дефицита  $d(t) < 0$ , то при одинаковом значении разности (в абсолютном значении)  $d$ , график функции потерь  $f_1(d)$  будет иметь вид, как на рис. 1 (потери прямо пропорциональны разности  $d$ ).

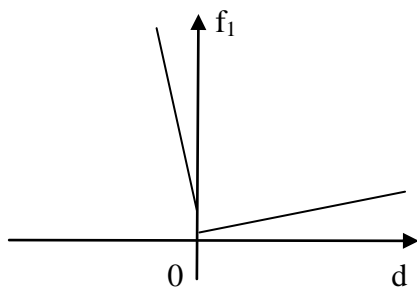


Рис. 1. График функции потерь потребителя

Функциональную зависимость, представленную на рис. 1, аппроксимируем:

$$f_1(d) = \begin{cases} a_1 d, & \text{если } d \geq 0 \\ b_1 d, & \text{если } d \leq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  – удельные потери потребителя на единицу продукции. При этом  $b_1 > a_1 > 0$ .

Для поставщика продукции желательна постоянная интенсивность производства, то есть  $x(t) = \text{const}$ , когда

$$u(t) = x(t+1) - x(t) = 0.$$

В случае  $u(t) > 0$  или  $u(t) < 0$  производитель несет потери из-за перестройки производства. Функция потерь производителя имеет вид, показанный на рис. 2.

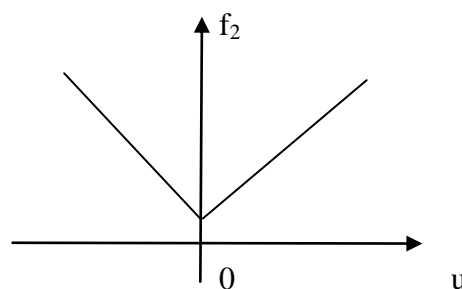


Рис. 2. График функции потерь производителя

В аналитическом виде аппроксимируем эту функцию в виде

$$f_2(u) = \begin{cases} a_2 u, & \text{если } u \geq 0 \\ b_2 u, & \text{если } u \leq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где  $a_2$  и  $b_2$  – удельные потери производителя на единицу продукции. Величины коэффициентов зависят от конкретных условий производства. Ясно только, что  $a_2 > 0$ ,  $b_2 > 0$  [6, 7].

Сформулируем задачу планирования поставки продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя: найти функцию поставки продукции  $x(t)$ ,  $t=1,2, \dots, T$ , и динамику изменения этого объема поставки

$$u(t) = x(t+1) - x(t), \quad t=1,2, \dots, T-1,$$

чтобы минимизировать суммарные потери потребителя в течение планового периода  $T$ .

## ВЫВОДЫ

Исходя из проведенного исследования, можно сделать вывод о возможности применения данного алгоритма в планировании поставок продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя, при этом общесистемные потери сокращаются. Результаты исследования предназначены для практики работы предприятий на этапе определения показателя общесистемных потерь.

Сведения об авторах:

### **Ризаева Юлия Николаевна**

доктор технических наук, заведующий кафедрой управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

rizaeva.u.n@yandex.ru

### **Логинов Владимир Анатольевич**

кандидат экономических наук, доцент кафедры управления автотранспортом, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

v\_loginov@lipetsk.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Логинов, В.А.** Устойчивость развития транспортных систем / В.А. Логинов, А.К. Карташова. – Текст : непосредственный // Тенденции развития современной науки : сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. В 2-х частях. Часть 1. – Липецк : Изд-во ЛГТУ. – 2017. – С. 538–541.
2. **Быстров, Н.В.** Обзор современных мировых тенденций развития асфальтобетонов / Н.В. Быстров. – Текст : непосредственный // Дороги России. – 2020. – № 1 (115). – С.90.
3. Интеллектуальные методы управления транспортными системами (2-изд.) / А.С. Сысоев, С.А. Ляпин, А.В. Галкин [и др.] – Москва : Издательско-торговая корпорация Дашков и К, 2022. – 192 с. – Текст : непосредственный.

Information about the authors:

### **Rizaeva Yulia Nikolaevna**

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Vehicle Management

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

rizaeva.u.n@yandex.ru

### **Loginov Vladimir Anatolyevich**

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Vehicle Management,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

v\_loginov@lipetsk.ru

**ВЕСТНИК**

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

**№ 3 (52) 2023 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.*

Липецкий государственный технический университет.

Отдел полиграфических работ и услуг.

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

Телефон: (4742) 32-82-43.

Редакторы: Е.А. Федюшина, Г.В. Казьмина, М.Ю. Болгова,

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Подписано в печать 26.09.2023. Выход в свет 29.09.2023.

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

Усл. печ. л. 6,5. Тираж 500 экз.(1-й завод -70экз)

Заказ № 602. Цена свободная.

Отпечатано в отделе полиграфических работ и услуг  
Липецкого государственного технического университета.

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

Телефон: (4742) 32-82-43.