

# Вестник

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

16+

**№ 4(61)  
2025**

ISSN 3034-3275

# ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета  
(Вестник ЛГТУ)

№ 4 (61) 2025.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

---

Регистрационный номер средства массовой информации Эл № ФС77-87639.  
Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор) 25.06.2024 г.

ISSN 3034-3275

# ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета

(Вестник ЛГТУ)

№ 4 (61) 2025.

Научно-технический журнал

Регистрационный номер Эл № ФС77-87639 .

**Главный редактор**

д-р техн. наук, проф.

**Шмырин Анатолий Михайлович**

**Зам. главного редактора**

д-р техн. наук, доц.

**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. Адрес электронной почты редакции: [vm@stu.lipetsk.ru](mailto:vm@stu.lipetsk.ru)

ВЕСТНИК ЛИПЕЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА (ВЕСТНИК ЛГТУ)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ИНФОРМАТИКА,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ

COMPUTER SCIENCES, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL

СТР.

- 5 **Д.А. Подлесных, С.И. Шарапов,  
Г.С. Строковский**  
Практическая реализация  
обобщающей эмпирической  
модели атмосферных радиопомех
- D.A. Podlesnykh, S.I. Sharapov,  
G.S. Strokovsky**  
Implementation of the Osinin  
two-component atmospheric noise model

- 11 **Д.Р. Пчельников, В.Д. Коршиков,  
А.И. Шарапов**  
Разработка программного пакета  
для проектирования систем  
нетрадиционных источников  
энергии в тепличном хозяйстве
- D.R. Pchelnykov, V.D. Korshikov,  
A.I. Sharapov**  
Development of a software package for  
designing non-traditional energy systems  
in greenhouse farming

ТРАНСПОРТ И ЛОГИСТИКА

TRANSPORT AND LOGISTICS

- 18 **В.А. Логинов, С.А. Дмитриев, П.А.  
Сакс**  
К вопросу внедрения транспортной  
сети автобусных экспрессов в  
городе Липецке
- V.A. Loginov, S.A. Dmitriev, P.A. Sax**  
On the implementation of a bus express  
transport network in the city of Lipetsk

- 23 **А.В. Гринченко**  
Концептуальная модель  
межрегионального модуля  
интеллектуальной системы  
транспорта общего пользования
- A.V. Grinchenko**  
A conceptual model for the interregional  
module of the intelligent public transport  
system

- 30 **Д.А. Кадасев**  
Теоретическое обоснование расчета  
координированного управления  
светофорной сигнализацией в  
интеллектуальных транспортных  
системах
- D.A. Kadasev**  
Theoretical substantiation of calculating  
coordinated traffic light control in  
intelligent transport systems

МЕТАЛЛУРГИЯ

METALLURGY

- 38 **В.Н. Титов, И.В. Куприянова,  
Т.В. Кравченко**  
Аналитическая оценка  
эффективности различных методов  
совершенствования подготовки  
агломерационной шихты к  
спеканию
- V.N. Titov, I.V. Kupriyanova,  
T.V. Kravchenko**  
Analytical evaluation of the effectiveness  
of various methods of improving the  
agglomeration mix preparation for  
sintering

- |                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
| <b>45</b>             | <b>В.Г. Михайлов, А.В. Карпов</b><br>Получение искусственного<br>карбоната кальция из<br>сталеплавильных шлаков   | <b>V.G. Mikhailov, A.V. Karpov</b><br>Artificial calcium carbonate production<br>from steel slags  |
| <b>55</b>             | <b>А.А. Шипельников,<br/>А.Н. Роговский, С.А. Толмачев</b><br>Актуальные направления<br>совершенствования технологии<br>разливки стали на слябовых МНЛЗ | <b>A.A. Shipelnikov, A.N. Rogotovskiy,<br/>S.A. Tolmachev</b><br>Current directions for improving steel<br>casting technology in slab continuous<br>casting machines |
| <b>МАШИНОСТРОЕНИЕ</b> |   | <b>MACHINE-BUILDING</b>  |
| <b>63</b>             | <b>Д.А. Иванычев, Д.И. Балыкин,<br/>Д.В. Ездакова</b><br>Решение краевых задач теории<br>упругости с участием массовых сил                              | <b>D.A. Ivanychev, D.I. Balykin</b><br>Solution of elastic boundary value<br>problems via body forces  |
| <b>69</b>             | <b>А.В. Суханов</b><br>Проверка прочности элементов<br>конструкций при внецентренном<br>растяжении и сжатии   | <b>A.V. Sukhanov</b><br>Checking the structural element strength<br>under eccentric tension and compression  |
| <b>77</b>             | К сведению авторов  |  |
| <b>78</b>             | Пример оформления статьи для<br>публикации в журнале  |  |

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_5

УДК 621.391.822.3:551.594.6

Д.А. ПОДЛЕСНЫХ, С.И. ШАРАПОВ, Г.С. СТРОКОВСКИЙ

**ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБОБЩАЮЩЕЙ ЭМПИРИЧЕСКОЙ  
МОДЕЛИ АТМОСФЕРНЫХ РАДИОПОМЕХ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Настоящее исследование посвящено созданию и валидации обобщающей эмпирической модели (ОЭМ), предназначенной для анализа статистических параметров атмосферных радиопомех в частотном спектре от 3 кГц до 10 МГц. Подчеркивается, что простые модели обладают ограниченной применимостью и не способны с достаточной точностью аппроксимировать экспериментальные данные в широком динамическом диапазоне амплитуд, величина которого может достигать до 80 дБ.

Предложенная ОЭМ основана на разделении распределения вероятностей на две части, описывающие флуктуационную и импульсную составляющие помех, что позволяет значительно повысить точность аппроксимации. Модель имеет физическое обоснование, связывающее ее параметры с механизмами генерации поля грозowymi разрядами и распространения радиоволн. Приведен алгоритм расчета распределения вероятностей по предложенной модели, удобный для практической реализации, в том числе с использованием микропроцессорной техники. Модель может быть использована для проектирования помехозащищенных систем радиосвязи и обработки сигналов.

**Ключевые слова:** атмосферные радиопомехи, обобщающая эмпирическая модель, статистические характеристики, функция распределения вероятностей, грозовые разряды, электромагнитное поле Земли, обработка статистических данных, алгоритм расчета.

D.A. PODLESNYKH, S.I. SHARAPOV, G.S. STROKOVSKY

**IMPLEMENTATION OF THE OSININ TWO-COMPONENT ATMOSPHERIC  
NOISE MODEL**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** This paper discusses the development and justification of the Osinin two-component atmospheric noise model to describe the statistical characteristics of atmospheric radio noise in the frequency range from 3 kHz to 10 MHz. The inadequacy of simple models for approximating experimental data over a large dynamic range of amplitudes, reaching 80 dB, is demonstrated. The proposed Osinin model is based on splitting the probability distribution into two parts that describe the fluctuation and impulse components of noise, which significantly improves the approximation accuracy. The model has a physical basis linking its parameters to the mechanisms of field generation by lightning discharges and radio wave propagation. An algorithm for calculating the probability distribution according to the proposed model is presented, it being suitable for practical implementation including the use of microprocessor technology. The model

can be used to design interference-protected radio communication systems and signal processing.

**Keywords:** atmospheric radio noise, two-component model, statistical characteristics, probability distribution function, lightning discharges, Earth's electromagnetic field, statistical data processing, calculation algorithm.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность и эффективность работы систем радиосвязи, навигации и телеметрии в диапазонах низких и очень низких частот (3 кГц–10 МГц) в значительной степени определяются уровнем естественных атмосферных помех. Эти помехи, основным источником которых являются грозовые разряды, носят ярко выраженный случайный характер с экстремально большим динамическим диапазоном амплитуд (до 80 дБ). В рамках такого моделирования внешний радиошум, воздействующий на вход приемника, представляется в виде узкополосного квазигармонического процесса, параметрами которого служат огибающая и фаза. Условием применимости узкополосного приближения является значительное превышение центральной частоты приемника над шириной его полосы пропускания. К разрабатываемой модели предъявляются следующие критерии:

1. Способность описывать явления распространения радиоволн.

2. Физическая обоснованность, исходя из природы источников помех и их пространственно-временного распределения.

3. Наличие функциональной связи между амплитудными значениями помехи и физическими принципами их возникновения.

4. Верифицируемость на основе экспериментальных данных.

5. Оптимальная сложность, обеспечивающая возможность практического применения статистических характеристик для выделения целевого сигнала из аддитивной смеси с помехой.

Первоначально предложенные модели, такие как модель Лихтера [1], несмотря на их физическое обоснование, оказались неспособны адекватно описать экспериментальные данные во всем динамическом диапазоне. Модель, предложенная Лихтером и физически

обоснованная Махоткиным [2], описывалась следующим выражением:

$$P(E) = \frac{1}{1 + (E/E_{50})^q}, \quad (1)$$

где  $q$  – степенной параметр, выбираемый для согласования с экспериментом, а  $E_{50}$  – медиана распределения.

Ключевым ограничением ранних моделей была попытка аппроксимировать одной простой функцией сложное распределение, являющееся суперпозицией флуктуационной и импульсной составляющих.

Это приводило к значительным погрешностям при расчетах вероятностей ошибок в системах связи. Возникла естественная необходимость в создании более гибкой и точной модели, которая была бы:

1. Эффективна для инженерного анализа и практической реализации с использованием микропроцессорных систем.

2. Способна отдельно описывать флуктуационную (от множества дальних источников) и импульсную (от ближних источников) составляющие шума.

3. Физически обоснована и отражала природу генерации и распространения радиоволн от грозовых разрядов.

## ОБОБЩАЮЩАЯ ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ОЭМ) И ЕЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для преодоления указанного ограничения в работе [3], посвященной описанию ОЭМ, был применен метод разделения исследуемого распределения на две области: для низких и высоких уровней напряженности поля. ОЭМ описывается следующим выражением:

$$P(E) = \begin{cases} \left[ 1 + \left( \frac{E_0}{E_{50q1}} \right)^{q_1} \right]^{-1}, & 0 \leq E_0 \leq E'_0; \\ \left[ 1 + \left( \frac{E_0}{E_{50q2}} \right)^{q_2} \right]^{-1}, & E'_0 \leq E_0 \leq \infty, \end{cases} \quad (2)$$

где  $P(E) = P(E > E_0)$  представляет собой функцию распределения амплитуд узкополосного атмосферного шума;  $E$  – напряжение огибающей поля атмосферных радиопомех;  $E_0$  – заданный пороговый уровень;  $E'_0$ ,  $b$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  – подгоночные параметры, при этом  $q_2 > q_1$ .

При отображении в координатной системе  $y = \lg \frac{P(E > E_0)}{1 - P(E > E_0)}$ ;  $x = \lg \frac{E}{E_{\text{ср.кв}}}$  данное распределение принимает вид двух прямолинейных сегментов с угловыми коэффициентами  $q_1$  и  $q_2$ , соответствующих интервалам  $[0; E'_0)$  и  $[E'_0; \infty)$  (рис. 1). Величины  $E_{50q1}$  и  $E_{50q2}$  являются медианными уровнями поля на этих интервалах. Первый сегмент характеризует флуктуационную составляющую шума, а второй – импульсную.

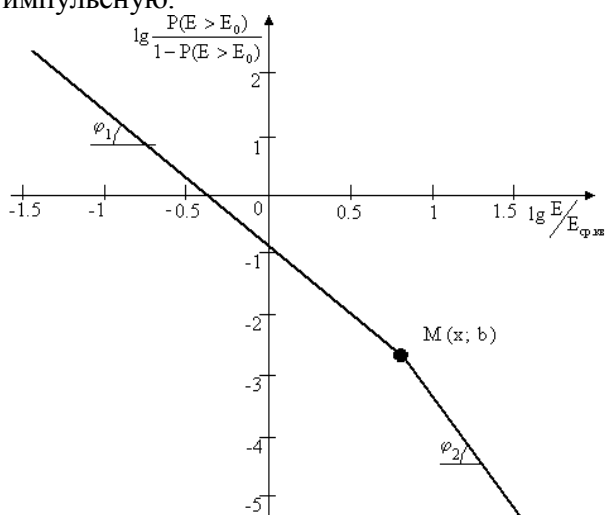


Рис. 1. Представление распределения вероятностей  $P(E > E_0)$  по уровням напряженности поля по данным отчета МККР № 322 [4] для импульсного параметра  $V_{\text{д.тр}} = 6$  дБ с помощью ОЭМ (2) с параметрами  $E'_0 / E_{\text{ср.кв}} = 7.993$ ,  $q_1 = 1.762$ ,  $q_2 = 4.354$

ОЭМ базируется на ряде стандартных допущений [2]:

1. Основным источником поля атмосферных помех считаются грозовые разряды.

2. Средняя плотность разрядов  $G$  (количество в единицу времени на единицу площади) предполагается независимой от расстояния  $R$  до приемной точки.

3. Зависимость напряженности поля  $E$  от расстояния  $R$  задается степенным законом  $(E / E_1 = (R / R_1)^{-k})$ , где  $E_1$  – напряженность на опорном расстоянии  $R_1$ , а показатель  $k$  связан с параметрами  $q_1$  и  $q_2$  [2].

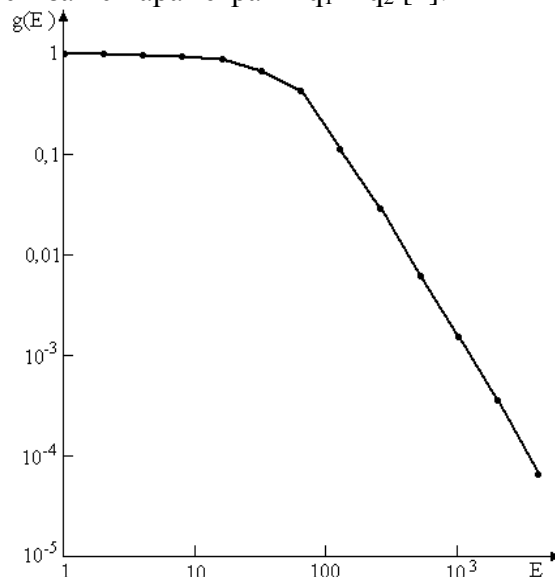


Рис. 2. Количество принятых импульсов в зависимости от уровня напряженности поля

4. Земля моделируется как бесконечная плоскость, поскольку учет ее сферичности вносит пренебрежимо малую погрешность.

5. Предполагается, что каждый грозовой источник генерирует радиоимпульсы, амплитуды которых на расстоянии  $R_1$  превышают порог  $E_0$  с вероятностью  $W(E_{01})$ , где  $E_{01} = E_0 / E_1$  – нормированная напряженность, а  $E_1$  – медианное значение поля на  $R_1$ . Гипотеза об однородности источников и существовании функции  $W(E_{01})$  подтверждается экспериментами, приведенными в [2, 5].

6. При формировании поля исключительно удаленными грозовыми разрядами формула (2) трансформируется в модель (1) с параметром  $q_2 \approx 2 \cdot q_1$ .

Вывод: ОЭМ основан на анализе пуассоновского потока событий. Если

импульсы фиксированной длительности  $\tau$  и амплитуды поступают на пороговый детектор, возможны два сценария:

1. Часть импульсов накладывается друг на друга, и импульс с вероятностью  $P(E)$  может попасть в уже занятый интервал, что приводит к потере количества импульсов, оцениваемой как  $P(E) \cdot g(E)$ .

2. Импульсы на высоких уровнях, как правило, регистрируются отдельно. Поэтому эта часть  $\frac{P(E)}{\tau}$  дает количество зафиксированных импульсов и определяет вероятность превышения уровнем  $E$  заданного порога за время наблюдения, отнесенное к  $\tau$ . Суммарное количество поступивших импульсов  $g(E)$  (рис. 2) равно сумме этих двух составляющих [5]:

$$\frac{P(E)}{\tau} + P(E) \cdot g(E) = g(E). \quad (3)$$

Учитывая, что  $g(E_0) = \frac{b}{(E_0)^{2/k}}$ , где

$$b = \pi R_1^2 \cdot G E_1^{2/k} \cdot \exp\left[2\left(\frac{\sigma}{k}\right)^2\right],$$

получаем классическое распределение вида:

$$P(E) = \left[1 + \frac{E^{2/k}}{\tau \cdot b}\right]^{-1} = \left[1 + \left(\frac{E}{E_{50}}\right)^{2/k}\right]^{-1},$$

где  $q = 2/k$ . Эта функция справедлива для смешанного поля от ближних и дальних источников. Если же поле создается только удаленными источниками, из общего пуассоновского потока необходимо исключить компоненту, соответствующую ближней зоне:

$$g(E) = \frac{C}{E^q} - \frac{A}{1 + B \cdot E^q} = \frac{C}{E^q \cdot (1 + B \cdot E^q)}, \quad (5) \text{ где } A = B \cdot C.$$

Это приводит к тому, что показатель  $q$  при малых  $E$  увеличивается до  $2q$  при больших значениях напряженности. Подстановка (5) в (3) дает:

$$P(E) = \left[1 + \frac{E^q \cdot (1 + B \cdot E^q)}{\tau \cdot C}\right]^{-1}, \text{ при } 0 \leq E, < \infty \quad (6)$$

Данное выражение распадается на две асимптоты: при малых  $E$  показатель затухания  $q_1 = q$ , а при больших –  $q_2 = 2q$ . Параметры точки излома могут варьироваться, в то время как значения  $q_1$  и  $q_2$ , определяющие затухание, остаются стабильными в течение суток.

На основе модели разработан алгоритм расчета распределения вероятностей, блок-схема которого представлена на рис. 3 [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщающая эмпирическая модель (ОЭМ) демонстрирует хорошее соответствие с экспериментальными данными в диапазоне частот 3 кГц – 10 МГц и в большом динамическом диапазоне [3]. Ключевым преимуществом ОЭМ является ее универсальность: модель адекватно описывает поле атмосферных помех как при наличии, так и при отсутствии близких грозных разрядов, что делает ее удобным инструментом для практического использования.

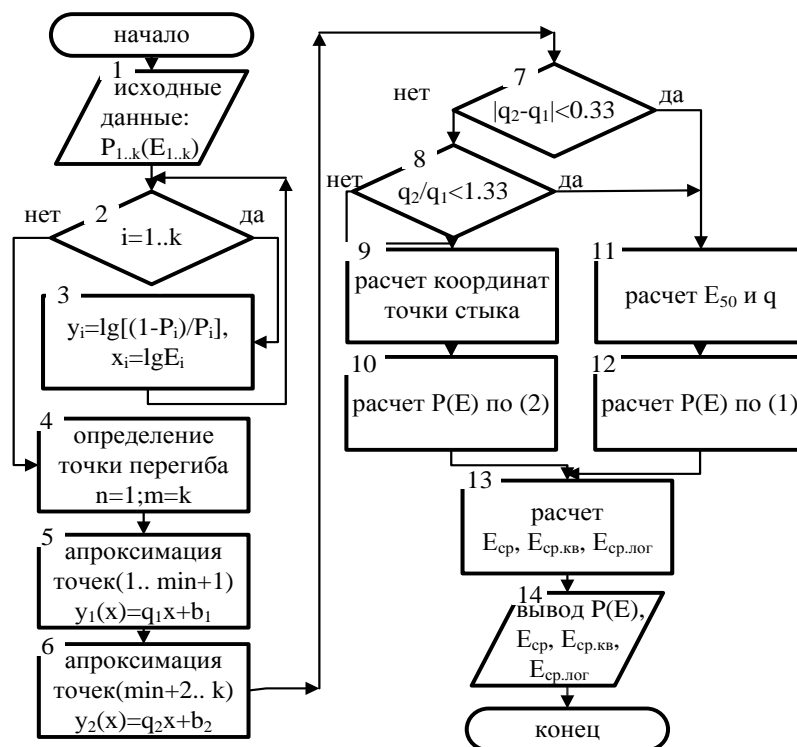


Рис. 3. Расчет распределения вероятностей  $P(E)$  по алгоритму на основе ОЭМ:

1. Ввод исходных данных: вероятностей  $P_i$  превышения пороговых уровней  $E_i$ .
- 2 и 3. Организация цикла преобразования распределения в заданную систему координат.
4. Автоматическое определение точки перегиба как точки сопряжения двух прямых с минимальной погрешностью реализовано в виде отдельной подпрограммы.
- 5 и 6. Аппроксимация распределения двумя прямыми с угловыми коэффициентами  $q_1$  и  $q_2$ .
- 7 и 8. Проверка адекватности двухсегментной аппроксимации по разности и соотношению коэффициентов  $q_1$  и  $q_2$ .
- 9 и 10. Расчет параметров и восстановление распределения вероятностей по ОЭМ (2).
- 11 и 12. Расчет параметров и восстановление распределения вероятностей по формуле Лихтера (1).
13. Расчет статистических характеристик: среднего, среднеквадратичного и среднего логарифмического значения напряженности.
14. Вывод результирующей функции распределения и рассчитанных статистических параметров поля АРП.

Разработанная модель и алгоритм для ее расчета (рис. 3) находят практическое применение при:

1. Проектировании помехозащищенных систем связи.
2. Прогнозировании качества радиосвязи в различных географических регионах и в разное время суток.

3. Проведении исследований в области распространения радиоволн.

Разработка и внедрение обобщающей эмпирической модели является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволяет существенно повысить эффективность и надежность работы широкого класса радиотехнических систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лихтер, Я.И.** О некоторых особенностях функции распределения напряженности поля атмосферных радиопомех / Я.И. Лихтер. – Текст: непосредственный // Труды НИЗМИР. – 1956. – Вып.13. – С. 63-76.

2. **Махоткин, Л.Г.** Статистика атмосферных радиопомех / Л.Г. Махоткин. – Текст: непосредственный // Геомагнетизм и аэрномия. – 1963. –Т. 3, № 2. – С. 284-293.

3. **Осинин, В.Ф.** Амплитудное распределение вероятностей атмосферных радиопомех / В.Ф. Осинин. – Текст: непосредственный // Геофизические явления верхней атмосферы и земной коры. (Труды СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. Вып. 47) – Магадан, 1973. – С. 45-59.

Сведения об авторах:

**Подлесных Дмитрий Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики и биомедицинской техники,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул.Московская, д.30.

[im99pda@mail.ru](mailto:im99pda@mail.ru)

**Шарапов Сергей Иванович**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и биомедицинской техники,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул.Московская, д.30.

[sharapov.serg48@yandex.ru](mailto:sharapov.serg48@yandex.ru)

**Строковский Григорий Семенович**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики и биомедицинской техники,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул.Московская, д.30.

[sgs-0567@yandex.ru](mailto:sgs-0567@yandex.ru)

4. World distribution and characteristics of atmospheric radio noise : 10th Plenary Assembly, Int. Telecommun. Union. Int. Rad. Consult. Comm. Report 322. – Geneva : International Telecommunication Union, 1964. – 62 p.

5. **Махоткин, Л.Г.** Статистические характеристики амплитуд атмосфериков / Л.Г. Махоткин. – Текст: непосредственный // Труды ГГО. – 1965. – Вып. 177. – С. 142-149.

6. **Подлесных, Д.А.** Грозовые радиоимпульсы. Методы контроля и прогнозирования : монография / Д.А. Подлесных, В.Ф. Осинин // Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing Gmb H., 2011. – 129 с. – Текст: непосредственный.

Information about the authors:

**Podlesnykh Dmitry Alekseevich,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Biomedical Engineering, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya St., 30.

[im99pda@mail.ru](mailto:im99pda@mail.ru)

**Sharapov Sergey Ivanovich,**

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Physics and Biomedical Engineering, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya St., 30.

[sharapov.serg48@yandex.ru](mailto:sharapov.serg48@yandex.ru)

**Strokovsky Grigory Semyonovich,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Biomedical Engineering, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya St., 30.

[sgs-0567@yandex.ru](mailto:sgs-0567@yandex.ru)

Д.Р. ПЧЕЛЬНИКОВ, В.Д. КОРШИКОВ, А.И. ШАРАПОВ

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛИЧНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности тепличных комплексов за счет внедрения систем солнечного теплоснабжения. Представлена структура и алгоритмическая база разрабатываемого программного пакета «СПЭС», в частности утилиты «СПЭС-Расчет», предназначенной для интерполяции климатических данных и определения энергетического потенциала солнечного излучения в произвольной точке местности.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, тепличное хозяйство, инсоляция, математическое моделирование, интерполяция, теплоснабжение, возобновляемые источники энергии.

D.R. PCHELNIKOV, V.D. KORSHIKOV, A.I. SHARAPOV

## DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR DESIGNING NON-TRADITIONAL ENERGY SYSTEMS IN GREENHOUSE FARMING

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses the issues of increasing the energy efficiency of greenhouse complexes through the introduction of solar heating systems. It presents the structure and algorithmic base of the developed "SPES" software package, in particular the "SPES-Calculation" utility, intended to interpolate climate data and determine the energy potential of solar radiation at an arbitrary point of the terrain.

**Keywords:** solar energy, greenhouse facility, insolation, mathematical modeling, interpolation, heat supply, renewable energy sources.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергоемкость тепличного производства в климатических условиях Российской Федерации остается критически важным фактором, влияющим на развитие отрасли и себестоимость конечного продукта. Традиционные системы отопления теплиц, базирующиеся на сжигании ископаемого топлива или использовании электрической энергии, в условиях постоянного роста тарифов, требуют поиска альтернативных решений, среди которых наиболее перспективным представляется применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и, в частности, преобразование солнечного излучения в тепловую энергию. Однако

внедрение гелиосистем в отечественную практику сопряжено с рядом теплотехнических и методологических трудностей, основной из которых является крайняя неравномерность поступления солнечного излучения в зависимости от географической широты, времени года и локальных климатических особенностей, что требует специальных прецизионных расчетов на этапе предпроектной подготовки. Существующие справочные данные, содержащие сведения о приходе суммарного (прямого и рассеянного) излучения на горизонтальные и наклонные поверхности, как правило, представлены в табличном виде с дискретностью по широте в 4–5 градусов, что вносит существенную погрешность при расчетах

для населенных пунктов, расположенных в промежуточных координатах, и затрудняет оценку целесообразности монтажа дорогостоящего оборудования.

В связи с этим актуальной задачей является разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего автоматизировать процесс обработки климатических баз данных и выполнять точную привязку параметров инсоляции к конкретным географическим координатам объекта тепличного хозяйства. Целью настоящей работы является описание расчетного ядра и функциональных возможностей разрабатываемого программного пакета «СПЭС» (Солнечная Поверхностная Энергетическая Система), ориентированного на инженерный анализ энергетического потенциала территорий.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ОБРАБОТКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Функциональный базис разрабатываемого программного комплекса формирует вычислительный модуль «СПЭС-Расчет», работа которого строится на глубокой математической обработке массивов многолетних актинометрических наблюдений, полученных из верифицированных источников, таких как базы данных NASA SSE и климатологические справочники (рис. 1). Специфика проектирования систем солнечного теплоснабжения для объектов защищенного грунта диктует необходимость оперировать не усредненными месячными показателями, а детальной почасовой динамикой интенсивности излучения, которая находится в нелинейной зависимости от высоты стояния Солнца над горизонтом, его азимута и прозрачности атмосферы. Существенная методологическая сложность, возникающая на этапе предпроектных изысканий, обусловлена дискретностью исходной информации:

базовые климатические массивы, как правило, табулированы с шагом по широте в 4–5 градусов (опорные узлы, например, на 44°, 48°, 52° с.ш.). Поскольку реальный объект агропромышленного комплекса может географически располагаться в промежутке между этими узлами, прямое использование справочных данных без их математической адаптации неизбежно приведет к значительным погрешностям в оценке теплового баланса.

Для решения задачи прецизионного определения значений инсоляции в произвольной точке местности, координаты которой не совпадают с табличными, в алгоритмическую структуру программного пакета был интегрирован блок математической интерполяции. В процессе разработки вычислительного ядра и верификации математической модели проводился сравнительный анализ различных методов аппроксимации. Было установлено, что попытка использования глобальной интерполяции полиномами высоких степеней (в частности, полинома Лагранжа по четырем и более точкам) для функции солнечной радиации оказывается неэффективной. Это связано с возникновением так называемого феномена Рунге – появлением неконтролируемых осцилляций на краях интервалов интерполяции. Применительно к данным инсоляции это выражалось в генерации физически некорректных результатов: появлении гигантских выбросов значений или отрицательных показателей радиации в утренние и вечерние часы, где функция претерпевает резкий скачок от нуля к положительным значениям. Исходя из требований обеспечения инженерной точности и сохранения физического смысла рассчитываемых величин, в качестве основного инструмента в ядре «СПЭС-Расчет» был утвержден алгоритм кусочно-линейной интерполяции.

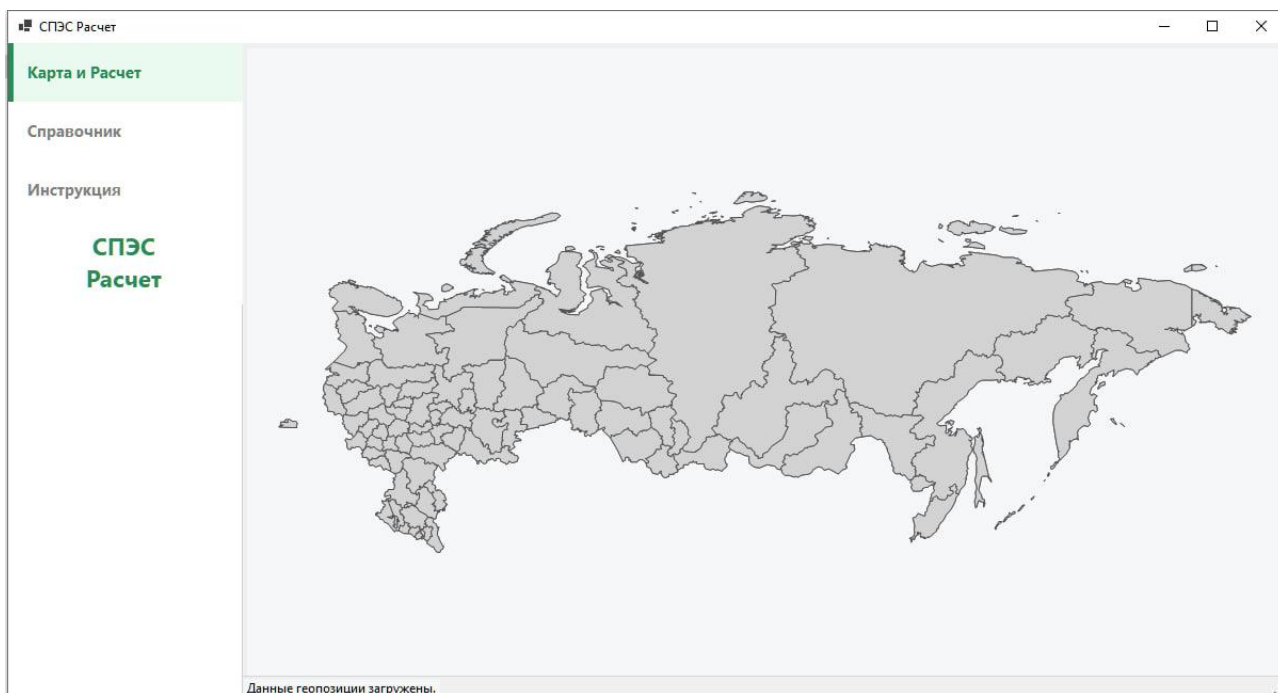


Рис. 1 Общий вид интерфейса программы СПЭС-Расчет

Данный метод обеспечивает нахождение искомой интенсивности излучения  $Y$  для заданной широты  $X$  опираясь исключительно на два ближайших граничных значения  $(X_1, Y_1)$  и  $(X_2, Y_2)$ , что позволяет сгладить скачкообразный характер изменения данных и минимизировать погрешность аппроксимации в пределах климатической зоны.

Программный модуль реализует процедуру декомпозиции исходных массивов, выполняя пошаговый расчет прихода суммарной солнечной радиации для каждого часа суток, при этом вычисления производятся одновременно для различных вариантов пространственной ориентации приемной поверхности (южная, юго-восточная, юго-западная и другие азимутальные отклонения). Такой подход является критически важным для обоснования оптимального угла наклона солнечных коллекторов при их размещении на скатных крышах тепличных комплексов, позволяя максимизировать выработку тепла в переходные периоды года [1]. Параллельно с энергетическими расчетами алгоритм производит вычисление геометрических

характеристик позиционирования небесного светила (высота  $h$  и азимут  $A_c$ ) в зависимости от локального времени и даты. Полученные геометрические параметры служат необходимыми входными данными для последующего математического моделирования взаимного затенения рядов коллекторов, что позволяет точно определить эффективную площадь поглощения в утренние и вечерние часы работы системы.

Важной особенностью архитектуры программного комплекса является глубокая интеграция с геоинформационным модулем, который существенно расширяет возможности позиционирования объекта по сравнению с традиционным текстовым поиском по базе данных населенных пунктов.

Реализованный подход позволяет пользователю осуществлять выбор исследуемой локации посредством интерактивного взаимодействия с масштабируемой картой Российской Федерации, что минимизирует вероятность ошибок при вводе географических координат и дает возможность визуально оценить климатическое зонирование территории.

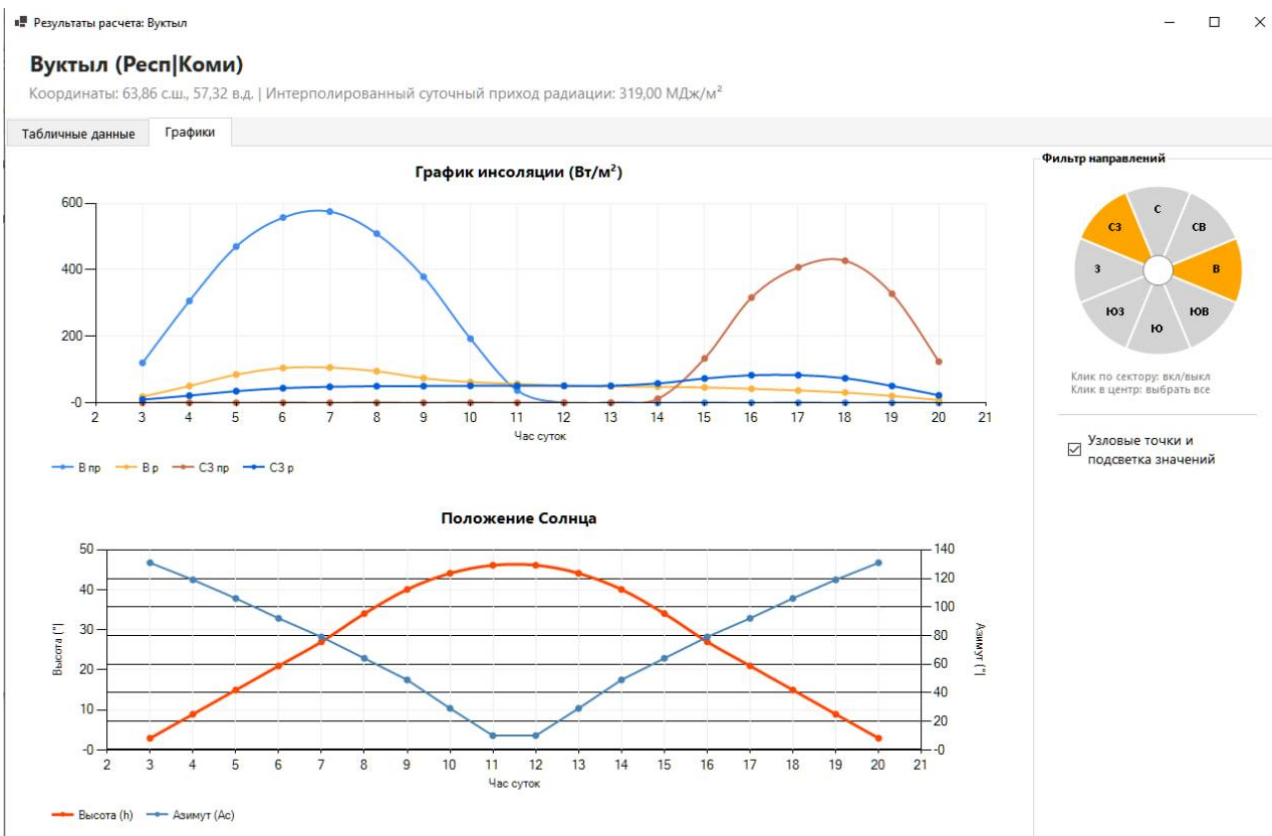


Рис. 2 Результаты расчета для населенного пункта

## ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

При разработке графического интерфейса и математического аппарата визуализации возникла необходимость решения нетривиальной задачи корректного отображения восточных территорий страны, географическая протяженность которых пересекает 180-й меридиан (в частности, Чукотский автономный округ и ряд островных территорий). В стандартных картографических проекциях, использующих геодезические координаты в диапазоне от -180 до +180 градусов, переход через линию перемены дат интерпретируется алгоритмами как скачкообразное изменение долготы, что неизбежно приводит к разрыву замкнутых полигонов границ регионов, появлению артефактов отрисовки и невозможности корректной идентификации принадлежности точки клика мыши конкретной области.

Для устранения данной топологической коллизии в вычислительном модуле

программы был разработан и применен специализированный алгоритм нормализации долготных координат. Суть метода заключается в математическом преобразовании отрицательных значений долготы западного полушария в непрерывную положительную шкалу восточного полушария, что позволяет создать единое координатное пространство для всей территории страны без разрывов и искажений. Это решение обеспечило не только визуальную целостность отображения карты, но и гарантировало корректную работу алгоритмов позиционирования курсора («Point-in-Polygon»), отвечающих за определение вхождения координат выбранной точки в сложный геометрический контур региона, состоящий из множества полигонов, включая анклав и острова. Таким образом, обеспечивается высокая точность привязки расчетной модели к актинометрическим данным конкретной местности, что является фундаментом для достоверности последующих теплотехнических вычислений.

Интерфейс программы предусматривает расширенную визуализацию результатов математического моделирования, представляя выходные данные как в табличном виде, удобном для экспорта и дальнейшей обработки, так и в форме наглядных графических зависимостей (рис. 2). Построение графиков суточного хода инсоляции позволяет инженеру-проектировщику оценить динамику поступления лучистой энергии во времени, определить пиковые значения интенсивности излучения и сопоставить полученную кривую с графиком тепловой нагрузки конкретной теплицы, обладающей определенной тепловой инерцией. Такой анализ необходим для выявления периодов дефицита или избытка тепловой энергии и оптимизации режимов работы дублирующих источников тепла. Для повышения эргономичности и удобства инженерного анализа в программную среду внедрен инструмент селективной фильтрации данных «Роза ветров». Данный функционал позволяет пользователю управлять отображением кривых инсоляции на графике, отключая избыточную информацию и оставляя только кривые, соответствующие выбранным азимутальным ориентациям приемных поверхностей (например, только южной или юго-восточной). Это дает возможность проводить сравнительный анализ эффективности различного позиционирования солнечных коллекторов и принимать обоснованные решения о пространственной конфигурации системы теплоснабжения еще на предпроектной стадии.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИНТЕГРАЦИИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемая утилита «СПЭС-Расчет» является первым звеном в цепи автоматизированного проектирования гелиосистем. Полученные с её помощью массивы интерполированных данных, характеризующих энергетический потенциал конкретной точки местности с учетом её географической широты и часового пояса, служат входными параметрами для следующего компонента пакета – модуля «СПЭС-Коллектор».

Планируемый к разработке модуль «СПЭС-Коллектор» будет использовать сформированные массивы данных для теплогидравлического расчета лучистого теплопереноса, определения КПД коллекторов в зависимости от температуры наружного воздуха и интенсивности излучения, а также для подбора площади поверхности теплообмена и емкости баков-аккумуляторов. Такой комплексный подход позволит перейти от оценочных расчетов к детальному технико-экономическому обоснованию внедрения ВИЭ в тепличном хозяйстве, учитывая не только сосредоточенные значения мощности, но и интегральные показатели выработки энергии за отопительный период, а также число дней с достаточной инсоляцией.

Таким образом, использование программного пакета «СПЭС» позволит повысить точность проектных решений при модернизации систем теплоснабжения теплиц, снизить риски, связанные с климатической неопределенностью, и обеспечить более эффективное использование энергетических ресурсов в агропромышленном комплексе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пчельников, Д.Р.** Перспективы использования некоторых видов солнечных коллекторов в тепличном хозяйстве / Д.Р. Пчельников, В.Д. Коршиков. – Текст: непосредственный // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината, Липецк, 6 декабря 2024 года. – Казань, 2024. – С. 300-306.

2. **Амерханов, Р.А.** Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства с применением возобновляемых источников энергии / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – Москва : Энергоатомиздат, 2018. – 234 с. Текст: непосредственный.

3. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2019. – 317 с. – Текст : непосредственный.

4. **Бутузов, В.А.** Анализ эффективности применения солнечных коллекторов в системах теплоснабжения юга России / В.А. Бутузов. – Текст: непосредственный // Промышленная энергетика. – 2021. – № 7. – С. 45-51.

5. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические

устройства. В 3 ч. Ч. 3 : Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин [и др.] ; под ред. Н.Н. Старовойта и Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1992. – 319 с. – Текст: непосредственный.

6. **Шарапов, А.И.** Энергосбережение в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / А.И. Шарапов, Е.Ю. Мякотина, А.В. Пешкова. – Текст: непосредственный // Проблемы современной науки : сборник научных трудов конференции Липецкого государственного технического университета, Липецк, 14-15 сентября 2016 года. – Липецк, 2016. – С. 296-298.

7. **Рябцева, Д.Г.** Система отопления и вентиляции птицеводческих предприятий / Д.Г. Рябцева, А.И. Шарапов. – Текст: непосредственный // Нано-биотехнологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции, Липецк, 27-28 февраля 2024 года. – Липецк, 2024. – С. 73-77.

8. **Якшина, А.Н.** Программное обеспечение для расчета процесса захлаживания криогенного трубопровода / А.Н. Якшина, Р.М. Некрасов, А.И. Шарапов. – Текст: непосредственный // Школа молодых ученых : материалы областного профильного семинара, Липецк, 15 ноября 2019 года / ред. коллегия: С.Е. Кузенков, А.В. Бутин, О.И. Огаджанян. – Липецк, 2019. – С. 200-203.

Сведения об авторах:

**Пчельников Данила Романович**

аспирант кафедры промышленной  
теплоэнергетики,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

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

**Коршиков Владимир Дмитриевич**

доктор технических наук, профессор,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

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

**Шарапов Алексей Иванович**

кандидат технических наук, доцент  
кафедры промышленной теплоэнергетики,  
Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

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

Information about the authors:

**Pchelnikov Danila Romanovich**

Postgraduate student of the Department,  
Industrial Heat and Power Engineering  
Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.

**Korshikov Vladimir Dmitrievich**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.

**Sharapov Alexey Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department,  
Industrial Heat and Power Engineering  
Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.:

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_18  
УДК 656.078:338.2

В.А. ЛОГИНОВ, С.А. ДМИТРИЕВ, П.А. САКС

**К ВОПРОСУ ВНЕДРЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ  
АВТОБУСНЫХ ЭКСПРЕССОВ В ГОРОДЕ ЛИПЕЦКЕ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматриваются подходы к оптимизации развития городского пассажирского транспорта. В целях увеличения комфортности городского пассажирского транспорта, а также увеличения его популярности среди населения, использующего в качестве средства передвижения личный автомобиль, предложено внедрить в систему городского пассажирского транспорта новый вид общественного транспорта – автобусные экспрессы. Транспортная сеть автобусных экспрессов – это система маршрутов, по которым автобусы перевозят пассажиров с минимальным количеством остановок или без них, чтобы сократить время в пути между двумя пунктами. Для создания такой сети не требуется масштабная модернизация инфраструктуры, достаточно выделить подвижной состав для маршрутов.

**Ключевые слова:** транспортная сеть, модель выбора пассажиром вида транспорта, маршрутная схема, сквозной маршрут.

V.A. LOGINOV, S.A. DMITRIEV, P.A. SAX

**ON THE IMPLEMENTATION OF A BUS EXPRESS  
TRANSPORT NETWORK IN THE CITY OF LIPETSK**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses approaches to optimizing the development of urban passenger transport. In order to improve the comfort of urban passenger transport and to increase its popularity among those using private cars as a means of transport, it is proposed to introduce a new type of public transport – bus expresses – into the urban passenger transport system. A bus express transport network is a system of routes along which buses carry passengers with minimal or no stops to reduce travel time between two points. Such a network can be created without large-scale infrastructure upgrades; it is enough to supply routes with buses.

**Keywords:** transport network, model for a passenger to choose a means of transport, route scheme, through route.

**ВВЕДЕНИЕ**

В результате «моментных» наблюдений за количеством пассажиров на остановках города в час «пик» была получена выборка объемом  $n=154$  наблюдений, в которой  $x_{\min}=3$  чел. и  $x_{\max}=180$  чел. При

разбивке выборки на разряды проводилось укрупнение разрядов для обеспечения статистической значимости.

В ходе расчетов оценены: математическое ожидание  $\mu=93$  чел., дисперсия  $D=1140$  чел., средне-

квадратическое отклонение  $\sigma = 34$  чел., коэффициент вариации  $\nu = 0,363$ .

## МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

В качестве модели выбирается нормальный закон распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{34\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-93)^2}{2 \times 34^2}}$$

Проверка адекватности модели проводится по критерию согласия Пирсона. Критическое значение критерия согласия Пирсона при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $\nu = 6 - 2 = 4$  составляет  $\chi_{табл}^2 = 11,070$ . Так как  $\chi_{табл}^2 > \chi_{набл}^2$ , то нет оснований для

отклонения модели.

Модель используется для определения количества пассажиров на остановках городского транспорта в час «пик» с приведением их к часовому количеству. Алгоритм получения псевдослучайных чисел по нормальному закону:

$$N : \alpha; \sigma \quad 10 \left( 93 + 34 \left( \sum_{i=1}^{12} RND - 6 \right) \right),$$

где  $RND_i$  –  $i$ -ое псевдослучайное число, равномерно распределенное в интервале  $(0;1)$ .

### ТЕОРИЯ/РАСЧЕТ

Гравитационным методом были определены координаты центров тяжести транспортных микрорайонов по прибытию и отправлению пассажиров и построена

модель транспортной сети, с помощью которой определена матрица кратчайших транспортных связей.

Доля пассажиропотока, которая воспользуется автобусными экспрессами, определяется по формуле:

$$P = e^{-\frac{\lambda^2 \sigma_y^2}{2}} - m_y \lambda - \left\{ \frac{m_x - m_y + \lambda (\sigma_y^2 - \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y)}{\sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2 - 2\rho_{xy} \sigma_x \sigma_y}} \right\}$$

где  $\lambda$  – параметр экспоненциального распределения, описывающего стоимостную оценку перехода пассажира на другую остановку;

$\sigma_y^2$  – дисперсия стоимостной оценки поездки на автобусе-экспрессе;

$\sigma_x^2$  – дисперсия стоимостной оценки поездки на автобусе (трамвае);

$m_x$  – математическое ожидание стоимостной оценки поездки на автобусе (трамвае);

$m_y$  – математическое ожидание стоимостной оценки поездки на автобусе-экспрессе;

$\rho_{xy}$  – коэффициент корреляции между стоимостными оценками поездок на автобусе (трамвае) и автобусе-экспрессе.

Рассмотрим упрощенную модель выбора пассажиром вида транспорта:

время поездки на автобусе  $x_1 = 40$  мин; время поездки на автобусе-экспрессе  $y_1 = 25$  мин; стоимость проезда на автобусе (трамвае)  $x_2 = 31$  руб.; стоимость проезда на автобусе-экспрессе  $y_2 = 50$  руб.

Стоимостная оценка 1 минуты пребывания в пути определяется экспоненциальным распределением с параметрами  $\mu_1 = 3$  руб. и  $\sigma_1 = 1,6$  руб.

Стоимостная оценка вероятности перехода пассажира на другую остановку определяется экспоненциальным распределением с параметром  $\lambda = 0,045$ .

Стоимость проезда воспринимается пассажирами однозначно, поэтому  $\mu_2 = 1,0$  и  $\sigma_2 = 0$ .

Тогда получаем:

$$m_x = x_1\mu_1 + x_2\mu_2 = 40 \times 3 + 31 \times 1,$$

$$m_x = 151 \text{ руб.},$$

$$m_y = y_1\mu_1 + y_2\mu_2 = 25 \times 3 + 50 \times 1,$$

$$m_y = 125 \text{ руб.},$$

$$\sigma_x^2 = x_1^2\sigma_1^2 + x_2^2\sigma_2^2 = 40^2 \times 1,6^2 + 31^2 \times 0 =,$$

$$= 4096,$$

$$\sigma_x = 64 \text{ руб.},$$

$$\sigma_y^2 = y_1^2\sigma_1^2 + y_2^2\sigma_2^2 = 25^2 \times 1,6^2 + 50^2 \times 0 =$$

$$= 1600,$$

$$P = e^{-\frac{0,045^2 \times 1600}{2} - 125 \times 0,045 - \left\{ \frac{151 - 125 + 0,045(1600 - 1 \times 64 \times 40)}{\sqrt{1600 + 4096 - 2 \times 1 \times 64 \times 40}} \right\}} = 0,142.$$

Автобусные экспрессы необходимо вводить на маршрутах с дальним расстоянием перегона, а также между различными районами города.

Основой базовой маршрутной сети общественного транспорта являются сквозные маршруты. Достаточное условие для назначения сквозного маршрута:

$$\frac{60k}{\rho} \cdot \frac{1}{P_{ij}} \leq t_{nep},$$

где  $k$  – коэффициент неравномерности подхода пассажиров к остановке, как правило,  $k = 0,5$ ;

$\rho$  – коэффициент внутрисетевой неравномерности пассажиропотока, принимается

$$\rho = 1,1;$$

$P_{ij}$  – пассажиропоток между транспортными микрорайонами в направлении наибольшего потока.

Максимальный интервал между отправлениями автомобилей  $I_{max} = 5$  мин, время на пересадку в промежуточных пунктах  $t_{nep} = 3$  мин.

Однако построенную на достаточном условии базовую маршрутную сеть нельзя считать оптимальной. Совершенствование маршрутной сети заключается в увеличении количества регулярных маршрутов и, соответственно, сокращении суммарных затрат времени населения на

$$\sigma_y = 40 \text{ руб.},$$

$$\rho_{xy} = \frac{x_1 y_1 \sigma_1^2 + x_2 y_2 \sigma_2^2}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{40 \times 25 \times 1,6^2 + 31 \times 50 \times 0}{64 \times 40} = 1,0$$

Тогда доля пассажиров, пользующихся автобусами-экспрессами составит

поездки с использованием транспорта общего пользования. В качестве добавляемых маршрутов могут использоваться только участковые маршруты. В конечном итоге маршрутная сеть представляет собой комбинацию сквозных маршрутов с последовательным добавлением участковых.

Проверка участковых маршрутов на соответствие заданному интервалу движения осуществляется по формуле:

$$I_{ij} = \frac{60q}{P_{ij}}, \text{ мин.},$$

где  $q$  – вместимость автобуса-экспресса.

Интервал движения автобусных экспрессов будет значительно больше, чем на простых автобусных или трамвайных маршрутах. Также с целью увеличения скорости движения автобусных экспрессов рекомендуется прокладывать их маршрут по наименее загруженным участкам дорог.

Кроме маршрутов, которые могут оказаться в исходном варианте, можно назначить дополнительные сквозные маршруты, пассажиропоток которых обеспечивает движение автобусов-экспрессов с заданным интервалом. Целесообразность назначения дополнительных сквозных маршрутов проверяется путем сопоставления экономии затрат времени на передвижение и увеличение затрат времени на ожидание.

Для выбора наилучшей комбинации назначенных маршрутов следует использовать метод направленного перебора. Для исходного варианта определяется время, затрачиваемое всеми пассажирами на следование и пересадки, используя метод поиска кратчайших (по времени) расстояний с учетом затрат времени на пересадки.

На маршрутах могут использоваться автобусы средней и большой вместимости.

Автобусные экспрессы будут являться транспортом с повышенной скоростью передвижения, так как у маршрутов автобусных экспрессов будет сокращенный, жестко регламентируемый список остановочных пунктов (например, автобусный экспресс следует от начального до конечного остановочного пункта без промежуточных остановок).

Скорость движения автобусных экспрессов может достигать 60 км/ч на отдельных участках маршрута, сохраняя при этом предъявляемые требования безопасности и комфорта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Количество посещаемых остановочных пунктов, маршруты движения, количество транспортных средств на маршруте и интервал движения требуют комплексного моделирования с учетом текущей ситуации на улично-дорожной сети города Липецка, а также пиковых утренних и вечерних заторов в городе, учета различных погодных условий и времени года. Однако стоит отметить, что с целью охвата достаточного количества пассажиров, рекомендуется учитывать наиболее популярные остановочные пункты при построении маршрутов автобусных экспрессов, а также опыт других городов в организации движения данного вида транспорта.

По результатам расчетов пассажиро-часов на передвижение и пересадки, времени ожидания на маршруте в основном направлении, общего времени ожидания всех пассажиров на всех маршрутах, определения максимального и минимального пассажиропотоков, может

быть создан исходный вариант маршрутной схемы для автобусов-экспрессов.

Время ожидания на маршруте в основном направлении определяется по формуле:  $T_{ож} = 60kq$ .

Маршрутная схема должна обеспечивать коэффициент использования вместимости не ниже  $k_b = 0,85$ .

Допуск к оказанию услуг пассажирских перевозок автобусными экспрессами следует отдавать лицензированным перевозчикам с наиболее квалифицированными сотрудниками и автотранспортным парком, удовлетворяющим всем требованиям автобусного экспресса.

Среди допущенных к оказанию услуг пассажирских перевозок автобусными экспрессами необходимо проводить конкурс, победителем которого будет являться предприятие, предложившее наилучшие условия для осуществления пассажирских перевозок, которому и будет отдана часть маршрута или весь маршрут автобусного экспресса (в зависимости от потребности транспортных средств, определенной путем моделирования транспортных потоков).

С целью улучшения обслуживания населения при формировании маршрутной сети целесообразно ориентироваться на следующие дополнительные показатели: удаленность остановочных пунктов, частоту движения транспорта общего пользования, количество пересадок при поездке пассажиров, безопасность, степень наполнения подвижного состава, стоимость проезда, удобство пользования транспортом.

## ВЫВОДЫ

Полученная схема – только основа для установления окончательной маршрутной сети. На основе анализа полученных результатов, учета других факторов можно провести корректировку схемы. Схему целесообразно пересматривать каждые 3-5 лет.

Новая схема должна внедряться постепенно, так как одновременное изменение многих маршрутов может создавать неудобства для пассажиров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Логинов, В.А.** Оптимизация развития автотранспортного предприятия / В.А. Логинов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 3 (56). – С. 13-18.
2. **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. – Липецк, 2017. – С. 538-541.
3. **Ризаева, Ю.Н.** Управление развитием грузового автотранспортного предприятия / Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов, С.Н. Сухатерина, А.Б. Сухатерин. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4-2 (83). – С. 123-128.
4. **Ризаева, Ю.Н.** Управление развитием грузового автотранспортного предприятия при гипотезе о непрерывном росте фонда оплаты труда работников / Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов, А.Е. Кузнецов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 1 (50). – С. 21-27.
5. **Ризаева, Ю.Н.** Управление развитием грузового автотранспортного предприятия при разных гипотезах о динамике фонда оплаты труда работников / Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов, А.Е. Кузнецов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 3 (49). – С. 57-62.
6. **Ризаева, Ю.Н.** Управление развитием грузового автотранспортного предприятия / Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов, А.С. Третьяков. – Текст: непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : материалы международной научно-практической конференции. – Липецк, 2022. – С. 160-162.
7. **Ризаева, Ю.Н.** Планирование поставок продукции при изменяющемся во времени спросе потребителя / Ю.Н. Ризаева, В.А. Логинов, А.Ю. Кузнецов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 3 (46). – С. 54-59.
8. **Логинов, В.А.** Модель влияния научно-технического прогресса на производственно-экономическую деятельность грузового автотранспортного предприятия / В.А. Логинов, В.А. Суворов, А.С. Ляхов. – Текст: непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : материалы I международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 1. – Липецк, 2018. – С. 105-108.
9. **Логинов, В.А.** Управление развитием грузового автотранспортного предприятия с учетом инвестиционного лага / В.А. Логинов, Н.М. Моисеева. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2 (88). – С. 119-123.
10. **Логинов, В.А.** Квазипроизводственная функция грузового автотранспортного предприятия с переменной технологической структурой перевозок / В.А. Логинов, В.А. Суворов, А.С. Ляхов. – Текст: непосредственный // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : материалы I международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 1. – Липецк, 2018. – С. 101-104.

Сведения об авторах:

**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

**Дмитриев Семен Анатольевич**

кандидат технических наук, и.о.  
заведующего кафедрой управления  
автотранспортом

Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

dmitriev\_sa@stu.lipetsk.ru

**Сакс Полина Андреевна**

студент кафедры управления  
автотранспортом

Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

sakspolina16@yandex.ru

Information about authors:

**Loginov Vladimir Anatolyevich**

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

Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.

v\_loginov@lipetsk.ru

**Dmitriev Semen Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences, Acting Head  
of the Department of Motor Vehicle  
Management

Lipetsk State Technical University.

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.

dmitriev\_sa@stu.lipetsk.ru

**Sax Polina Andreevna**

student of the Department of Vehicle  
Management

Lipetsk State Technical University

398055, Lipetsk, Moskovskaya st.,30.

sakspolina16@yandex.ru

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_23

УДК 656.025

А.В. ГРИНЧЕНКО

## **КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы интеллектуализации функционирования транспорта общего пользования. Предложена концептуальная модель межрегионального модуля интеллектуальной системы транспорта общего пользования, как одного из элементов единой федеральной интеллектуальной системы пассажирского транспорта, включающей также отдельные региональные и муниципальные модули. Акцент сделан на системном анализе отдельных элементов модели в их взаимосвязи в рамках единой системы. Рассмотрены ключевые функции модуля: сбор и анализ актуальной информации о спросе и предложении в межрегиональных пассажирских перевозках и состоянии межрегиональной транспортной сети; разработка оперативных и стратегических управленческих решений, направленных на повышение качества и эффективности

транспортного обслуживания населения и передача информации всем участникам транспортного процесса. Рассматриваемая модель предполагает интеграцию различных видов транспорта, обеспечивающих межрегиональные пассажирские перевозки. Предложенную модель возможно использовать как основу для объединения существующих разрозненных элементов интеллектуальных транспортных систем и создания единого информационного пространства функционирования различных видов пассажирского транспорта на межрегиональном уровне.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, транспорт общего пользования, межрегиональные пассажирские перевозки.

A.V. GRINCHENKO

## A CONCEPTUAL MODEL FOR THE INTERREGIONAL MODULE OF THE INTELLIGENT PUBLIC TRANSPORT SYSTEM

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses some aspects of intellectualizing the functioning of public transport. A conceptual model for the interregional module of the intelligent public transport system is proposed as an element of the unified federal intelligent passenger transport system, the latter also including separate regional and municipal modules. The emphasis is laid on the system analysis of individual elements of the model in their interrelation within a single system. The key functions of the module are considered: collecting and analyzing the up-to-date information on supply and demand in interregional passenger transportation and on the state of the interregional transport network; developing operational and strategic management decisions aimed at improving the quality and efficiency of public transport services and transmitting information to all participants in the transport process. The model under consideration involves the integration of various modes of transport providing inter-regional passenger transportation. The proposed model can be used as a basis for combining the existing separate elements of intelligent transport systems and creating a single information space for the functioning of various types of passenger transport at the interregional level.

**Keywords:** intelligent system, public transport, interregional passenger transportation.

### ВВЕДЕНИЕ

Современная транспортная система Российской Федерации сталкивается с комплексом вызовов, обусловленных значительной территориальной протяженностью страны, неравномерностью распределения экономического и человеческого потенциала, а также растущими требованиями к мобильности населения и эффективности логистики [1]. Особую остроту эти проблемы приобретают в межрегиональных пассажирских перевозках, где существует разрозненность и неэффективность информационных систем, нескоординированность расписаний различных видов транспорта и, как следствие, снижение общей доступности и

привлекательности транспорта общего пользования (ТОП).

Современное развитие цифровых технологий и интеграция их в транспортную отрасль открывает новые возможности для совершенствования функционирования ТОП. Разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем становится ключевым фактором повышения эффективности, безопасности и устойчивости всего транспортного комплекса. Однако существующие разработки в большинстве своем фокусируются на решении задач в городских транспортных системах [2-13], в то время как транспортные системы межрегионального уровня остаются областью со значительным потенциалом для цифровизации.

Создание единого информационно-управляющего пространства для межрегионального ТОП (ТОП-МР) требует не только технологических решений, но и целостного концептуального представления о его структуре, функциональности и взаимодействии с другими элементами единой транспортной системы.

Целью исследования является разработка концептуальной модели межрегионального модуля интеллектуальной системы транспорта общего пользования (ИСТОП). Предпосылки создания модели изложены в работах [14,15]. Предлагаемая модель структурирует ключевые функции модуля:

- сбор и анализ информации о спросе и предложении в системе ТОП-МР;
- сбор и анализ информации о состоянии межрегиональной транспортной сети (МРТС), включающей автомобильные дороги, железнодорожные пути и авиалинии;
- выработка управленческих решений, направленных на изменение конфигурации маршрутной системы различных видов транспорта;
- своевременное информирование всех участников транспортного процесса.

Межрегиональный модуль ИСТОП должен стать составной частью единой федеральной интеллектуальной системы транспорта общего пользования, включающей:

- муниципальный транспорт общего пользования (ТОП-М);
- региональный транспорт общего пользования (ТОП-Р);
- межрегиональный транспорт общего пользования (ТОП-МР).

Разрабатываемая концептуальная модель может стать теоретическим фундаментом для последующего создания практических программно-аппаратных комплексов, направленных на формирование единого, бесперебойного и комфортного транспортного пространства в масштабах всей страны.

Схема концептуальной модели межрегионального модуля ИСТОП представлена на рис.1.

В блоке «Спрос» аккумулируется информация о передвижениях пассажиров по межрегиональной транспортной сети, включающей автомобильный, железнодорожный и воздушный транспорт. Этот блок состоит из двух модулей: оценка текущего спроса и оценка регулярного спроса. Модуль «Оценка текущего спроса» собирает информацию о намерениях пассажиров совершить поездку в системе ТОП-МР в режиме реального времени. Для этого могут использоваться следующие средства: мобильные приложения; терминалы на автовокзалах, автостанциях и остановочных пунктах; агрегаторы, предоставляющие сервис по приобретению билетов на поездку на различных видах транспорта. Информация о спросе передается на обработку в блок «Анализ текущей ситуации» интеллектуального центра принятия решений (ИЦПР).



Рис. 1. Схема концептуальной модели межрегионального модуля интеллектуальной системы транспорта общего пользования

Модуль «Оценка регулярного спроса» собирает информацию о передвижениях пассажиров в системе ТОП-МР без их непосредственного участия. Для этого могут использоваться различные средства: система камер видеонаблюдения в аэропортах, на железнодорожных вокзалах, автовокзалах, автостанциях, остановочных пунктах и в салонах подвижного состава (ПС) различных видов транспорта; сим-карты в мобильных устройствах пассажиров с функцией геолокации. Полученная информация затем передается в базу данных системы ТОП-МР.

В блоке «Предложение» анализируется информация о подвижном составе ТОП-МР по различным видам транспорта. Этот блок состоит из трёх модулей: количество ПС на линии, структура парка и резервное количество ПС. В модуле «Количество ПС на линии» собирается информация о нахождении ПС в различных точках МРТС в текущий момент времени. Полученная информация передается в блок «Анализ текущей ситуации» ИЦПР. Модуль

«Структура парка ПС» содержит информацию о количестве ПС различных видов транспорта в зависимости от класса пассажироместности, типа тяги, конструкции и другим признакам, что необходимо для оптимизации применения ПС всех видов транспорта в различных условиях. В модуле «Резервное количество ПС» находится информация о наличии ПС в резерве и местах его нахождения на стоянках, железнодорожных узлах, аэропортах в различных точках МРТС.

Блок «Состояние МРТС» в режиме реального времени выполняет мониторинг текущей ситуации, складывающейся в воздушном пространстве, на автомобильных и железных дорогах. Здесь учитывается наличие значительных задержек транспорта, заторов, «пробок» на различных участках МРТС в результате ДТП, ремонтных работ и других причин. Собранная информация также передается в блок «Анализ текущей ситуации» ИЦПР.

Оперативный модуль центра принятия решений анализирует складывающуюся в

МРТС ситуацию со спросом и предложением на межрегиональные пассажирские перевозки. С учетом этого разрабатываются корректирующие воздействия на систему ТОП-МР.

Для автобусного транспорта корректирующие воздействия могут включать:

- динамическое изменение трассы маршрута на основе информации об авариях, заторах и ремонтных работах на дорогах;
- корректировку расписаний движения, перераспределение ПС между маршрутами или выпуск на линию резервного ПС в зависимости от изменяющегося спроса.

Для железнодорожного транспорта корректирующими воздействиями могут быть:

- изменение маршрута следования в обход заблокированного или перегруженного участка железной дороги;
- отмена или сокращение стоянок поезда для наверстывания отставания от графика движения;
- изменение длины подвижного состава, чтобы оптимизировать вместимость под спрос.

Корректирующими воздействиями на воздушном транспорте могут быть:

- задержка рейсов для предотвращения скопления воздушных судов в воздухе и на земле;
- замена борта при резком изменении спроса, например, при недоборе пассажиров, заключающаяся в предоставлении на рейс меньшего по вместимости самолета, чтобы сэкономить на топливе.

Важным моментом является интеграция всех видов транспорта, что создает «бесшовную мобильность», где пассажир воспринимает всю поездку как единый сервис, а не как набор отдельных этапов. Интеграция предполагает несколько уровней:

1) физическая (инфраструктурная) интеграция – строительство транспортно-пересадочных узлов для различных видов транспорта

(совмещенные вокзалы, единые терминальные комплексы);

2) информационная интеграция – единая цифровая платформа (общее взаимосвязанное расписание всех видов транспорта, система оповещения о задержках и изменениях);

3) билетно-тарифная интеграция – сквозные билеты (единый билет на всю цепочку поездки, автоматический пересчет стоимости поездки при сбоях);

4) операционная интеграция – своевременное согласование расписаний и единая служба поддержки (синхронизация времени отправления/прибытия различных видов транспорта, общий колл-центр).

ИЦПР передает актуальную информацию пассажирам и операторам подвижного состава различных видов транспорта. Пассажиры получают информацию о наиболее оптимальных маршрутах поездки в мобильных приложениях, на электронных табло в аэропортах, на автовокзалах, автостанциях, остановочных пунктах. В целях рационального перераспределения пассажиропотоков по МРТС по различным видам транспорта возможно введение гибкой тарификации проезда, т.е. предоставление скидок по цене на поездки на менее загруженных в настоящий момент маршрутах на отдельных видах транспорта. Таким образом пассажир может выбрать для передвижения подходящий вид транспорта и маршрут по скорости, времени и стоимости поездки.

Информация о принятых управленческих решениях пополняет также базу данных системы ТОП-МР. Стратегический модуль ИЦПР обрабатывает информацию о регулярных перемещениях пассажиров по МРТС, а также связанные с этим корректирующие воздействия на систему ТОП-МР. Сопоставляет с существующей конфигурацией базовой межрегиональной маршрутной системы всех видов транспорта (расписания движения, трассировка маршрутов, классы и виды ПС и др.). В итоге ИЦПР принимает решение о корректировании отдельных маршрутов с целью оптимизации функционирования

всей интегрированной маршрутной системы ТОП-МР. Наиболее часто принимаемые рациональные управленческие решения запоминаются и используются снова в аналогичных условиях. Таким образом происходит машинное обучение интеллектуальной системы. База данных является основой для принятия стратегических решений интеллектуальной системой. Она должна постоянно обновляться на основе актуальной информации и результатах обработки информации стратегическим модулем центра принятия решений.

Межрегиональный модуль ИСТОП посредством своего ИЦПР осуществляет взаимодействие с региональными модулями ИСТОП субъектов РФ и муниципальными ИСТОП, находящимися в регионах, в рамках единой федеральной интеллектуальной системы транспорта общего пользования.

Разработанная концептуальная модель межрегионального модуля ИСТОП представляет собой теоретическую основу для перехода от разрозненной работы отдельных перевозчиков различных видов транспорта к интегрированной экосистеме, ориентированной на потребности пассажира. Интеграция автобусного, железнодорожного и воздушного транспорта в единый сервис позволяет преодолеть традиционную фрагментарность транспортного обслуживания между регионами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

**1. Гринченко, А.В.** Об имитационном моделировании мультимодальных пассажирских транспортных систем / А.В. Гринченко. – Текст: непосредственный // Транспорт России: проблемы и перспективы-2024 : материалы Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 140-144.

**2. Афанасьев, А.С.** Методика формирования интеграционной платформы

Внедрение предложенной концептуальной модели позволит достичь значимых социально-экономических эффектов: снижение транспортной изоляции регионов, повышение мобильности населения, оптимизация бюджетных расходов на транспортную инфраструктуру, сокращение негативного воздействия на окружающую среду за счет более рационального использования транспорта.

Реализация концепции требует последовательного подхода – от создания базовой информационной платформы к поэтапному подключению всех видов транспорта и различных сервисов. Успех внедрения зависит от согласованных действий государства, бизнеса и научного сообщества в создании нормативной, технологической и организационной основы интеллектуальной системы ТОП-МР. Представленная концептуальная модель будет способствовать формированию качественно нового уровня транспортного обслуживания населения, соответствующего вызовам цифровой эпохи и потребностям развития территорий Российской Федерации.

функционирования транспортной системы наземного городского пассажирского транспорта / А.С. Афанасьев, И.А. Шаммазов, Е.А. Кузнецова. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4-2 (83). – С. 61-69.

**3. Бажина, М.А.** Интеллектуальные транспортные системы – основа de lege ferenda транспортной системы Российской Федерации / М.А. Бажина. – Текст: непосредственный // Journal of Digital

Technologies and Law. – 2023. – Т. 1, № 3. – С. 630-649.

**4. Глаголев, С.Н.** Модель гибкого управления транспортом общего пользования / С.Н. Глаголев, И.А. Новиков, Ю.Н. Ризаева, А.С. Лукинов. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 3-1 (86). – С. 138-146.

**5.** Повышение эффективности функционирования транспортной сети городского пассажирского транспорта путем применения автоматизации модели выбора оптимального подвижного состава / В.Е. Гозбенко, М.Н. Крипак, О.А. Лебедева, С.К. Каргапольцев. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 2 (54). – С. 203-208.

**6. Еремин, С.В.** Оптимизация структуры парка подвижного состава городского пассажирского транспорта в общей многокритериальной постановке / С.В. Еремин. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2022. – № 1 (76). – С. 62-68.

**7. Кочеткова, И.А.** Информационные системы «Умные остановки» / И.А. Кочеткова, И.С. Евдокимов, А.С. Земцева. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы робототехники и автоматизации : материалы международной конференции, Белгород, 8-9 октября 1915 г. – Белгород, 2015. – С. 92-95.

**8. Кулев, А.В.** Теоретические основы выбора пассажирами маршрутного транспортного средства в условиях повышения информативности о динамических показателях транспортного процесса / А.В. Кулев, М.В. Кулев. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 3-3 (86) – С. 55-61.

**9. Куликов, А.Б.** Разработка системы принятия решений при проектировании умной остановки в транспортно-пересадочных узлах городского пассажирского транспорта /

А.Б. Куликов. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 4-1 (87). – С. 3-11.

**10. Меренков, А.О.** Транспортные системы городов: развитие пассажирских сервисов цифрового типа / А.О. Меренков. – Текст: непосредственный // Транспортное дело России. – 2019. – № 6. – С. 73-75.

**11. Ризаева, Ю.Н.** Повышение качества транспортного обслуживания населения / Ю.Н. Ризаева, П.Ю. Пушкин, А.С. Лукинов. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2 (88). – С. 12-21.

**12. Семкин, А.Н.** Опыт внедрения систем координации движения общественного транспорта на примере орловской городской агломерации / А.Н. Семкин, А.Н. Шевляков. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2023. – № 1-1 (80). – С. 50-59.

**13. Швецова, Е.В.** Планирование и организация процесса перевозки в пассажирской информационно-транспортной системе / Е.В. Швецова, Е.Е. Пролиско, В.Н. Шуть. – Текст: непосредственный // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 4. – С. 111-118.

**14. Гринченко, А.В.** Концепция интеллектуальной системы поддержки принятия решений при управлении внутриобластными пассажирскими перевозками / А.В. Гринченко. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-2 (88). – С. 108-113.

**15. Кригер, Л.С.** Интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении движением общественного транспорта / Л.С. Кригер. – Текст: непосредственный // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2012. – № 2. – С. 150-155.

Сведения об авторе:

**Гринченко Александр Викторович**

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

Information about the author:

**Grinchenko Alexander Viktorovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Motor  
Vehicle Management,  
Lipetsk State Technical University,  
398055, Russia, Lipetsk,  
Moskovskaya St., 30.  
[grinchav@mail.ru](mailto:grinchav@mail.ru),  
[grinchenko\\_av@stu.lipetsk.ru](mailto:grinchenko_av@stu.lipetsk.ru)

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_30

УДК 656.1

Д.А. КАДАСЕВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТА КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИЕЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматривается разработка теоретической модели и методики расчета параметров координированного управления светофорной сигнализацией для снижения транспортной задержки на магистралях непрерывного движения. В исследовании применялись методы системного анализа, теория транспортных потоков, математическое моделирование. Для верификации теоретической модели было проведено имитационное моделирование в программном AnyLogic. Расчеты базировались на фундаментальных принципах и современных подходах к моделированию. Предложена математическая модель, описывающая процесс формирования задержки на регулируемом перекрестке с учетом координации с соседними пересечениями. Выведены аналитические зависимости для определения оптимального временного цикла, длительности фаз и величины так называемой «зеленой волны» с учетом интенсивности и состава транспортного потока. Теоретически обоснована и апробирована методика расчета координированного управления, которая может быть интегрирована в алгоритмы ИТС. Доказана эффективность предложенного подхода для снижения транспортных задержек.

**Ключевые слова:** интеллектуальные транспортные системы, координированное управление, светофорная сигнализация, транспортная задержка, математическая модель, имитационное моделирование, организация дорожного движения.

## THEORETICAL SUBSTANTIATION OF CALCULATING COORDINATED TRAFFIC LIGHT CONTROL IN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article discusses the development of a theoretical model and a methodology for calculating the parameters of coordinated traffic light control to reduce traffic delays on continuous traffic highways. The system analysis method, the theory of traffic flows, and mathematical modeling were used in the study. To verify the theoretical model, simulation modeling was performed in the AnyLogic software. The calculations were based on fundamental principles and modern approaches to modeling. A mathematical model is proposed that describes the process of forming delays at a controlled intersection in coordination with neighboring intersections. Analytical dependencies are derived to determine the optimal time cycle, phase duration, and magnitude of the so-called "green wave" with regard to the intensity and composition of the traffic flow. A methodology for calculating coordinated control has been theoretically substantiated and tested to be integrated into ITS algorithms. The effectiveness of the proposed approach for reducing transport delays has been proven.

**Keywords:** intelligent transport systems, coordinated control, traffic light signals, traffic delay, mathematical model, simulation modeling, traffic organization.

### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация автомобильного транспорта в условиях современных городов неразрывно связана с проблемой перегруженности улично-дорожной сети. Потери времени участников дорожного движения в заторах исчисляются миллиардами рублей ежегодно [1]. В этой связи повышение эффективности управления движением на основе внедрения интеллектуальных транспортных систем является задачей первостепенной важности. Одним из базовых элементов ИТС является адаптивное координированное управление светофорными объектами на магистралях. Классические труды, такие как работа Иносэ и Хамады [2], заложили основы управления движением, однако они не в полной мере учитывают возможности современных вычислительных комплексов и реальные данные с детекторов. Современные исследования, отраженные в Highway Capacity Manual 2022 года [3], предлагают детальные методики оценки пропускной способности и задержек, но носят в большей степени рекомендательный и справочный характер,

требуя адаптации к конкретным алгоритмам координации.

Анализ литературных источников [4, 5] выявил существующий пробел в области универсальных теоретических моделей, позволяющих рассчитывать параметры координированного управления «зеленая волна» в режиме, близком к реальному времени, с учетом динамического изменения характеристик транспортного потока. Большинство существующих решений либо жестко детерминированы, либо не имеют строгого математического аппарата для валидации.

Целью данного исследования является теоретическое обоснование и разработка методики расчета параметров координированного управления светофорной сигнализацией для магистралей в составе ИТС, направленной на минимизацию средней транспортной задержки.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать математическую модель формирования задержки на последовательности координированных перекрестков.

2. Вывести аналитические зависимости для определения ключевых параметров управления (временной цикл, смещение фаз, длительность «зеленой волны»).

3. Провести верификацию предложенной модели методом имитационного моделирования.

4. Дать количественную оценку эффективности предложенной методики.

Применение координированного управления, параметры которого рассчитаны на основе предложенной математической модели, позволит достичь статистически значимого снижения транспортной задержки по сравнению с традиционными (изолированными) методами управления.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач использовался комплекс методов, включающий глубокий теоретический анализ, математическое моделирование и планирование вычислительного эксперимента.

В качестве теоретической основы использовались положения теории транспортных потоков, изложенные в работах [2, 6], и современные стандарты оценки пропускной способности [3]. Исходными данными для расчета служили параметры транспортного потока: интенсивность движения ( $N$ , авт./ч), состав транспортного потока (доля легкового и грузового транспорта), средняя скорость движения на подходе ( $V$ , км/ч), геометрические характеристики магистрали (расстояние между перекрестками  $L$ , м) [4].

Математический аппарат исследования базируется на модифицированной формуле задержки для изолированного перекрестка, расширенной для учета эффекта координации. Общая задержка ( $d$ ) на группе из  $n$  координированных перекрестков рассчитывалась как сумма задержек на каждом пересечении:

$$d_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n d_i, \quad (1)$$

где  $d_i$  – задержка на  $i$ -м перекрестке.

Задержка на  $i$ -м перекрестке рассчитываемая по формуле:

$$d_i = d_{1,i} + d_{2,i} + d_{\text{коорд},i}, \quad (2)$$

где  $d_{1,i}$  – равномерная задержка, сек [3];

$d_{2,i}$  – случайная задержка,

учитывающая стохастичность потока, сек;

$d_{\text{коорд},i}$  – корректирующая составляющая задержки, учитывающая потери времени из-за неидеальной синхронизации «зеленой волны», сек.

Показателем эффективности является минимизация суммы задержек на группе из  $n$  последовательных перекрестков, объединенных в координированное направление «зеленая волна» [6-8]. В качестве базовой модели задержки на отдельном  $i$ -м перекрестке для подхода, входящего в координированную магистраль, используем упрощенную формулу равномерной задержки ( $d_1$ ) по методу Вебстера, модифицированную для учета координации.

Равномерная задержка на одном подходе для  $i$ -го перекрестка в изолированном режиме составляет:

$$d_{1,i} = \frac{T \cdot (1 - u_i)^2}{2 \cdot (1 - y_i)} + \frac{x_i^2}{2 \cdot q \cdot (1 - x_i)} - 0,65 \cdot \left(\frac{T}{q_i^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot x_i^{(2+5 \cdot u_i)}, \quad (3)$$

где  $T$  – длительность цикла, с;

$u_i = g_i/T$  – коэффициент эффективности зеленого сигнала (доля зеленого времени в цикле);

$g_i$  – эффективное время зеленого сигнала для координированного направления, с;

$u_i = N_i/M_i$  – степень насыщения подхода;

$N_i$  – интенсивность прибытия (транспортный спрос) на подход в координированном направлении, авт./с;

$M_i$  – насыщающий поток (пропускная способность) для данного подхода, авт./с;

$x_i = N_i/(M_i \cdot u_i)$  – степень насыщения (уровень загрузки) подхода.

Для задачи координации на магистрали с приоритетом сквозного потока, второе и третье слагаемые (случайная и поправочная составляющие) на первом этапе можно считать

второстепенными. Фокусируемся на минимизации равномерной задержки:

$$d_{1,i} = \frac{T \cdot (1 - u_i)^2}{2 \cdot (1 - y_i)}. \quad (4)$$

Связь длительности зеленого сигнала и пропускной способности. Для обеспечения пропуска прибывающего потока необходимо, чтобы выполнялось условие:  $N_i \cdot T < M_i g_i$ .

Отсюда минимально необходимая доля зеленого времени:

$$u_i^{min} = \frac{N_i \cdot T}{M_i \cdot T} = u_i. \quad (5)$$

Однако для создания «зеленой волны» фактическое значение  $u_i$  часто назначается больше минимального, чтобы создать план координации для прохождения пачки автомобилей. Введем коэффициент резерва пропускной способности

$$\frac{\alpha_i (\alpha_i \geq 1)}{u_i} = \alpha_i \cdot y_i.$$

Общая задержка для  $n$  перекрестков. Пренебрегая корреляцией задержек между перекрестками, суммарная равномерная задержка приближенно равна:

$$D \approx \sum_{i=1}^n \frac{T \cdot (1 - \alpha_i \cdot y_i)^2}{2 \cdot (1 - y_i)}. \quad (6)$$

Учет времени следования между перекрестками. Ключевой параметр координации – сдвиг. Для идеальной «зеленой волны» время движения между перекрестками  $i$  и  $i+1$  должно быть кратно длине цикла или равно расчетному

времени следования  $t_{i,i+1} = \frac{L_{i,i+1}}{V}$ . Это условие связывает циклы на разных перекрестках [9–12]. В упрощенном случае для синхронной системы (единый цикл для всех  $n$  перекрестков) и при условии, что основная задержка возникает из-за остановок при несовпадении фазы, можно выразить дополнительную «координационную» задержку. Для потока, прибывающего на  $i+1$ -й перекресток в случайный момент времени в течение красного сигнала, средняя задержка ожидания зеленого составляет примерно половину длительности эффективного красного времени для этого направления:

$$d_{\text{коор},i+1} \approx 0.5 \cdot R_{\text{эфф},i+1}, \quad (7)$$

где

$$R_{\text{эфф},i+1} = T - g_{i+1}. \quad (8)$$

Минимизация этой задержки эквивалентна максимизации суммарной длительности зеленого сигнала на координированном направлении по всей магистрали при условии обеспечения пропускной способности на каждом перекрестке [13].

Упростим задачу: найдем такой общий цикл  $T$ , который минимизирует сумму задержек первого типа (равномерных) при условии, что суммарный зеленый фон на маршруте максимален. Это приводит к необходимости балансировать длительность цикла: слишком короткий цикл увеличивает потери времени на переходные интервалы (которые фиксированы), слишком длинный – увеличивает задержки на второстепенных подходах и общее время ожидания.

Аппроксимируя, что средняя задержка пропорциональна  $T \cdot (1 - u_{\text{ср}})^2$ , и учитывая, что для обеспечения прогрессии должна быть

пропорциональна  $\frac{\sum L_i}{(T \cdot V)}$  (отношение суммарного времени движения к длине цикла), после взятия производной для поиска минимума и ряда алгебраических преобразований получаем формулу, отражающую баланс между временем движения по магистрали и потребностью в зеленом времени с учетом времени свободного движения между перекрестками и суммарными потерями времени за цикл на всех перекрестках (старт-стопные потери, переходные интервалы).

Введем значение коэффициента эффективности. Коэффициент эффективности явно учитывает, что не весь цикл используется полезно для движения.

Он определяется как отношение полезного (эффективного) зеленого времени координированной фазы на всем маршруте к общему времени цикла, скорректированного на потери. Пусть  $\tau$  –

средняя длительность переходного интервала (желтый + красный, весь красный) между фазами на одном перекрестке, которая не может быть использована для движения. Тогда суммарные потери времени за цикл на  $n$  перекрестках составят  $N \cdot \tau$ . Кроме того, существуют потери времени на разгон и торможение () при каждой остановке.

Коэффициент эффективности можно определить как:

$$K_{эфф} = 1 + \frac{T_{потерь}}{2 \cdot \sum t_{дв,i}} = 1 + \frac{n \cdot (\tau + \beta \cdot t_{p-\tau})}{2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V}}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – эмпирический коэффициент ( $0 < \beta < 1$ ), учитывающий, что не все транспортные средства останавливаются.

Для расчета оптимального временного цикла ( $T$ ) и длительности основных фаз использовался метод, основанный на минимизации общей задержки:

$$T_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \cdot K_{эфф}, \quad (10)$$

где  $M_i$  – насыщающий поток (пропускная способность) для данного подхода, авт./с;  
- коэффициент эффективности.

Оптимальный цикл пропорционален удвоенному суммарному времени свободного движения по магистрали, деленному на суммарную степень насыщения координированных подходов. Множитель ( $>1$ ) увеличивает расчетный цикл, компенсируя неизбежные потери времени на переходные процессы и остановки. Практически значение для городских магистралей обычно находится в диапазоне от 1.1 до 1.3.

Пример численного определения :

Для участка с  $n=3$ ,  $L1=450$ м,  
 $L2=600$ м,  $V=13.9$ м/с(50км/ч),

$$\tau = 5с, = 4с, \beta = 0.7.$$

$$\sum t_{дв,i} = (450 + 600)/13.9 \approx 75.5с.$$

$$T_{потерь} = 3 \cdot (5 + 0.7 \cdot 4) = 3 \cdot 7.8 = 23.4с.  
= 1 + 2 \cdot 75.523.4 \approx 1 + 0.155 \approx 1.16.$$

Таким образом, для данного примера потери времени увеличивают оптимальный расчетный цикл примерно на 16%.

Верификация модели проводится методом имитационного моделирования в программном комплексе AnyLogic. Была разработана модель-прототип участка городской магистрали, включающая [3-5] последовательных перекрестка. Сбор данных о транспортных задержках осуществлялся в течение виртуального часа пиковой нагрузки.

План моделирования предполагал сравнение двух сценариев:

1. Базовый сценарий: работа светофоров в изолированном режиме с фиксированным временным циклом.
2. Экспериментальный сценарий: координированное управление с параметрами, рассчитанными по предложенной методике.

Критерием эффективности служила средняя задержка на один автомобиль на контролируемом участке.

## ТЕОРИЯ/РАСЧЕТ

На основе предложенного математического аппарата был проведен расчет для типового участка магистрали. Ключевым элементом является определение оптимального сдвига между циклами соседних светофоров для организации «зеленой волны». Смещение между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м перекрестками рассчитывается по формуле:

$$O_{i,i+1} = \frac{L_{i,i+1}}{V} - t_{p-\tau,i}, \quad (11)$$

где:

$L_{i,i+1}$  – расстояние между перекрестками,

м;

$V$  – скорость «зеленой волны», м/с (подбирается исходя из ограничений скорости на участке);

$t_{p-\tau,i}$  – суммарные потери времени на  $i$ -м перекрестке, связанные с разгоном и торможением.

Таблица 1

**Исходные данные для расчета параметров координации на участке магистрали**

Параметр	Перекресток 1	Перекресток 2	Перекресток 3	Ед. изм.
Интенсивность, N	850	920	780	авт./ч
Расстояние до след. перекр. (L)	450	600	-	м
Поток насыщения, M	1800	1850	1750	авт./ч
Рекомендуемая скорость	50	50	50	км/ч
Расчетный цикл (T <sub>opt</sub> )	95	95	95	с

**РЕЗУЛЬТАТЫ / ОБСУЖДЕНИЕ**

Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность предложенной методики (см. табл. 2). Как видно из табл. 2, внедрение

координированного управления позволило снизить среднюю задержку на 26,5 %. Также наблюдается снижение разброса значений задержки, что указывает на повышение стабильности и предсказуемости движения.

Таблица 2

**Сравнительные результаты имитационного моделирования**

Сценарий	Средняя задержка на авт. (с)	Стандартное отклонение (с)	Максимальная задержка (с)
Изолированное управление	65,4	18,2	215,7
Координированное управление	48,1	15,8	178,3
Эффект, %	26,5%	13,2%	17,3%

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная математическая модель и методика расчета позволяют существенно повысить эффективность управления движением на магистрали. Снижение задержки на 26,5% находится в диапазоне значений, упоминаемых в других исследованиях [14],

однако достигнуто за счет более строгого теоретического обоснования параметров координации. Объяснением столь значительного эффекта является то, что модель минимизирует не только задержку на каждом отдельном перекрестке, но и совокупную задержку, возникающую из-за остановок на последовательных

пересечениях. Это согласуется с классическим принципом, изложенным в [2], но дополняет его аналитическим расчетом корректирующей составляющей  $d_{\text{коор}}$ . Расхождение с некоторыми зарубежными исследованиями, где эффективность «зеленых волн» оценивается ниже [15], может быть объяснено тем, что в данной работе модель была настроена на специфические условия интенсивного городского движения с относительно небольшими межперекрестными расстояниями. Ограничения исследования включают в себя то, что модель была апробирована на ограниченном числе конфигураций магистралей. Не в полной мере учитывалось влияние пешеходных потоков и общественного транспорта, движущегося по выделенным полосам. Дальнейшие исследования будут направлены на учет этих факторов и интеграцию модели в систему управления в реальном времени.

#### ВЫВОДЫ

Разработана и теоретически обоснована математическая модель формирования транспортной задержки на последовательности координированных перекрестков, учитывающая как

детерминированные, так и стохастические составляющие. На основе модели предложена методика аналитического расчета ключевых параметров координированного управления: оптимального временного цикла, длительности фаз и смещения между циклами соседних светофоров. Апробация методики методом имитационного моделирования показала ее высокую эффективность. Установлено, что внедрение координированного управления с рассчитанными параметрами позволяет снизить среднюю транспортную задержку на 26,5 % по сравнению с изолированным режимом работы. Подтверждена основная гипотеза исследования о том, что координированное светофорное управление, параметры которого рассчитаны на основе предложенной модели, является действенным инструментом снижения транспортной задержки на городских магистралях. Результаты работы имеют практическую значимость и могут быть использованы при проектировании и модернизации подсистем светофорного регулирования в составе интеллектуальных транспортных систем крупных городов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кадасев, Д.А.** Планирование мероприятий по организации дорожного движения с помощью имитационного моделирования / Д.А. Кадасев, М.А. Илюшина. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 3 (49). – С. 48-57.
2. **Иносэ Х.** Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада. – Москва : Транспорт, 1983. – 248 с. – Текст: непосредственный.
3. Highway Capacity Manual 6th Edition Transportation Research Board. – Washington, Continuing Education and Development, Inc. 2022. – 1550 p. – Текст: непосредственный.
4. Application of simulation modeling to improve the functioning of the module of

- intelligent transport and logistics system / S. Lyapin, Y. Rizaeva, D. Kadasev, N. Voronin. – DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976553. –Text: immediate // Proceedings-2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019, Samara, 3-6 сентября 2019. – Samara, 2019. – P. 143-147.
5. Основные принципы ввода координированного управления // А.Ю. Артемов, С.В. Дорохин, Д.В. Лихачев, [и др.]. – Текст: непосредственный // Материалы национальной научно-практической конференции "Наука и инновации в современном мире". Т. 59, № 2. – Воронеж, 2024. – С. 117–121.
6. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / под ред. А.В. Гасникова. – 2-е изд., испр. и доп. –

Москва : МЦНМО, 2013. – 429 с. – Текст: непосредственный.

7. **Smith, S.F.** Traffic Control and Route Choice: A New Assignment and Control Model / S.F. Smith. – Текст: непосредственный // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2019. – Vol. 105. – P. 318-335.

8. **Gartner, N.H.** Control of Oversaturated Intersections / N.H. Gartner, M. Deshpande. – Текст: непосредственный // Analytical Concepts in Traffic Signal Control. – 2020. – Vol. 18. – P. 145-162.

9. Intelligent Traffic Light Management System / S. Jahnavi, G. Prasanth, D. Priyanka [et al.]. – Text: immediate // Proceedings of

International Conference on Advances in Computer Engineering and Communication Systems. Learning and Analytics in Intelligent Systems. Vol. 20. – Singapore, 2021. – P. 489-498.

10. **Кадасев, Д.А.** Организация светофорного регулирования на перекрестке улиц для повышения безопасности движения пешеходов / Д.А. Кадасев, А.И. Петросянц. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 1 (47). – С. 39-48.

11. Имитационное моделирование в проектах ИТС : учебное пособие / С.В. Жанказиев, А.И. Воробьев, А.В. Шадрин, М.В. Гаврилюк. – Москва : МАДИ, 2016. – 92 с. – Текст: непосредственный.

Сведения об авторах:

**Кадасев Дмитрий Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
директор института машиностроения и  
транспорта  
Липецкий государственный технический  
университет,  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, 30.  
kadasev\_da@stu.lipetsk.ru

12. **Баротова, А.Ж.** Имитационная модель перекрёстка с возможностью оптимизации светофорного регулирования / А.Ж. Баротова. – Текст: непосредственный // Творческий потенциал–2017 :

сборник статей / под ред. С.А. Пиявского, З.Ф. Камальдиновой. – Самара, 2018. – С. 26-35.

13. **Зырянов, В.В.** Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС / В.В. Зырянов, А.А. Феофилова, Н.Н. Чуклинов. – Текст: непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 1 (60). – С. 74-80.

13. **Кадасев Д.А.** Повышение скорости движения автотранспортных потоков при оптимизации работы светофорной сигнализации методами имитационного моделирования / Д.А. Кадасев, А.И. Петросянц. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 3 (46). – С. 46-53.

14. Интеллектуальные методы управления транспортными системами // А.С. Сысоев, С.А. Ляпин, А.В. Галкин [и др.]. – 2-е изд. – Москва : Дашков и К, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-394-04747-3. – Текст: непосредственный.

Information about the author:

**Kadasev Dmitry Anatolyevich**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Director of the Institute of Mechanical  
Engineering and Transport  
Lipetsk State Technical University.  
398055, Russia, Lipetsk.  
Moskovskaya str., 30.  
kadasev\_da@stu.lipetsk.ru

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_38  
УДК 669.162

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

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДГОТОВКИ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ К  
СПЕКАНИЮ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** Представлены результаты аналитической оценки эффективности различных методов совершенствования подготовки шихты к спеканию, таких как подогрев шихты, изменение режима окомкования, перераспределение потоков извести и применение различных связующих веществ. Показано, что применение указанных методов способствует росту производительности агломерационных машин до 28 %, снижению расхода топлива на спекание до 10 % и повышению качества агломерата в части содержания в нем фракции -5 мм (снижение до 10 %).

**Ключевые слова:** агломерационная шихта, спекание, подготовка, окомкование.

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

**ANALYTICAL EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF VARIOUS METHODS  
OF IMPROVING THE AGGLOMERATION MIX PREPARATION FOR SINTERING**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article presents the results of an analytical evaluation of the effectiveness of various methods of improving the agglomeration mix preparation for sintering, such as heating the mix, changing the pelletizing mode, redistribution of lime flows and application of various binders. It is shown that the specified methods contribute to an increase in the productivity of sintering machines by up to 28%, a reduction in fuel consumption for sintering by up to 10% and an improvement in the sinter quality in terms of the -5 mm fraction content (a reduction of up to 10%).

**Keywords:** agglomeration mix, sintering, preparation, pelletizing.

**ВВЕДЕНИЕ**

Современная схема производства агломерата включает в себя множество стадий, среди которых одной из основных является стадия подготовки шихты в части ее смешивания и окомкования.

Качественная подготовка шихты на данном этапе оказывает существенное влияние на эффективность производства агломерата, в том числе производитель-

ность, расход топлива, химический состав спекаемого агломерата, в том числе его стабильность, качество агломерата в части его прочности и гранулометрического состава (в основном содержание фракции - 5 мм).

Практика производства агломерата со времен начала существования данного метода окускования железорудного сырья разработала множество методов по совершенствованию схем подготовки

шихты к спеканию.

Связь температуры подогрева агломерационной шихты с интенсивностью процесса спекания агломерата достаточно подробно описано в литературе [1-3]. Высокая газопроницаемость слоя и производительность аглопроцесса достигается за счет спекания шихты выше точки росы, в результате чего в ходе процесса исключается образование зоны переувлажнения, что улучшает тепловые условия в спекаемом слое. В связи с этим технология подогрева шихты перед ее спеканием получила широкое распространение как один из элементов технологии производства агломерата.

Активное развитие данной технологии началось еще в 70-х годах XX века. На агломашине Магнитогорского металлургического комбината была внедрена [4] технология спекания агломерата с предварительным подогревом шихты за счет тепла сжигания коксового газа в окомкователях.

В агломерационном цехе АО «Уральская Сталь» подогрев аглошихты осуществляется с помощью введения горячего возврата (температура которого составляла 400°C) в процессе смешивания аглошихты. Дополнительное количество тепла поступало за счет добавки свежееобожженной извести, расход которой достигал 30 кг/т. В результате реализации

данных мероприятий удалось добиться повышения температуры шихты до 41-52 °С (более низкие значения характерны для зимнего периода) [5].

В работе [6] подогрев воды осуществлялся за счет нагрева воды, идущей на процесс окомкования. До реализации данной технологии температура воды изменялась от 5 °С в зимний период до 25 °С в летний период. Для осуществления стабильного подогрева шихты температура воды, идущей на окомкование, должна составлять не менее 85 °С (каждые 10 °С воды способствует увеличению температуры шихты до 2 °С).

Достигнутое в процессе проведения эксперимента увеличение температуры аглошихты до 65,2 °С способствовало росту газопроницаемости слоя шихты, что выразилось в снижении разрежения в коллекторе на 28 мм вод.ст. или на 5 %, и росте температуры отходящих газов (наблюдалось увеличение на 12,5 °С), что свидетельствует о повышении газопроницаемости спекаемого слоя за счет значительного уменьшения или полного устранения зоны переувлажнения. Также отмечен рост производительности на 3-4 %, при этом авторы работы [6] не указывают величину снижения расхода топлива.

На заводе фирмы «Sumitomo Metal Industries» осуществлено изменение схемы процесса подготовки шихты (рис. 1) [7].

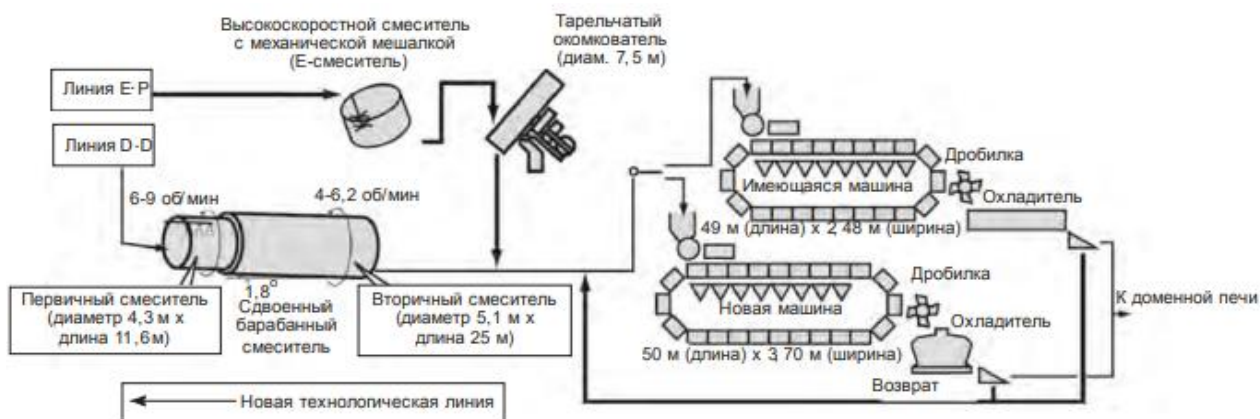


Рис. 1. Реконструируемая схема подготовки шихты

В рамках проведенной модернизации в схему подготовки шихты были внедрены тарельчатые окомкователи, которые имели диаметр 7,5 м с углом наклона 50 градусов. Тарель вращалась со скоростью 12,5 оборотов в минуту. Тарельчатый окомкователь был установлен сразу после высокоскоростного смесителя. Данная схема заменила традиционную с использованием двух барабанных смесителей-окомкователей.

В ходе эксперимента установлено [7], что при длительности окомкования более 5 мин диаметр окатышей стабили-

зировался и не зависел от таких параметров как высота борта и угол наклона. Полученные в тарельчатом окомкователе гранулы обладали большим размером с меньшим содержанием мелких фракций (-1 мм).

После перехода на новую схему [8] отмечено изменение отдельных параметров спекания агломерата (снижился выход возврата (рис. 2, а) и выросла производительность (рис. 2, б). Снижение выхода возврата составило 24 кг/т агломерата, а рост производительности 2,6% (отн.).

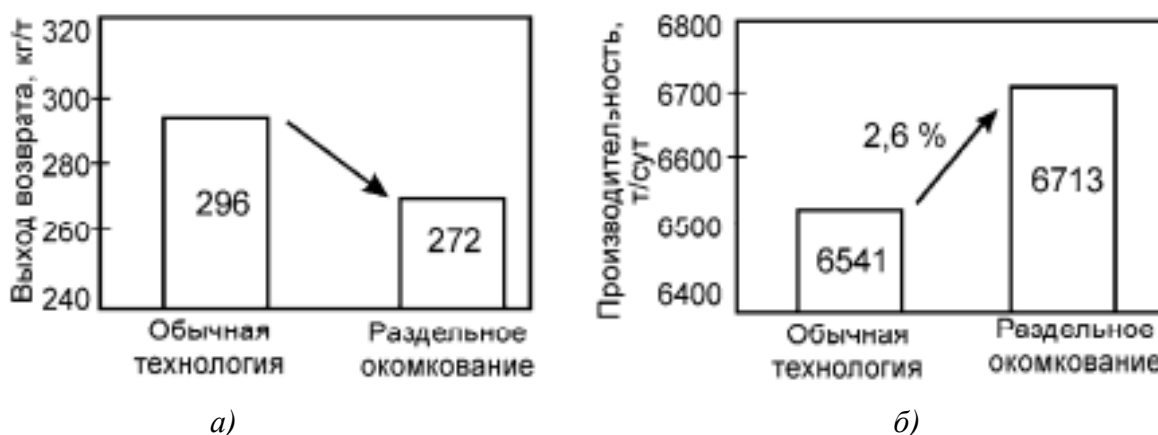


Рис. 2. Производственные показатели с применением окомкования аглошихты по раздельной схеме Р-типа

Для получения оптимального грансостава шихты в условиях применения шихты с высокой долей концентрата, японскими металлургами была разработана технология HPS (Hybrid pelletized sinter process) [9]. Особенностью данной технологии явилось производство агломерата из шихты, которое подвергалось частичному окомкованию.

При данной технологии окомкование производилось в тарельчатом окомкователе. При этом шихта смешивалась и увлажнялась в барабанном смесителе, и в барабан не подавалась коксовая мелочь, подачу которой осуществляли отдельно.

Произведенный по данной схеме агломерат содержал около 5 %  $\text{SiO}_2$  и 1,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Он обладал более высокой восстановимостью (показатель  $\text{RI} = 70-75\%$ ) и горячей прочностью ( $\text{RDI} = 35-40\%$ ) по сравнению с агломератом,

полученным по традиционной технологии.

Авторы работы [10] указывают, что эффективность применения ПАВ в качестве связующих при производстве агломерата заключается в следующем:

- Интенсификации процесса окомкования из-за улучшения условий смачивания частиц с соответствующим ростом газопроницаемости и скорости горения коксика;
- повышению прочности сырых гранул и их меньшее разрушение в нижней части слоя шихты;
- локализации зоны горения твердого топлива с повышением температуры.

По результатам применения ПАВ с расходом порядка 3 кг/т шихты авторы работы [10] указывают, что основными эффектами являются: рост производительности на 17 %, снижение расхода природного газа на 1 м<sup>3</sup>/т агломерата,

потенциальное снижение расхода коксовой мелочи на 9 %.

Детальное исследование применения полимерного связующего приведено в работе [11]. Авторами представлена оценка эффективности применения полимерного связующего в условиях агломерационной фабрики «Тулачермет». Оценка степени окомкования показала, что использование связующего способствовало ее увеличению с 68 до 95 %.

Анализ структуры агломерата [11], в ходе которого отмечено, что агломерат произведенный с использованием полимерного связующего обладает ярко выраженным рудным каркасом, тогда как агломерат спеченный без использования связующих обладает внутренними трещинами, что и предопределяет его более низкую прочность

По итогам промышленных испытаний отмечено, что в период использования связующего произошло увеличение производительности на 5 % (отн.), при увеличении прочности агломерата с 61,5 до 66,9 % (+5,4 %). Рост прочности способствовал снижению содержания фракции -5 мм в агломерате на 5 % (с 26,5 до 21,5 %).

Известь является одним из компонентов шихты, применение которой показало свою эффективность на протяжении десятилетий ее использования. Эффективность применения извести обусловлено тем, что получаемый в результате взаимодействия CaO с водой гидрат кальция имеет хорошие вяжущие свойства. При этом практика показала [12], что эффективность ее применения зависит от расхода, способа подачи и непосредственно качества извести. В случае получения извести недостаточного качества отмечалась дестабилизация качества агломерата как по его химическому составу (основность, содержание железа), так и по гранулометрическому составу (содержание фракции -5 мм), особенно при высоких расходах.

На основании полученных результатов авторы [12] приходят к выводу, что в зимний период подача извести фракции 0-3

мм в шихту через шихтовое отделение в количестве 3% положительно сказывается на работе агломерационных машин и способствует росту их производительности на 5%. Также указывается возможность снижения содержания фракции -5 мм в агломерате.

Относительно распределения извести авторы работы [13] утверждают, что присадка извести (накатывание) в конце окомкования увеличивает эффективность ее применения как интенсификатора на 50 %, а эффективность окомкования на 20 %.

Как показала представленная выше информация, а также дополнительный обзор литературы [14-20], наиболее распространенными направлениями по совершенствованию технологии подготовки шихты к спеканию являются следующие:

1. Ввод в состав шихты различных добавок (связующие вещества, шламы).
2. Подогрев шихты.
3. Изменение схемы смешивания и окомкования шихты.
4. Изменение схемы подачи извести.

*Ввод в состав шихты добавок.* По данному направлению можно выделить две группы. Первая группа – добавка связующих, вторая – добавка шламов.

В качестве связующих обычно используют поверхностно активные вещества как органического происхождения, так и искусственного (полимеры). В качестве добавок используют сталеплавильные шламы и красные шламы. Однако данные шламы имеют недостатки в части содержания в них вредных компонентов таких как цинк (сталеплавильные шламы) и щелочи (красные шламы). Данные компоненты оказывают негативное влияние на работу доменной печи, что может обнулить положительный эффект от их использования в агломерационном производстве.

В табл. 1 приведена информация о технических эффектах от ввода в шихту различных добавок.

## Технические эффекты от ввода в шихту добавок

Добавка	Показатель	Изменение
Связующие (ПАВ)	Производительность	+5-17% (отн.)
	Расход твердого топлива	-9% (отн.)
	Расход природного газа на зажигание	-1 м <sup>3</sup> /т агломерата
	Прочность агломерата (X <sub>+5</sub> )	+1-5% (абс.)
	Содержание фракции -5 мм	-5% (абс.)
Сталеплавильные шламы	Производительность	+28% (отн.)
	Содержание фракции -5 мм	-3-5% (абс.)
Красные шламы	Производительность	+5% (отн.)
	Содержание фракции -5 мм	-10% (абс.)

Подогрев шихты. Эффективность применения подогрева шихты в части

увеличения производительности зависит от уровня подогрева (рис. 3).

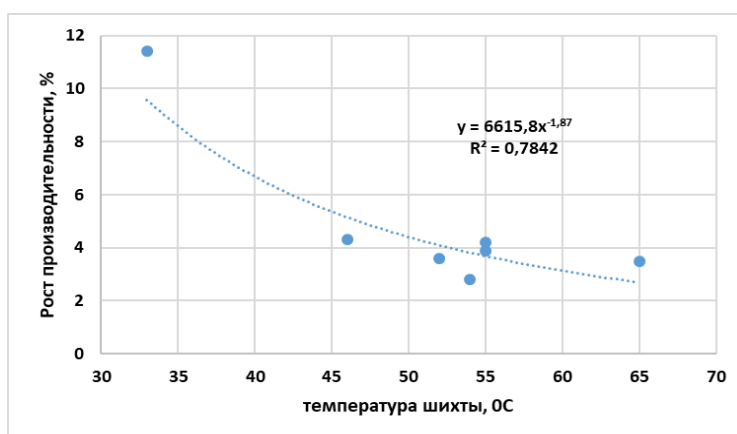


Рис. 3. Влияние уровня подогрева шихты на рост производительности

Из рис. 3 видно, что с увеличением уровня подогрева шихты эффективность данного мероприятия снижается. С использованием полученного уравнения рассчитаны величины прироста произво-

дительности при разном уровне нагрева шихты. Результаты расчета, а также влияние подогрева на остальные показатели работы агломерационных машин приведены в табл. 2.

## Технические эффекты от подогрева шихты

Показатель	Температура	Изменение
Производительность	30 <sup>0</sup> С	+11,4% (отн.)
	40 <sup>0</sup> С	+6,7% (отн.)
	50 <sup>0</sup> С	+4,4% (отн.)
	60 <sup>0</sup> С	+3,1% (отн.)
	70 <sup>0</sup> С	+2,4% (отн.)
Расход твердого топлива	30 <sup>0</sup> С	-2,6% (отн.)
	55 <sup>0</sup> С	-4,0% (отн.)
Содержание фракции -5 мм		-2,5% (абс.)

*Изменение схемы смешивания и окомкования шихты.* По данному направлению можно выделить как изменение оборудования (замена барабанных окомкователей и смесителей на высокоскоростной смеситель и тарельчатый гранулятор), так и изменение места ввода в шихту топлива (разделение потоков). В обоих случаях необходима

реконструкция агломерационного производства. При этом в первом случае уровень реконструкции более глубокий, что накладывает определенные ограничения на реализацию данного направления в условиях действующего производства. В табл. 3 приведена информация о технических эффектах от реализации данного направления.

Таблица 3

**Технические эффекты от изменения схемы смешивания и окомкования шихты**

Добавка	Показатель	Изменение
Замена барабанных смесителей и окомкователей на интенсивный смеситель и тарельчатый гранулятор	Производительность	+2,6% (отн.)
Технология HPS	Производительность	+8,9% (отн.)
Накатывание топлива		+15,7% (отн.)
Накатывание топлива и флюсов		
Добавка топлива в конце окомкования	Производительность	+2,4-3,2% (отн.)
	Расход твердого топлива	-9,6% (отн.)
	Содержание фракции -5 мм	-5,1% (абс.)

*Изменение схемы подачи извести.* В данном направлении в основном используют раздельное дозирование извести, когда часть извести подают на усреднительный склад, а часть подают через бункера шихтового отделения. Основным эффектом от данного мероприятия является рост производительности агломерационной машины, который составляет 5 %.

**ВЫВОДЫ**

1. Проанализированы направления по совершенствованию подготовки агломерационной шихты к спеканию.

2. Отмечено, что основные направления нацелены на повышение эффективности окомкования, среди

которых в настоящее время проработаны следующие:

2.1. Ввод в состав шихты различных добавок (связующие вещества, шламы).

2.2. Подогрев шихты.

2.3. Изменение схемы смешивания и окомкования шихты.

2.4. Изменение схемы подачи извести

3. В целом можно отметить, что эффективность того или иного мероприятия по совершенствованию подготовки шихты к спеканию зависит от конкретных условий (тип применяемых руд и концентратов, состав оборудования и т.д.).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Коротич, В.И. Агломерация рудных материалов : научное издание / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский. – Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с. – Текст: непосредственный.

2. Вегман, Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – Москва : Metallurgizdat, 1974. – 286 с. – Текст: непосредственный.

3. Базилевич, С.В. Агломерация // С.В. Базилевич, Е.Ф. Вегман. – Москва : Metallurgizdat, 1967. – 368 с. – Текст: непосредственный.

4. Эффективность подогрева шихты в смесителях агломашинов / А.И. Гамаюров, В.М. Долгополов, Л.А. Лепихин [и др.]. – Текст: непосредственный // *Металлург.* – 1982. – № 12. – С. 22-23.

5. **Шаповалов, А.Н.** Качество подготовки агломерационной шихты к спеканию в условиях ОАО «Уральская сталь» / А.Н. Шаповалов, Е.В. Овчинникова, Н.А. Майстренко. – Текст: непосредственный // *Теория и технология металлургического производства.* – 2014. № 1 (14). – С. 6-9.

6. **Уваров, В.В.** Оценка эффективности различных способов подогрева агломерационной шихты для условий АО «Уральская Сталь» / В.В. Уваров. – Текст: непосредственный // *Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки.* – 2017. – № 16. – С. 4-10.

7. Улучшение окомкования аглошихты с применением тарельчатого окомкователя // С. Kamijo, M. Hara, T. Kawaguchi [et al.]. – Текст: непосредственный // ОАО «Черметинформация». *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2011. – № 4. – С. 21-22.

8. Повышение производительности агломашины № 5 в Вакаяма с внедрением технологии раздельного окомкования Р-типа / К. Watanabe, M. Yasukawa, С. Kamisaka [et al.]. – Текст: непосредственный // ОАО «Черметинформация». *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2011. – № 4. – С. 23-24.

9. Развитие технологии окомкования аглошихты в Японии / Т. Higuchi, N. Oyama, T. Kamino, K. Yamashita [et al.]. – Текст: непосредственный // ОАО «Черметинформация». *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2011. – № 1. – С. 14-20.

10. Использование полимерного связующего в агломерации / Д.Н. Волков, А.Л. Мамонов, Д.А. Шатохин [и др.]. – Текст: непосредственный // *Наука – Образование – Производство: опыт и перспективы развития* : сборник материалов XIV Международной научно-

технической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова (8-9 февраля 2018 г.). В 2 т. Т. 1 : Горно-металлургическое производство. Машиностроение и металлообработка. – Нижний Тагил, 2018. – С. 37-48.

11. Способ повышения прочности агломерата за счет улучшения окомкования шихты / Д.В. Федоренко, А.А. Воротынцев, Э.М. Щеглов, В.И. Искалин. – Текст: непосредственный // *Черные металлы.* – 2022. – № 9 – С. 4-12

12. Гуцин, Д.Н. Влияние на процесс агломерации распределения извести между усреднительным складом и шихтовым отделением аглофабрики № 5 ПАО «ММК» / Д.Н. Гуцин, Д.М. Чукин, Ю.А. Фролов. – Текст: непосредственный // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2023. – Т. 79, № 2. – С. 95-106.

13. **Коршиков, Г.В.** Пути повышения интенсивности агломерационного процесса и улучшения качества агломерата при спекании тонкоизмельченных концентратов / Г.В. Коршиков Е.В. Невмержицкий. – Текст: непосредственный // *Сталь.* – 1974. – № 8. – С. 675-682

14. **Коршиков, Г.Н.** Влияние степени окомкования шихты и ее физических свойств на показатели процесса спекания / Г.В. Коршиков, В.Н. Пономарев. – Текст: непосредственный // *Сталь.* – 1972. – № 11. – С. 969-974.

15. **Носовицкий, Б.Н.** Спексаемость аглошихты и качество агломерата с присадкой железосодержащих шламов металлургического производства / Б.Н. Носовицкий. – Текст: непосредственный // *Сталь.* – 1974. – № 2. – С. 103-106.

16. **Утков, В.А.** Упрочнение агломерата красным шламом / В.А. Утков, Н.А. Ватолин. – Текст: непосредственный // *Сталь.* – 1974. – № 5. – С. 397-400.

17. **Гуляев, В.А.** Нагрев агломерационной шихты газом во вторичных смесителях окомкователей / В.А. Гуляев, В.В. Гусев. – Текст:

непосредственный // Сталь. – 1980. – № 8. – С. 663-664.

18. **Коршиков, Г.В.** Опыт освоения подачи топлива в конце окомкования на НЛМЗ / Г.В. Коршиков, С.П. Ефимов. – Текст: непосредственный // Сталь. – 1981. – № 10. – С. 17-20

19. **Долгополов, В.М.** Совершенствование технологии спекания агломерата на аглофабриках ММК / В.М. Долгополов,

М.И. Медведев – Текст: непосредственный // Сталь. – 1982. – № 1. – С. 10-13

20. **Запорожец, Н.П.** Спекание шихты и термическая обработка агломерата с применением панельных горелок инфракрасного излучения / Н.П. Запорожец, Б.Н. Ротмистровский – Текст: непосредственный // Metallurg. – 1972. – № 2. – С. 5-7.

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.

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

**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.

398055, Russia, 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.

398055, Russia, 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.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

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

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_45

УДК 669.054.82; 661.842

В.Г. МИХАЙЛОВ, А.В. КАРПОВ

## ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ ИЗ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** объём образования сталеплавильных шлаков в процессе выплавки стали конвертерным способом достигает 100-120 кг/т стали. Степень утилизации составляет до 50-85 %, что обусловлено их склонностью к самораспаду. В статье описан способ получения из

сталеплавильных шлаков искусственного карбоната кальция путем селективного растворения и последующего осаждения в виде карбоната. Проведены эксперименты по селективному растворению оксида кальция, содержащегося в шлаке установки десульфурации чугуна, конвертерном шлаке и разливочном шлаке, в уксусной кислоте и нитрате аммония с концентрацией 1 М и 2М. В качестве осадителя применяли раствор гидрокарбоната натрия. Подтверждена возможность извлечения в конечный продукт до 65–76 % от исходного оксида кальция и получения искусственного карбоната кальция высокой чистоты с суммарным содержанием карбоната кальция и карбоната магния более 96 %. Результаты исследований дают возможность для оценки перспектив переработки сталеплавильных шлаков в продукт с высокой добавочной стоимостью, а именно мел химически осаждённый.

**Ключевые слова:** сталеплавильный шлак, утилизация, ресурсосбережение, карбонат кальция, химически осажденный мел.

V.G. MIKHAILOV, A.V. KARPOV

## ARTIFICIAL CALCIUM CARBONATE PRODUCTION FROM STEEL SLAGS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The resulting volume of steel slag produced as part of the BOF process amounts to 100-120 kg/t of steel. The share of recycled steel slags does not exceed 60-85% due to their structural instability. The article describes the technique of producing artificial calcium carbonate from steel slags by selective dissolution of calcium oxide and its following sedimentation in the form of a carbonate. Experiments were performed on selective dissolution of calcium oxide contained in the slag produced by the pig-iron desulfurization facility, in the converter slag and in the casting slag, in acetic acid and in ammonium nitrate with the concentration of 1M and 2M. A sodium hydrocarbonate solution was used as the precipitator. The experiments confirmed the possibility of extracting up to 65-76% of the initial calcium oxide in the final product and obtaining an artificial calcium carbonate of high purity, with the total amount of calcium carbonate and magnesium carbonate of over 96%. The research results make it possible to assess the processing of steel slags to obtain a high value-added product – chemically precipitated chalk.

**Keywords:** steel slag, recycling, resource-saving, calcium carbonate, chemically precipitated chalk.

### ВВЕДЕНИЕ

Россия в настоящее время столкнулась с проблемой накопления отходов как промышленных, так и ТКО и, как результат, отчуждение территорий под их хранение и загрязнение окружающей среды. Согласно [1] общий объём накопления на конец 2017 г. составил 38,1 млрд. т, при этом наибольшая часть (99 %) накопленных отходов относится к V классу опасности, то есть к практически неопасным отходам. Чрезвычайно опасных отходов (I класс опасности) к концу 2017 г. накоплено 0,01 млн. т, высокоопасных (II класс опасности) – 0,08 млн. т, умеренно опасных отходов (III класс опасности) –

7,04 млн. т, малоопасных (IV класс опасности) – 290,7 млн. т.

Чёрная металлургия вносит существенный вклад в объём образования отходов. Общая сумма твёрдых отходов составляет до 350 кг/т стали (шлаки, шламы, пыли, металлоотходы, окалина, огнеупоры и пр.), большую часть из которых (более 95 %) составляют отходы IV и V класса опасности, часть из них шлаки – доменный и сталеплавильный. Утилизация сталеплавильного шлака (точнее смеси сталеплавильных шлаков, образующихся в процессе обработки чугуна на УДЧ, выплавки стали, обработки стали на АПК и её разлива) вызывает

некоторые затруднения, связанные с нестабильностью его структуры. Сталеплавильный шлак может распадаться по нескольким механизмам: силикатному, известковому, железистому, марганцевому и сульфидному. Основным является силикатный распад.

Доля перерабатываемого сталеплавильного шлака в настоящее время достигает 85 % [2], при этом объём накопленных отвалов достигает 300 млн.т., а их площадь – 2 500 га [3]. Сфера применения сталеплавильных шлаков не

ограничивается рециклингом непосредственно в металлургии, также деметаллизированный шлак находит применение в сельском хозяйстве, химической промышленности, медицине, дорожном и гидротехническом строительстве, при производстве строительных материалов, каменнолитых изделий, шлаковой ваты, абразивного материала и др. [4]. По данным статистики из 14,2 млн. т. сталеплавильного шлака в странах ЕС было переработано 81,5 % [5].

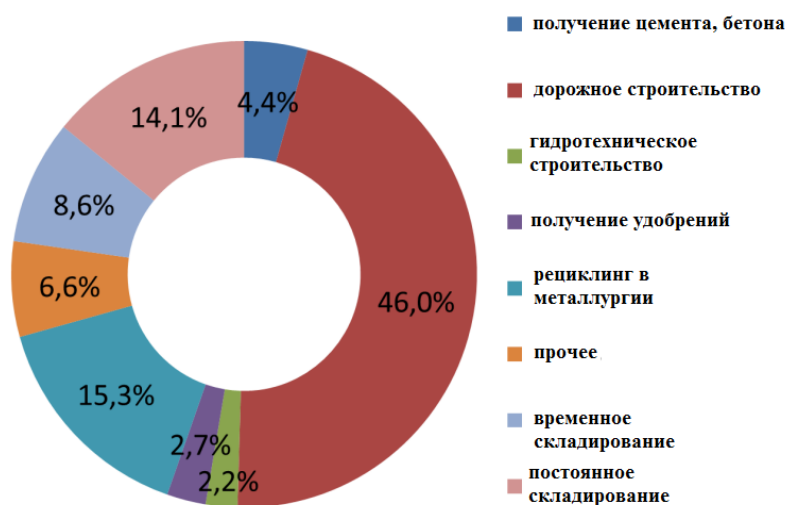


Рис. 1. Сфера применения сталеплавильных шлаков

Одним из интересных направлений переработки сталеплавильных шлаков, особенно маловостребованных в дорожном строительстве мелких фракций, является производство искусственного карбоната кальция [6]. Рыночная стоимость зависит от качественных характеристик данного материала, составляя от 6000 до 30000 р/т. Искусственный карбонат кальция оценивается согласно ГОСТ 8253-79 «Мел химически осажденный. Технические условия». Применяется для производства высококачественной бумаги; масляных и водоземлюльсионных красок высокого качества; для изготовления резиновых оболочек, изолирующих токоведущие части кабелей; в производстве керамики; для изготовления зубных паст и косметических средств; в производстве цветной полиэтиленовой пленки толщиной более 100 мкр.; в производстве резинотехнических изделий; при приготовления детских питательных

смесей (для пополнения кальция в организме); в электронной промышленности – для изготовления частей микросхем; в фармацевтике – при изготовлении лекарственных препаратов; для получения марочных вин.

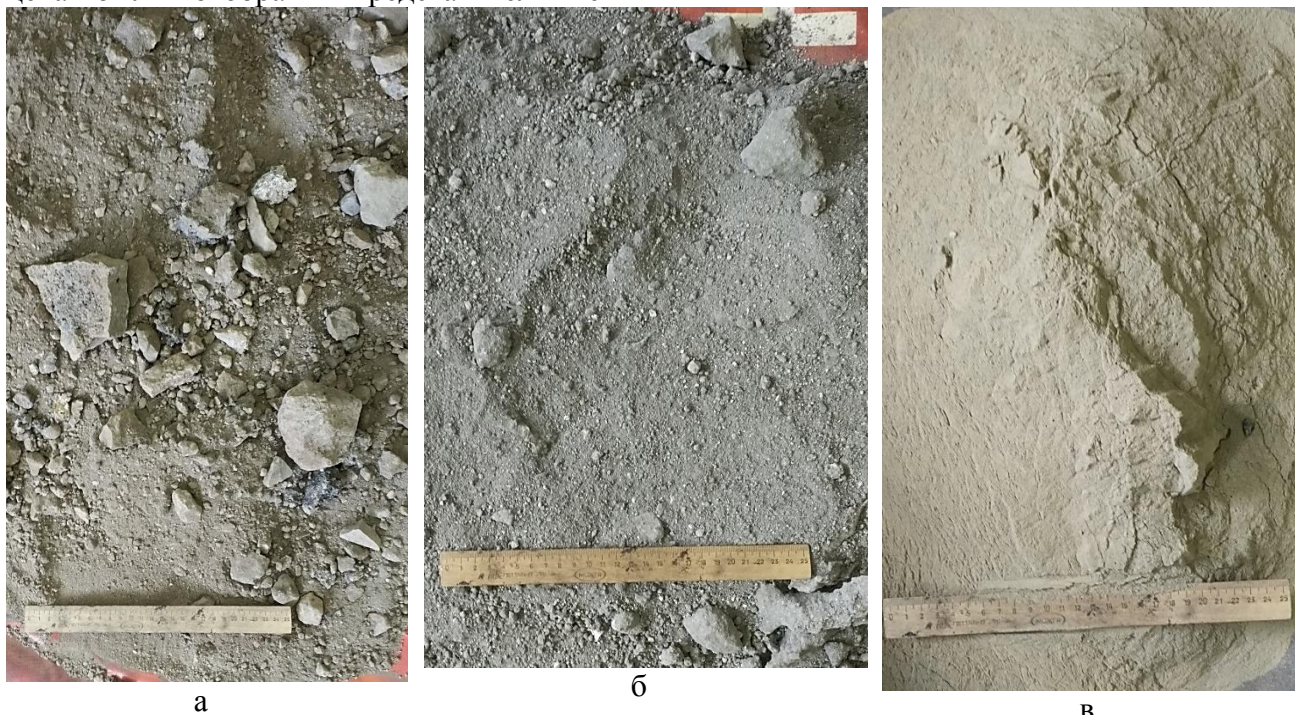
Классическая технология получения мела химически осажденного предполагает обжиг природного карбонатного сырья (мела, известняка) для получения извести и её дальнейшую гидратацию и карбонизацию [7, 8]. При этом существует ряд патентов, в которых в качестве сырья применяют различные отходы производства: электрощелоки процесса получения хлора и каустической соды диафрагменным электролизом, предварительно очищенные от железа и от сульфат-ионов [10]; фосфогипс – отход производства экстракционной фосфорной кислоты [9]; твердые отходы карбоната кальция низкой химической чистоты, образующиеся в целлюлозно-бумажной

промышленности [11].

**ТЕОРИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ И  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ**

Со шлаковой ямы конвертерного цеха были отобраны представительные

пробы конвертерного шлака (шлак от выплавки стали), шлака установки десульфурации чугуна и разливочный шлак. Крупность шлаков составляла до 100 мм, внешний вид шлаков представлен на рис. 2.



а – конвертерный шлак; б – шлак УДЧ; в – разливочный шлак

Рис. 2. Внешний вид пробы сталеплавильных шлаков

Таблица 1

**Гранулометрический состав сталеплавильных шлаков**

Вид шлака	Содержание (%), класс крупности (мм)			
	+40	+10-40	+5-10	-5
Конвертерный	6,64	22,59	19,19	51,58
УДЧ	1,93	13,85	14,50	69,72
Разливочный	0	6,74	14,29	78,98

Определение насыпной плотности сталеплавильных шлаков производилось для фракции -5 мм с остаточной влажностью не более 3 % и показало, что наибольшим показателем обладает шлак УДЧ – 1,58 т/м<sup>3</sup>. Конвертерный шлак имеет близкое к нему значение – 1,50 т/м<sup>3</sup>, а шлак разливки значительно легче – 1,25 т/м<sup>3</sup>. Подобное различие объясняется природой сталеплавильных шлаков, их химическим составом (табл. 1).

Для дальнейших экспериментов была взята фракция менее 5 мм от каждого вида шлака, что продиктовано низким спросом именно на данную фракцию на рынке. Подготовка шлаков включала в

себя магнитную сепарацию с использованием ручного неодимового магнита диаметром 110 мм и высотой 40 мм с усилием отрыва 300 кг. Согласно проведённым расчётам [12], на расстоянии 40-50 мм от материала напряжённость магнитного поля составляла 100-130 кА/м. Химический состав шлаков после магнитной сепарации представлен в табл. 1. Измельчение немагнитной фракции производили в дисковом истирателе с последующим контрольным рассевом на сите с размером ячейки 100 мкм.

Навеску шлака массой 1 г растворяли в закрытой колбе Эрленмайера в течение 1 часа при температуре 20 °С в

50 мл водного раствора соответствующего растворителя разной концентрации – 1 и 2 М. В качестве растворителей использовали уксусную кислоту (CH<sub>3</sub>COOH) 1 и 2 М и нитрат аммония (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 1 и 2 М. Полученный раствор фильтровали через воронку Бюхнера для выделения нерастворимого осадка и определения его массы. Осаждение карбоната кальция из раствора осуществляли путем добавления раствора соды (NaHCO<sub>3</sub>). Подобный метод, в отличие от работы [6], был выбран в связи с отсутствием необходимого оборудования для пропускания через раствор углекислого газа.

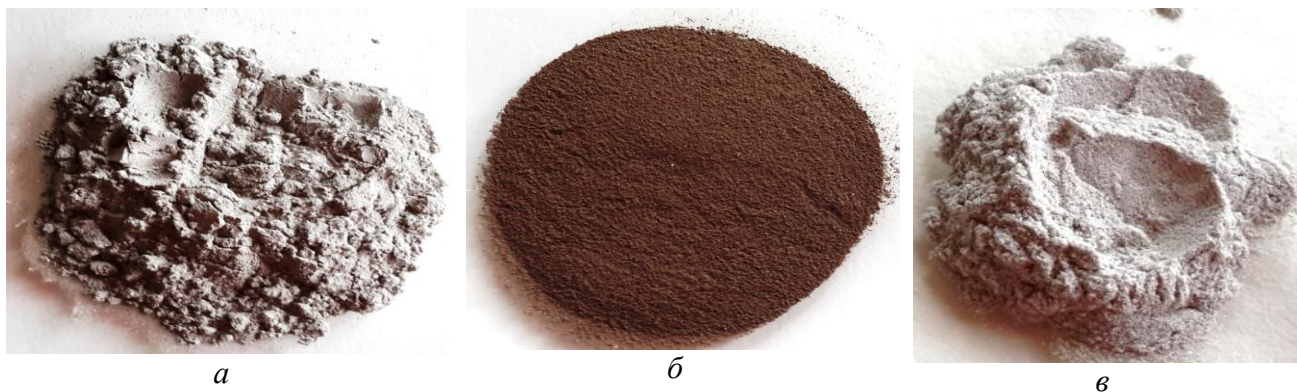
Методом атомно-эмиссионной

спектроскопии (на приборе МФС-8) получали спектры осадков и рассчитывали массовую долю карбоната кальция. В приборе МФС-8 используются графитовые электроды из графита марки С-3. Один из электродов представляет собой цилиндрический стержень с кратером диаметром 4 мм для размещения пробы материала. Режим работы спектрометра МФС-8: входная щель прибора 0,017мм; предварительный обжиг электродов не производится; время экспозиции – 10 секунд; время интегрирования – 50 мс; режим съёмки спектров – дуговой режим; ток дуги – 3 А; расстояние между электродами – 1,5 мм.

Таблица 2

### Химический состав металлургических шлаков

Вид шлака	Содержание, % (масс.)						Доля CaO/SiO <sub>2</sub>
	Fe <sub>общ</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	
УДЧ	0,27	32,92	46,85	13,08	5,48	1,27	1,42
Конвертерный	21,50	13,05	54,51	2,49	1,19	0,07	4,25
Разливочный	3,00	12,2	48,6	1,6	30,4	0,13	4,0



а – УДЧ; б – конвертерный; в - разливочный  
Рис. 3. Внешний вид металлургических шлаков после истирания

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Применение в качестве растворителя нитрата аммония не оправдало ожиданий, т. к. степень растворения не превысила 16 %, и дальнейшие эксперименты с полученными растворами не проводили. Раствор уксусной кислоты может быть применён в качестве растворителя для шлака УДЧ и

конвертерного шлака, степень растворения которых составила 48 – 50 % и 61– 65 %, соответственно. Разливочный шлак растворяется в 1,5–2 раза хуже, масса шлака, перешедшего в раствор, составляет 30 – 34 % (рис. 4). Повышение концентрации уксусной кислоты в 2 раза на растворимость шлаков не повлияла.

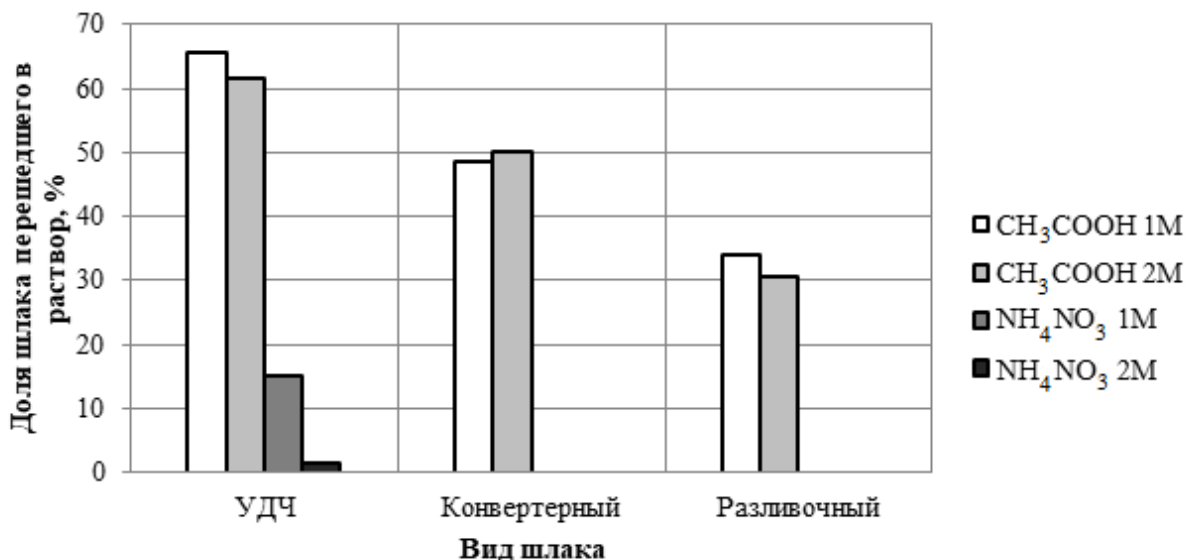
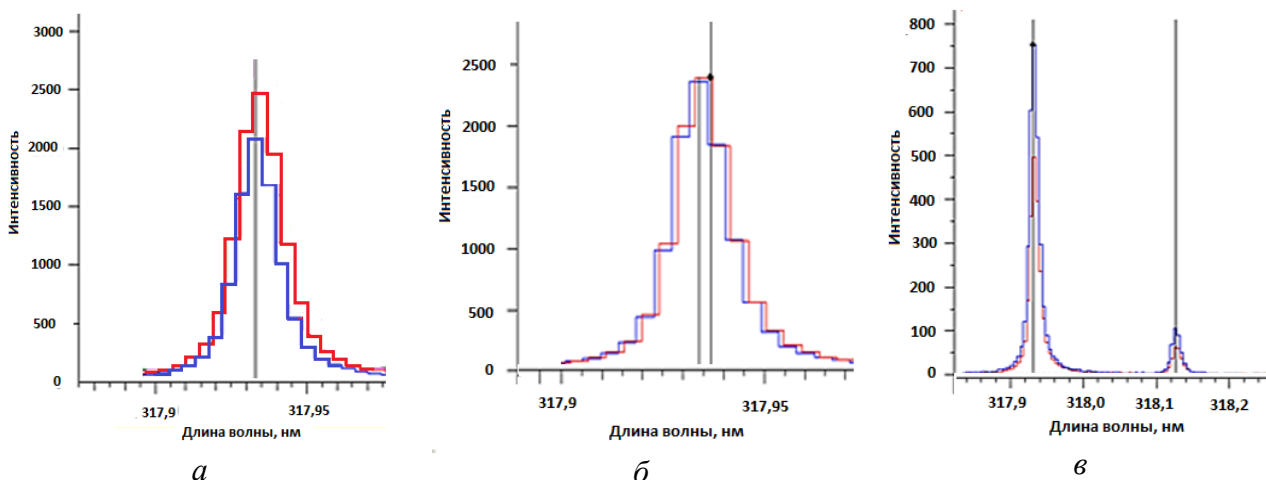


Рис. 4. Доля перехода сталеплавильных шлаков в раствор в зависимости от типа растворителя и его концентрации

После фильтрации растворов и их осаждения раствором соды были получены кристаллические порошки белого цвета (рис. 7), пробы которых подвергли анализу методом атомно-эмиссионной спектроскопии и «мокрой химии». Спектры осадков представлены на рис. 5, а интенсивность оксида кальция представлена в табл. 2. В качестве стандартного образца использовали

материал, содержащий 55,80 % оксида кальция, чему соответствует интенсивность 2289.

С помощью атомно-эмиссионной спектроскопии установили состав фильтрата от шлака УДЧ и конвертерного шлака, включавшие кремний, фосфор, хром, магний, марганец, железо, никель и алюминий.



*а* – шлак УДЧ; *б* – конвертерный шлак; *в* – разливочный шлак (синий - при растворении шлака в 1М CH<sub>3</sub>COOH, красный - при растворении шлака в 2М CH<sub>3</sub>COOH)

Рис. 5. Эмиссионный спектр осадка, полученного из раствора металлургических шлаков

**Интенсивность оксида кальция в эмиссионном спектре осадка, полученного из раствора металлургических шлаков**

Интенсивность оксида кальция	Растворитель	Шлак		
		УДЧ	Конвертерный	Разливочный
	CH <sub>3</sub> COOH 1M	2072	2358	751
	CH <sub>3</sub> COOH 2M	2477	2396	495

Пересчёт показал, что содержание CaO в осадке, полученном из шлака УДЧ, составляет 50,5–56 %, из конвертерного шлака – 56 %, из разливочного шлака – 12,1–18,3 %. Таким образом, можно утверждать, что разливочный шлак не подходит в качестве сырья в силу низкого содержания оксида кальция в осадке. Максимальное теоретическое содержание CaO в осадке из конвертерного шлака означает, что совместились спектры CaO и другого элемента, возможно наложился матричный эффект – состав веществ, которые входят в исследуемый раствор.

Для уточнения был выполнен химический анализ содержания CaO и MgO в осадке, полученном из раствора шлака УДЧ и конвертерного шлака. Содержание CaO в каждой из проб составило 53,2 %, а содержание MgO в шлаке УДЧ – 0,65%, в конвертерном – 0,34 %. Пересчёт оксидов кальция и магния в их карбонаты показал, что суммарное содержание CaCO<sub>3</sub> и MgCO<sub>3</sub> составляет

более 96 %, что вплотную приближается к нижнему пределу содержания данных оксидов в меле химически осаждённом второго сорта (97 %), согласно ГОСТ 8253-79 «Мел химически осаждённый. Технические условия».

Учитывая, что при осаждении карбонатов использовался раствор соды, часть которого также выпала в виде осадка, можно утверждать о достаточно высокой эффективности процесса с точки зрения чистоты продукта.

Степень перехода CaO в продукт из исходного шлака рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{m_{\text{пр}} \cdot \alpha}{m_{\text{исх}} \cdot \beta} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $m_{\text{пр}}$  – масса продукта (осаждённый карбонат кальция), г;  $\alpha$  – содержание оксида кальция в продукте, %;  $m_{\text{исх}}$  – масса шлака, г;  $\beta$  – содержание оксида кальция в шлаке, %.

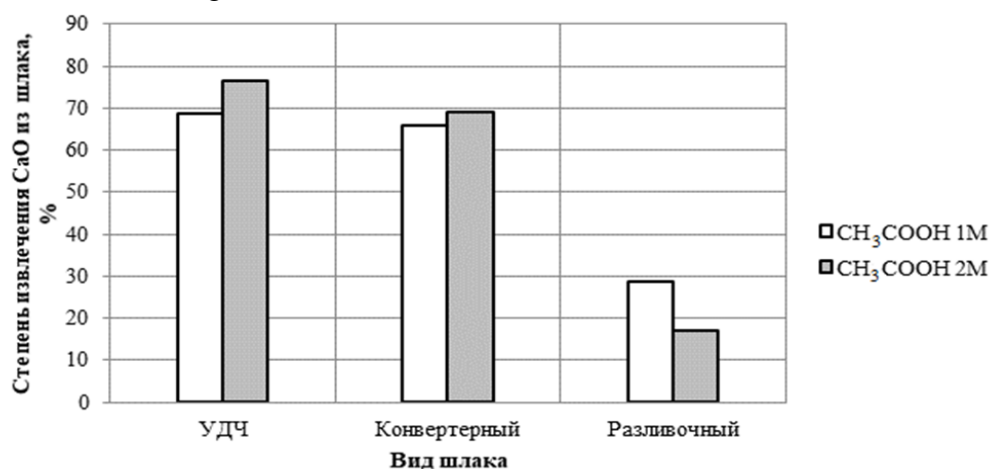


Рис. 6. Результаты расчёта степени перехода оксида кальция в продукт из различных видов шлака

Степень извлечения CaO 66-76 % в конечный продукт можно считать достаточно высокой для подобной одностадийной схемы. В случае увеличения количества стадий можно повысить эффективность селективного растворения, например, авторы [13] добились 98 % извлечения Ca.

Технологическая реализация данного процесса возможна с использованием стандартного оборудования гидрометаллургии по уже освоенным технологиям, а в качестве сырья возможно применение слабо востребованной фракции сталеплавильного щебня крупностью 0-5 (0-10 мм), прошедшего сухую магнитную сепарацию.

Получение мела химически осаждённого должно входить в цепочку

связанных процессов по комплексной переработке сталеплавильного щебня, которое также должно включать тонкое измельчение и последующую сухую [14] или мокрую магнитную сепарацию [15], возможно применение и гравитационного обогащения [16, 17]. Согласно данным, представленным в источниках [14, 15], из щебня дополнительно можно извлечь до 70% оксидов железа с получением концентрата содержащего 51-55 % Fe<sub>общ.</sub>. Оставшийся после извлечения оксида кальция и оксидов железа продукт ориентировочного химического состава (10-20 % Fe, 25-35 % SiO<sub>2</sub>, 32-42 % CaO, 5-9 % MgO, 3-7 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) близок по химическому составу к доменному шлаку, который является сырьём для получения цемента.

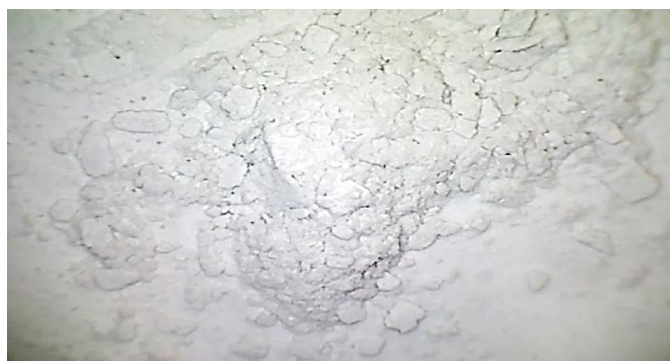


Рис. 7. Микрофотография продукта (осажденный карбонат кальция) на бумажном фильтре, полученного из раствора шлака УДЧ, увеличение  $\times 5$

## ВЫВОД

В лабораторных условиях подтверждена возможность применения некоторых видов сталеплавильных шлаков (шлак установки десульфурации чугуна, конвертерный шлак) для получения искусственного карбоната кальция высокой чистоты с суммарным содержанием карбоната кальция и карбоната магния более 96 %. Технология

извлечения предполагает растворение в уксусной кислоте оксида кальция и его последующее осаждение с помощью содового раствора в виде карбоната, степень извлечения CaO достигает 65–76 %. Наиболее эффективный результат (содержание CaCO<sub>3</sub> в осадке – 95 %, MgCO<sub>3</sub> – 1,34 %, степень извлечения CaO – 76,52 %) был получен при использовании в качестве сырья шлака УДЧ и растворителя – уксусной кислоты 2М.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году : государственный доклад. – Текст: электронный // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : официальный сайт. – URL: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyu\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2017/](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyu_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2017/) (дата обращения: 14.04.2019).

2. Hiltunen, R. Environmental aspects of utilization of steel industry slag. / R. Hiltunen, A. Hiltunen. – Text: immediate // VII International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts. – 2004. – P. 357-361.

3. **Шакуров, А.Г.** Разработка инновационной технологии переработки жидких сталеплавильных шлаков на основе исследования процессов ускоренного затвердевания : специальность 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шакуров Амир Галиевич ; Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина. – Москва, 2014. – 25 с. – Текст : непосредственный.

4. **Михайлов, В.Г.** Исследование и разработка технологии спекания металлургических отходов на базе руд и концентратов КМА : специальность 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Михайлов Валентин Геннадьевич ; ЛГТУ. – Липецк, 2007. – 23 с. – Текст: непосредственный.

5. European Slag Association. Statistics 2016. – Текст: immediate. – URL: <http://www.euroslag.com/status-of-slag/legislation/> (дата обращения: 24.05.2019).

6. Использование сталеплавильных шлаков для производства карбоната кальция / S. Eloneva [и др.]. – Текст:

непосредственный // Новости чёрной металлургии за рубежом. – 2010. – № 3. – С. 86-90.

7. Продукция – мел химически осажденный (CaCO<sub>3</sub>). – Текст: электронный // ООО "Реактив" : сайт. – URL: <http://www.reaktiv.dn.ua/rus/product1.html> (дата обращения: 30.04.2019).

8. Паспорта на продукцию. – Текст: электронный // ООО ТД "РУСТОКС" : сайт. – URL: <http://www.rustox.ru/informatsiya/pasporta-na-produktsiyu> (дата обращения: 30.04.2019).

9. **Патент 2509724** С1 Российская Федерация, МПК С01F 11/18, С01С 1/18, С01С 1/24, С05G 1/00. Способ получения высокочистого углекислого кальция и азотно-сульфатного удобрения в процессе комплексной переработки фосфогипса : № 2012134522/05 : заявл. 13.08.2012 : опубл. 13.08.2012. Бюл. № 8 / Муллаходжаев Т.И., Олифсон А.Л. ; заявитель и патентообладатель ООО Инженерно-производственная компания "Интерфос". – Текст: непосредственный

10. **Патент 2312065** Российская Федерация. МПК С01F 11/18, Способ получения химически осажденного мела : № 2006108693/15 : заявл. 20.03.2006 : опубл. 10.12.2007. Бюл. № 34 / Захарова Л.З., Абрамов И.Е., Расулев З.Г., Казаков Б.А., Ануфриева Н.А. ; заявитель и патентообладатель ОАО "Каустик". – Текст: непосредственный

11. **Патент 2596827** С2 Российская Федерация, МПК С01F 11/18, С01В 31/24, С09С 1/02, С09С 3/06. Осажденный карбонат кальция из отходов целлюлозного завода, имеющий повышенную степень белизны, способ его получения и использование : № 2013155614/04 : заявл. 08.05.2012 : опубл. 10.09.2016. Бюл. № 25 / Поль М., Шмельцер Т. ; заявитель и патентообладатель ОМИА ИНТЕРНЭШНЛ АГ. – Текст: непосредственный.

12. Калькулятор магнитной силы // ООО «Полимагнит» : сайт. – Текст: электронный. – URL:

<http://www.ndfeb.ru/calc/> (дата обращения: 20.06.2024).

13. Методика селективного растворения, адаптированная к донным отложениям с высоким содержанием карбонатов / Ю.С. Восель, И.В. Макарова, С.В. Восель, В.Д. Страховенко. – Текст: непосредственный // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24, № 9. – С. 14-21.

14. **Захаров, И.П.** Повышение эффективности обогащения сталеплавильных шлаков за счет применения сухой магнитной сепарации во взвешенном состоянии : специальность 25.00.13 "Обогащение полезных скопаемых" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Захаров Иван Петрович ; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2005. – 19 с. – Текст: непосредственный.

15. **Патент 2056948** С1 Российская Федерация, МПК В03В 9/04(2006.01), В03С 1/00(2006.01). Способ переработки металлургических шлаков : № 94042077/03 : заявл. 24.11.1994 : опубл. 27.03.1997.

Сведения об авторах:

**Михайлов Валентин Геннадьевич**  
к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

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

**Карпов Антон Владимирович**

к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий,

Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Бюл. № 25 / Бабушкин В.Н., Гельбинг Р.А., Костин К.Н., Кузнецов А.И., Петухов О.И., Рахимгулов Р.Ф. ; заявители и патентообладатели Бабушкин В.Н., Гельбинг Р.А., Костин К.Н., Кузнецов А.И., Петухов О.И., Рахимгулов Р.Ф. – Текст: непосредственный.

16. **Патент 2645629** С1 Российская Федерация, МПК С22В 7/04(2006.01). Способ переработки отвальных металлургических шлаков : № 2016148775 : заявл. 12.12.2016 : опубл. 26.02.2018. Бюл. № 9 / Чуманов И.В., Чуманов В.И., Пирожков Е.В. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». – Текст: непосредственный.

17. **Патент 2365642** С2 Российская Федерация, МПК С22В 7/04(2006.01), С21С 5/54(2006.01). Способ переработки сталеплавильных шлаков : № 2007132511/02 : заявл. 28.08.2007 : опубл. 27.08.2009. Бюл. № 5 / Сукинова Н.В., Мурзина З.Н., Коваленкова Е.Ю. ; заявитель и патентообладатель ПАО «ММК». – Текст: непосредственный.

Information about authors:

**Mikhailov Valentin Gennadevich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University,

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

**Karpov Anton Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies,

Lipetsk State Technical University,

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.

А.А. ШИПЕЛЬНИКОВ, А.Н. РОГОТОВСКИЙ, С.А. ТОЛМАЧЕВ

**АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ  
РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА СЛЯБОВЫХ МНЛЗ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В статье рассматривается проблематика улучшения техники и технологии непрерывной разливки стали на слябовых МНЛЗ в условиях производства действующих конверторных цехов металлургических комбинатов. Представлены основные мероприятия, направленные на повышение качества слябов и производительности МНЛЗ. Дана оценка наиболее перспективным технологическим решениям, направленных на улучшение технологии разливки стали.

**Ключевые слова:** разливка стали, МНЛЗ, слябы, качество, развитие, технологии.

A.A. SHIPELNIKOV, A.N. ROGOTOVSKY, S.A. TOLMACHEV

**CURRENT DIRECTIONS FOR IMPROVING STEEL CASTING TECHNOLOGY  
IN SLAB CONTINUOUS CASTING MACHINES**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The article examines the challenges of improving continuous steel casting technology in slab continuous casting machines (CCMs) in the operating converter shops of metallurgical plants. Key measures aimed at improving slab quality and CCM productivity are presented. The most promising technological solutions for improving steel casting technology are assessed.

**Keywords:** steel casting, CCM, slabs, quality, development, technology.

**ВВЕДЕНИЕ**

В современных сталеплавильных цехах разливку стали осуществляют на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Преимущества непрерывной разливки стали по сравнению с разливкой в изложницы огромны. Например, если при разливке стали в изложницы возвращается в переплав около 20–30 % стали (в виде обрезки слитков и элементов литниково-питающей системы), то при непрерывной разливке эта величина не превышает 3 % вместе со всеми технологическими сливами и потерями металла. Считается, что перевод технологии разливки стали с изложниц на МНЛЗ позволяет на каждой тонне сэкономить порядка от 150 до 200 кг металла. В отличие от разливки в изложницы при непрерывной разливке

получают не слиток, а заготовку заданной конфигурации, поэтому нет необходимости иметь в составе завода или цеха участки со слябингами и блюмингами; полученные слитки сразу поступают в прокатные цеха. Кроме того, в составе цеха при непрерывной разливке нет изложниц и нагревательных колодцев. В целом технология разливки стали на МНЛЗ более легко и в большей степени поддается автоматизации. Разрабатываются агрегаты для совмещения непрерывной разливки с прокаткой. Особенностью организации технологии разливки стали на МНЛЗ является наличие двух зон охлаждения и формирование тела слитка в установке. Первая наиболее ответственная зона установки – кристаллизатор, в котором формируется прочная и бездефектная «корочка» –

оболочка слитка. Толщина этой оболочки на выходе из слябовых кристаллизаторов составляет всего 22–25 мм на сторону. Выходящая из кристаллизатора заготовка с полностью жидкой периферией и сердцевинной попадает в зону вторичного охлаждения (ЗВО), где на её поверхность вдоль широких граней слитка подаётся из водо-воздушных форсунок распылённая вода. Основная задача ЗВО состоит в монотонном снижении температуры поверхности слитка вплоть до его полного затвердевания в серединной части на металлургической длине машины. *Металлургическая длина машины* – это некоторое расстояние  $L$  (м) от уровня металла в кристаллизаторе до места, где заканчивается кристаллизация заготовки толщиной  $a$  (м), отливаемой со скоростью  $v$  (м/мин), рассчитывается по выражению:

$$L = (240-340) \cdot a^2 \cdot v. \quad (1)$$

Значение полуэмпирического поправочного коэффициента  $a$  зависит от профиля и размера заготовки и от марки разливаемой стали. Именно металлургическая длина машины является расчетным фактором, связывающим толщину заготовки и максимальную линейную скорость разливки.

После затвердевания по всему сечению заготовка разрезается машиной газовой резки на части требуемой длины. Далее полученные слябы отправляются на маркировку по отводящему рольгангу и в стопах с одной плавки передаются на склад слябов для охлаждения и осмотра на предмет выявления дефектов поверхности.

При отливке заготовок относительно большой толщины (свыше 250 мм) участок её резки может располагаться на удалении в 15–20 м от кристаллизатора, а общая высота МНЛЗ может превышать 40–50 м. Для размещения такой МНЛЗ требуется сооружение башен или колодцев (рис. 1, а). Стремление уменьшить высоту МНЛЗ привело к созданию установок радиального (рис. 1, б) и криволинейного (рис. 1, в) типов. На радиальных МНЛЗ кристаллизатор и направляющие устройства вторичного охлаждения расположены на дуге определённого радиуса  $R$  (м) с учётом толщины отливаемой заготовки  $a$  (м):

$$R = (30 \div 40) \cdot a \quad (2)$$

В конце радиального участка заготовка проходит через правильно-тянущие ролики и выводится в горизонтальное положение, в котором производится резка на мерные длины.

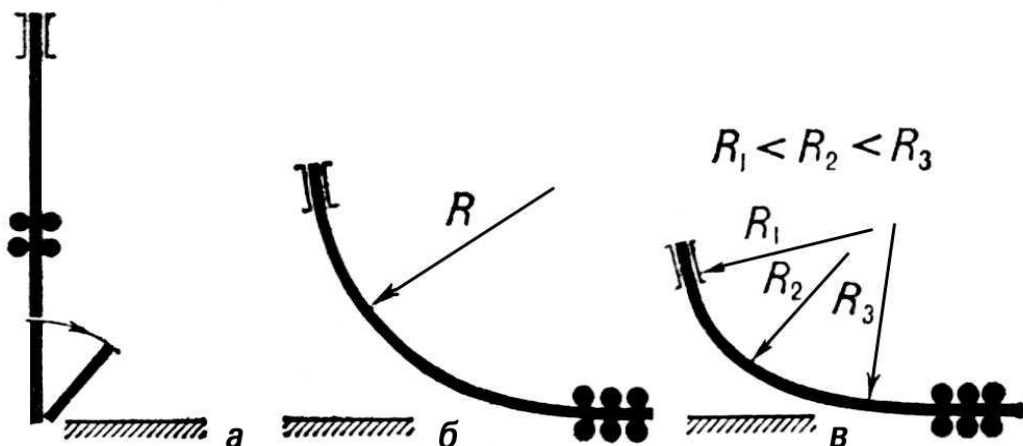


Рис. 1. Схемы МНЛЗ вертикального (а), радиального (б) и криволинейного (в) типов

На МНЛЗ криволинейного типа кристаллизатор и часть зоны вторичного охлаждения имеют постоянный радиус, а затем радиус постепенно увеличивается, и происходит более плавное выпрямление заготовки. Это позволяет существенным образом сократить количество и степень

развития различного рода трещи на поверхности в макроструктуре слитков при одновременном некотором увеличении линейной скорости разливки. Поэтому МНЛЗ криволинейного типа, у которых неп полностью затвердевшая заготовка выходит на горизонтальный участок,

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

позволяют значительно повысить скорость разливки при крупных сечениях заготовки, так как участок резки может быть расположен на 30–35 м от кристаллизатора. Общая высота таких установок не превышает 12 м от отметки «0» на уровне отводящего рольганга и до рабочей площадки стенда сталеразливочного ковша.

В настоящее время на МНЛЗ отливаются заготовки квадратного сечения размером от 50x50 до 300x300 мм, плоские слябы толщиной от 50 до 300 мм и шириной от 300 до 2000 мм, круглые заготовки диаметром от 100 до 550 мм, в последствии из которых получают трубы, сортовой и листовой прокат, поковки [1–2].

С середины 80-х г.г. XX века и до сих пор технология непрерывной разливки стали на слябы постоянно совершенствуется, включая как общие параметры технологии, так и улучшение работы отдельных технологических элементов с оптимизацией функционирования МНЛЗ с производственной цепочкой цеха. При этом развитие процессов непрерывного литья слябов происходит в условиях ужесточающейся конкурентной борьбы на мировом рынке, основными требованиями которого являются повышение качества продукции при одновременном снижении ее себестоимости.

В настоящее время около 75 % отливаемых непрерывным литьем заготовок разливается на слябовых МНЛЗ. Основными производителями непрерывнолитых слябов в мире являются Япония, США, КНР, Германия, Корея и Россия. На их долю приходится более двух третей мирового объема производства слябов, при общемировом количестве слябовых МНЛЗ свыше 550 с общим числом ручьев более 800 шт.

Подытоживая данные обзора различных источников [1, 2, 6–8] можно заключить, что в настоящее время МНЛЗ для получения классического по размерам сляба (порядка 180-250x950-2000x4500-12000 мм) претерпевают существенные конструкционные изменения, а именно:

1) предпочтение отдается МНЛЗ с вертикальным кристаллизатором, что обеспечивает повышение качества заготовки при одновременном росте производительности в 1,4–1,5 раза;

2) применяется криволинейная схема технологической линии МНЛЗ с многоточечным загибом и разгибом тела слитка;

3) предусматривается возможность изменения ширины заготовки в процессе разливки (например, УНРС-4, 6 КЦ-1 ПАО «НЛМК»);

4) увеличивается вместимость промежуточного ковша до 40–50 т и используется система перегородок, в том числе с возможностью подачи аргона, для управления гидродинамикой расплава;

5) обязателен непрерывный замер температуры металла в промежуточном ковше, иногда – в кристаллизаторе, и в отдельных зонах движения заготовки в зоне вторичного охлаждения;

6) расширяется применение технологии подогрева металла непосредственно в промежуточном ковше;

7) некоторые операции по доводке стали переносятся в промежуточный ковш: продувка аргоном, обработка порошковой проволокой и пр.;

8) ужесточаются требования к защите стали от вторичного окисления на всем этапе движения стали от ковша до кристаллизатора в цепи: «сталеразливочный ковш – защитная труба – промежуточный ковш – погружной стакан кристаллизатор»;

9) все большее распространение получает технология «мягкого» обжата

металла в зоне вторичного охлаждения (ЗВО);

10) применяется электромагнитное перемешивание металла ниже кристаллизатора;

11) уменьшается диаметр поддерживающих роликов в ЗВО;

12) обязательно используется система автоматического контроля уровня металла в кристаллизаторе, а также система автоматической подачи ШОС (шлаковых смесей) в кристаллизатор.

В результате данных изменений существенно повышается производительность МНЛЗ, улучшается качество поверхности и внутренней структуры сляба, снижаются затраты на строительство машины и её обслуживание. Фундаментальное изменение представлений о современной слябовой МНЛЗ привело к тому, что большинство машин в странах Европы, Японии и США подвергаются серьезной реконструкции. Необходимость повышения производительности слябовых МНЛЗ во многом определяется практикой кислородно-конвертерной плавки: увеличение среднесуточной и среднемесячной производительности современных конвертеров от 25 до 30 % при продолжительности основного периода продувки менее 15 минут диктует поиск резервов повышения производительности МНЛЗ.

Общее развитие мирового рынка металлопродукции свидетельствует о том, что все большее предпочтение отдается слябовой заготовке толщиной от 150 до 200 мм при ее ширине от 1000 до 1200 мм. Для большего количества уже действующих МНЛЗ выполнение этих требований приводит к снижению средней производительности машины по сравнению с проектной возможностью.

Сегодня на мировом рынке производителей металлургического оборудования есть несколько любопытных предложений, касающихся различных технических улучшений технологии непрерывной разливки стали. Так, например, безусловный лидер на европейском рынке металлургического оборудования фирма «FAI» специально для слябовых МНЛЗ разработала технологию «мягкого обжата SMART/ASTC» (рис. 2), предусматривающую полное автоматическое управление конусом ручья (ASTC), совместно с использованием сегментов «SMART», регулируемых с помощью гидроприводов. Общее количество пар обжимающих роликов в таких сегментах может быть до 20 и более, что гарантирует дифференцирование изменения нагрузки на широкую грань слитка по длине ЗВО.

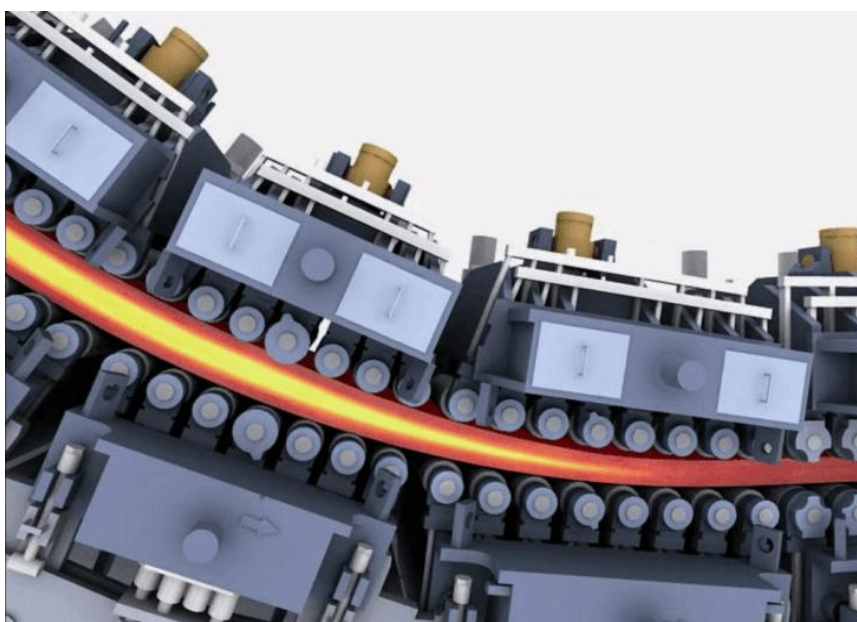
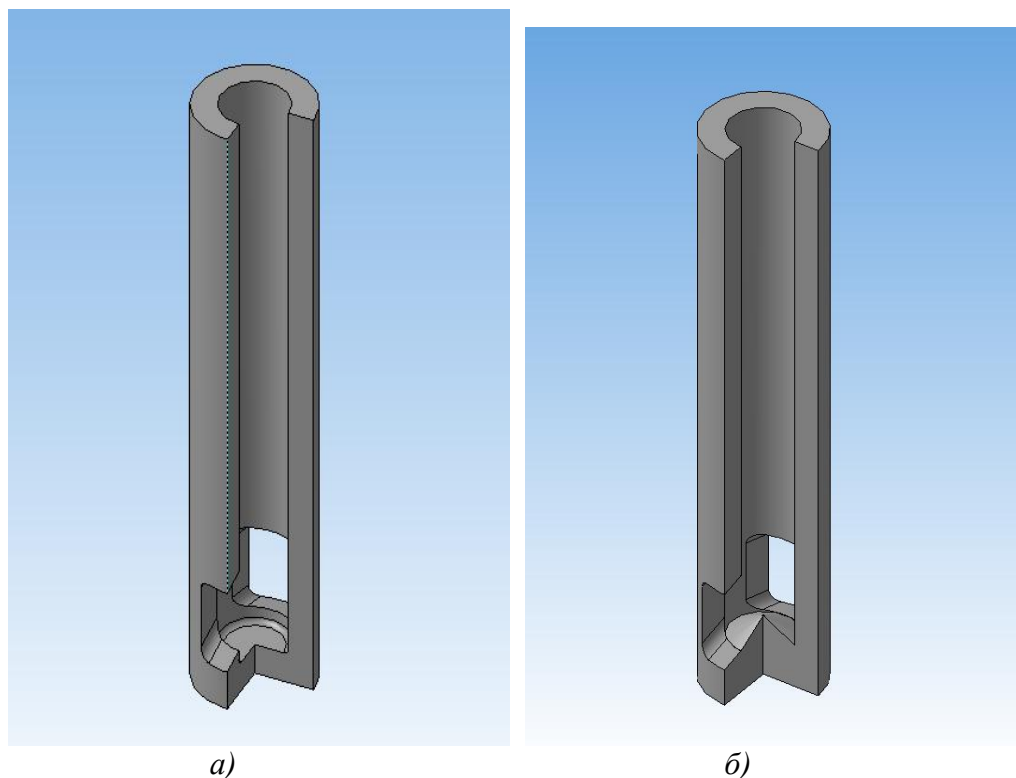


Рис. 2. Расположение сегментов «SMART/ASTC» для «мягкого обжата» непрерывнолитых слябов

Определение значений раствора роликов с использованием «ASTC» осуществляется с помощью модели термического отслеживания. За счет большего количества обжимающих роликов степень обжатия на слябовой МНЛЗ меньше и составляет 1–2 мм/м. Точка приложения обжатия сдвигается в зависимости от металлургической длины МНЛЗ (см. 1).

Важным направлением совершенствования слябовых МНЛЗ является улучшение конструкции внутреннего рабочего пространства промежуточных ковшей, в том числе за счет применения модификаторов потока и донных балок для подачи аргона. Задачи поиска наиболее рациональной конструкции ковшей,

увеличения емкости и резидентного времени пребывания расплава должны решаться совместно с подбором наиболее подходящего варианта конструкции погружного стакана кристаллизатора [3–5]. Конструкция головной части погружного стакана (рис. 3), в первую очередь, количество, форма, размер и угол наклона к вертикали сталевыпускных отверстий, должна подбираться с учетом влияния ширины отливаемой заготовки, скорости разливки, высоты кристаллизатора, а для криволинейных МНЛЗ еще и с учетом высоты вертикальной части ЗВО под кристаллизатором, и в несколько меньшей степени, – температуры разливаемой стали [5].



а) – стакан с ловушкой; б) – стакан с рассекателем

Рис. 3. 3D-модели погружных стаканов с различной конфигурацией донной части

Только совместное управление гидродинамикой расплава в промежуточном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ позволит добиться значимых результатов в снижении отсортировки металлопроката по дефектам сталеплавильного происхождения.

При повышении качества внутренних

зон непрерывнолитых слябов особое внимание уделяется условиям движения заготовки в зоне вторичного охлаждения. Помимо развития ликвации в ходе затвердевания, на качество заготовки существенно влияют интенсивность охлаждения, ферростатическое давление, соблюдение геометрических размеров в

зависимости от установки направляющих роликов и пр. По свидетельству ряда источников [2, 5, 7–8], эта задача достаточно успешно решается при использовании метода «мягкого» обжатия заготовки в конце жидкой зоны на металлургической длине машины (см. уравнение 1). Основные положительные эффекты указанного метода: значительное подавление осевой пористости, снижение коэффициента осевой ликвации и улучшение условий формирования кристаллической структуры в зоне равноосных кристаллов, уменьшение V-образной ликвации.

Можно сформулировать общие тенденции развития процессов непрерывной разливки стали на слябовых МНЛЗ:

1) в предстоящие 2026–2030 гг. существенного увеличения объема производства слябов происходить не будет, а основное внимание будет уделяться проблемам качества заготовки, снижения издержек на разливку и т.п.;

2) повышение качества поверхности слябов будет достигаться модернизацией конструкции кристаллизаторов с использованием гидропривода для механизма качания;

3) улучшение параметров течения металла в кристаллизаторе за счет использования погружных стаканов оптимальной геометрической формы и метода электромагнитного перемешивания;

4) развитие функциональных возможностей промежуточного ковша, повышение его эксплуатационных показателей и улучшение возможностей по доводке стали;

5) использование систем прогрессивного многоточечного загиба и разгиба заготовки для уменьшения пораженности заготовки внутренними трещинами;

6) применение метода «мягкого» обжатия заготовки с жидкой сердцевинной для снижения развития осевой пористости и ликвации;

7) развитие концепции непрерывного литья тонких слябов с их обжатием и последующей прокаткой в горячем

состоянии и соответствующим повышением конкурентоспособности мини-заводов на мировом рынке листовой продукции;

8) повышение степени автоматизации работы МНЛЗ с включением в единую систему всех параметров жидкой стали, условий охлаждения стали в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения при наличии обратной связи с оператором МНЛЗ.

Одним из направлений улучшения слябовых МНЛЗ является удовлетворение возрастающих требований к качеству продукции. К приоритетным направлениям совершенствования конструкции слябовых МНЛЗ относится применение гидравлического привода для обеспечения качания кристаллизатора при использовании несинусоидального закона колебаний. Гидравлическая система привода кристаллизатора обеспечивает оперативное варьирование амплитуды и частоты колебаний кристаллизатора, также изменение формы кривой колебаний при задании различной скорости движения с предотвращением вибраций кристаллизатора. Гидропривод кассеты кристаллизатора обеспечивает более безопасную и быструю замену кристаллизатора, более удобное обслуживание привода кристаллизатора и значительное уменьшение общей массы движущихся в процессе качаний частей. Подобные кристаллизаторы принято называть Smart-кристаллизаторами.

Дополнительным и перспективным фактором, способствующим повышению качества поверхности сляба, может стать применение метода наложения на кристаллизатор горизонтальных колебаний, которые синхронизированы с качаниями в вертикальной плоскости. По мнению различных исследователей, этот метод значительно уменьшает следы качания на поверхности сляба и, соответственно, число прорывов металла под кристаллизатором.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно заключить, что использование современной технологии непрерывной разливки стали требует жесткого

соблюдения всех технологических режимов производства, высокой культуры труда и уровня подготовки обслуживающего персонала и неотрывно связано с автоматизацией и компьютеризацией работы как отдельных узлов и механизмов, так и всей МНЛЗ в целом. Множество вопросов еще остаются нерешенными, однако, наличие различного рода разработок как в области улучшения параметров разливки, так и в области совершенствования отдельных узлов слабовых МНЛЗ, с одновременным увеличением степени компьютеризации управления АСУ разливкой, позволяет надеяться не только на сохранение

высокого уровня организации технологии, но и на поэтапное, пусть и не быстрое в рамках ближайших лет, наращивание качественного опережения относительно темпов развития технологий выплавки и внепечной обработки стали. В условиях ритмичной и высокопроизводительной работы конверторных цехов разливка стали на МНЛЗ остается технологическим звеном, сдерживающим производительность цеха. Это необходимо решать в ближайшие десятилетия для качественного сдвига улучшения технологического процесса в условиях сталеплавильных производств металлургических комбинатов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев [и др.]. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с. – Текст : непосредственный.

2. Miki, Yu. Applications of MHD to continuous casting of steel / Yu. Miki. – Text: immediate // The 5<sup>th</sup> International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006», October 23-27, 2006. – Sendai (Japan), 2006. – P. 26-30.

3. Шипельников, А.А. Моделирование режимов продувки металла аргонном в сталеразливочных ковшах КЦ-1 ПАО «НЛМК» / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Н.А. Бобылева, А.В. Павловский. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 2 (51). – С. 57-70.

4. Моделирование истечения расплава из погружных стаканов с учетом различной конфигурации донной части и вертикального участка машины непрерывного литья заготовок / А.А. Шипельников, А.Н. Роговский, Н.А. Бобылева, С.В. Скаков. – Текст: непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. № 7. – С. 3-7.

5. Роговский, А.Н. Исследование взаимосвязи температуры со скоростью движения расплава на различных сечениях погружных стаканов в слабовом кристаллизаторе / А.Н. Роговский, И.М. Володин, А.А. Шипельников. – Текст: непосредственный // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 10. – С. 3-7.

6. Simulation of the hydrodynamics of the bath in the tundish of the ccm during the process of purging steel with argon when using flow modifiers / А.А. Shipelnikov, S.V. Skakov, N.A. Bobyleva [et al.]. – Text: immediate // Steel in Translation. – 2021. – Т. 51, № 12. – P. 893-898.

7. Марукович, Е.И. Перспективы применения систем затопленно-струйных охлаждений кристаллизатора и слитка при разливке стали на МНЛЗ / Е.И. Марукович, В.А. Маточкин, В.Ю. Стеценко. – Текст: непосредственный // Сборник научных трудов «Металлургия». № 31. – Минск, 2008. – С. 12-19.

8. Hanazaki, K. Present monitoring technology and equipment in continuous casting mold and a future view / K. Hanazaki, H. Miura, K. Katogi. – Text: immediate // The 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials «EPM 2006», October 23-27, 2006. – Sendai (Japan), 2006. – P. 94-97.

Сведения об авторах:

**Шипельников Алексей Александрович**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры металлургических технологий,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[ashipelnikov@yandex.ru](mailto:ashipelnikov@yandex.ru)

**Роговский Александр Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой металлургических  
технологий,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[arogotovskij@yandex.ru](mailto:arogotovskij@yandex.ru)

**Толмачев Семен Александрович**  
магистрант кафедры металлургических  
технологий,  
Липецкий государственный технический  
университет.  
398055, Россия, г. Липецк,  
ул. Московская, д. 30.  
[sema.tolmachev.02@mail.ru](mailto:sema.tolmachev.02@mail.ru)

Information about the author:

**Shipelnikov Aleksey Aleksandrovich**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of  
Metallurgical Technologies  
Lipetsk State Technical University.  
398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st.,  
30.  
[ashipelnikov@yandex.ru](mailto:ashipelnikov@yandex.ru)

**Rogotovskiy Alexander Nikolaevich**  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Head of the Department  
of Metallurgical Technologies  
Lipetsk State Technical University.  
398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st.,  
30.  
[arogotovskij@yandex.ru](mailto:arogotovskij@yandex.ru)

**Tolmachev Semyon Aleksandrovich**  
Master's student of the Department of  
Metallurgical Technologies,  
Lipetsk State Technical University.  
398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya st.,  
30.  
[sema.tolmachev.02@mail.ru](mailto:sema.tolmachev.02@mail.ru)

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_63  
УДК 62-932.4

Д.А. ИВАНЫЧЕВ, Д.И. БАЛЫКИН, Д.В. ЕЗДАКОВА

**РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С УЧАСТИЕМ  
МАССОВЫХ СИЛ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** в работе представлена математическая модель определения напряженно-деформированного состояния трансверсально-изотропного тела вращения в условиях первой, второй, смешанной и контактной задач теории упругости. На область тела дополнительно действуют массовые силы. Суммарное состояние является не суммой двух состояний от действия каждого фактора, а результат совокупного механического воздействия на внешность и область тела. Для определения упругого поля применен метод граничных состояний. Разработаны методики формирования базисов внутренних и граничных состояний, сопряженных изоморфизмом, сформулированы определяющие соотношения.

**Ключевые слова:** метод граничных состояний, осесимметричные задачи, тела вращения, краевые задачи, массовые силы.

D.A. IVANYCHEV, D.I. BALYKIN, D.V. EZDAKOVA

**SOLUTION OF ELASTIC BOUNDARY VALUE PROBLEMS VIA BODY FORCES**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The paper presents a mathematical model for determining the stress-strain state of a transversely isotropic body of revolution under the conditions of the first, second, mixed and contact problems of elasticity theory. Additional body forces act on the body area. The total state is not the sum of two states resulting from each factor, but the result of a combined mechanical effect on the outside and the area of the body. The boundary state method is used to determine the elastic field. Methods of forming bases of internal and boundary states conjugated by isomorphism are developed, defining relations are formulated.

**Keywords:** boundary state method, asymmetric problems, bodies of revolution, boundary value problems, body forces.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается трансверсально-изотропное тело, ограниченное одной или несколькими коаксиальными поверхностями вращения. На границе тела (рис. 1), могут быть заданы усилия  $R_n, Z_n$  (первая основная задача), перемещения

(вторая основная задача) или комбинации того и другого (основная смешанная и контактная задачи), одновременно с этим на тело действуют массовые силы  $\mathbf{X}$ . Все внешние условия, включая массовые силы, носят осесимметричный характер относительно оси вращения  $z$ .

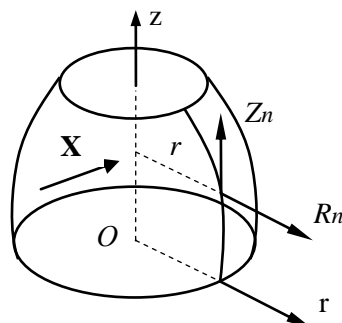


Рис. 1. Изолинии компонент полученного вектора перемещения

Решение поставленной задачи можно провести простым путем: сначала решить краевую задачу механики от условий на границе, затем отдельно решить задачу по определению упругого состояния от массовых сил и полученные поля механических характеристик сложить. Однако в этом случае сложно проводить анализ полученного результата исходя из теорий прочности и жесткости, возникает необходимость дискретно корректировать граничные условия в краевой задаче, что составляет непростую и трудоемкую задачу, особенно если граница тела частично или полностью закреплена. Например, естественно, что напряжения внутри тела, находящегося под действием сил инерции со свободной границей, отличаются от напряжений в том же теле с закрепленной границей, вопрос состоит в том, каким образом происходит это перераспределение.

Целью работы является создание подхода на основе метода граничных состояний, позволяющего получать

упругие поля от совокупного воздействия нескольких физических факторов, при этом эти поля должны удовлетворять заданным условиям на границе и внутри области.

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения поставленных задач используется метод граничных состояний (МГС) [1]. МГС является энергетическим методом решения задач уравнений математической физики. Он показал свою эффективность в решении краевых задач теории упругости как для изотропных, так и для анизотропных сред, в решении задач термоупругости, гидродинамики идеальной жидкости, динамики (колебаний) изотропных тел и др.

Фундамент метода составляют пространства внутренних  $\Xi$  и граничных  $\tilde{A}$  состояний:

$$\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k, \dots\}; \quad \tilde{A} = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_k, \dots\}.$$

Внутреннее состояние определяется наборами компонент вектора

перемещений, теноров деформаций и напряжений:

$$\xi_k = \{u_i^k, \varepsilon_{ij}^k, \sigma_{ij}^k\}.$$

Воспользуемся при построении решения основных задач механики принципом возможных перемещений при упругом равновесии тела [2]:

$$\int_V \mathbf{X} \mathbf{u} dV + \int_S \mathbf{P}_v \mathbf{u}_v dS - \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV = 0. \quad (1)$$

Придавая перемещениям возможные вариации  $\delta \mathbf{u}$ , из последнего уравнения вытекает в вариационное уравнение Лагранжа [3].

## ПЕРВАЯ ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА

Заданы массовые силы  $\mathbf{X} \in \{R, Z\}$  внутри области и усилия на границе  $\mathbf{P}_v \in \{p_r, p_z\}$ .

Скалярное произведение в пространстве  $\Xi$  внутренних состояний выражается через внутреннюю энергию упругого деформирования (отсюда и принадлежность метода к классу энергетических). Например, для 1-го и 2-го внутреннего состояния тела, занимаемого область  $V$ :

$$(\xi_1, \xi_2) = \int_V \varepsilon_{ij}^1 \sigma_{ij}^2 dv, \quad (2)$$

причем в силу коммутативности состояний среды:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = (\gamma_2, \gamma_1) = \int_S p_i^1 u_{vi}^2 dS + \int_V X_i^1 u_i^2 dV = \int_S p_i^2 u_{vi}^1 dS + \int_V X_i^2 u_i^1 dV. \quad (4)$$

В случае гладкой границы и в силу (4) оба пространства состояний являются гильбертовыми и сопряжены изоморфизмом. По определению, каждому элементу  $\xi_k \in \Xi$  соответствует единственный элемент  $\gamma_k \in \tilde{A}$ , причем это соответствие взаимно-однозначное:  $\xi_k \leftrightarrow \gamma_k$ . Это позволяет отыскание внутреннего состояния свести к построению изоморфного ему граничного состояния. Последнее существенно зависит от краевых условий.

Базисы пространств необходимо проортонормировать. Ортонормирование базиса пространства  $\Xi$  осуществляется по

$$(\xi_1, \xi_2) = (\xi_2, \xi_1) = \int_V \varepsilon_{ij}^1 \sigma_{ij}^2 dV = \int_V \varepsilon_{ij}^2 \sigma_{ij}^1 dV.$$

Граничное состояние  $\gamma_k$ , в зависимости от традиционного  $\gamma_k = \{u_{vi}^k, p_i^k\}$ , определяемого в [1], будем формировать наборами компонент вектора перемещения точек границы  $u_{vi}$ , поверхностными усилиями  $p_i$  и массовыми силами  $X_i$  (последнее условно в силу того, что массовые силы не относятся к элементу поверхности тела):

$$\gamma_k = \{u_{vi}^k, p_i^k, X_i^k\}, \quad p_i^k = \sigma_{ij}^k n_j,$$

где  $n_j$  – компонента нормали к границе.

В пространстве граничных состояний  $\tilde{A}$  согласно (1) скалярное произведение выражает работу внешних сил по поверхности тела  $dS$  и работу массовых сил на перемещениях внутренних точек тела  $u_i$ , например для 1-го и 2-го состояния:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = \int_S p_i^1 u_{vi}^2 dS + \int_V X_i^1 u_i^2 dV, \quad (3)$$

причем в силу принципа возможных перемещений:

разработанному рекурсивно-матричному алгоритму ортогонализации [4], где в качестве перекрестных скалярных произведений принимается (2) и (3).

Проблема сводится к разрешающей системе уравнений относительно коэффициентов Фурье, разложения искомого внутреннего  $\xi$  и граничного  $\gamma$  состояний в ряд по элементам ортонормированного базиса:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \xi_k; \quad \gamma = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \gamma_k$$

или в развернутом виде:

$$p_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k p_i^k ; u_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k u_i^k ; \sigma_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sigma_{ij}^k ; \varepsilon_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \varepsilon_{ij}^k ; X_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k X_i^k . \quad (5)$$

## ВТОРАЯ ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА

Коэффициенты Фурье имеют вид:

$$c_k = \int_V \mathbf{X} \mathbf{u}^k dV + \int_S \mathbf{p}_v \mathbf{u}_v^k dS .$$

где  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{u}_v^k$  – вектор перемещения в  $k$ -ом базисном элементе базисов внутренних и граничных состояний соответственно.

В работе [5] представлено решение первой основной задачи теории упругости с участием массовых сил для трансверсально-изотропного цилиндрического тела из алевролита крупного темно-серого [6].

Заданы массовые силы  $\mathbf{X} \in \{R, Z\}$  и перемещения точек границы  $\mathbf{u}_v \in \{u, w\}$ .

Во второй основной задаче в процессе ортогонализации используются скалярные произведения (2) и (3) соответственно в базисе внутренних и граничных состояний.

Ортонормированность базиса граничных состояний позволяет для его элементов записать:

$$\int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + \int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS + \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + \int_S \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS = 2\delta_{ij} , \quad (6)$$

при этом

$$\int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + \int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS = - \left[ \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + \int_S \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS \right] , \quad i \neq j .$$

Заменяя в (5) базисные механические элементы  $\mathbf{X}^j$ ,  $\mathbf{u}_v^j$  заданными  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{u}_v$  и осуществляя перебор по индексу  $j$ , образуем матрицы коэффициентов:

$$\beta_{ij} = \int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + \int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS ; \alpha_j = \int_V \mathbf{X} \mathbf{u}^j dV + \int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v dS ; \mathbf{A} = [\alpha_j]_N ; \mathbf{B} = [\beta_{ij}]_{N \times N} .$$

## КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА

Следует отметить, что матрица  $\mathbf{B}$  является кососимметричной ( $\beta_{ij} = -\beta_{ji}$ ,  $i \neq j$ ), а в случае первой основной задачи  $\mathbf{B} = \mathbf{A}$ . Коэффициенты Фурье  $c = \{c_k\}_N$  в случае второй основной задачи рассчитываются так:

$$c = \{c_k\}_N = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} , \quad (7)$$

где  $N$  – число используемых элементов базиса. Окончательно решение имеет вид рядов (5).

В работе [7] приведено решение второй основной задачи для трансверсально-изотропного цилиндра.

Заданы массовые силы  $\mathbf{X}$  внутри области. На поверхности контакта заданы граничные условия  $\{p_\tau, u_n\}|S_u$ , на остальной поверхности тела заданы усилия  $\{p_\tau, p_n\}|S_p$ .

(7) Представим работу поверхностных сил в следующем виде (нижний индекс  $v$  в развернутых выражениях опущен):

$$\int_S \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS = \int_{S_u} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_u + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p = \int_{S_u} p_\tau^i u_\tau^j dS_u + \int_{S_u} p_n^i u_n^j dS_u + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p ;$$

$$\int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS = \int_{S_u} p_\tau^j u_\tau^i dS_u + \int_{S_u} p_n^j u_n^i dS_u + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p ,$$

и подставляя их в (5), получим

$$2 \int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + 2 \int_{S_u} p_\tau^i u_\tau^j dS_u + 2 \int_{S_u} p_n^i u_n^j dS_u + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p + 2 \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + 2 \int_{S_u} p_\tau^j u_\tau^i dS_u +$$

$$+ 2 \int_{S_u} p_n^j u_n^i dS_u + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p = 2\delta_{ij}.$$

Группируя слагаемые и обозначая

$$\beta_{ij} = 2 \int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + 2 \int_{S_u} p_\tau^i u_\tau^j dS_u + 2 \int_{S_u} p_n^i u_n^j dS_u + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p ,$$

$$\lambda_{ij} = 2 \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + 2 \int_{S_u} p_\tau^j u_\tau^i dS_u + 2 \int_{S_u} p_n^j u_n^i dS_u + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p ,$$

легко убедиться что  $\beta_{ij} + \lambda_{ij} = 2\delta_{ij}$ .

Преобразуем  $\lambda_{ij}$  следующим образом: базисные механические элементы  $\mathbf{X}^j$ ,  $p_\tau^j$ ,  $u_n^j$  заменяем заданными, и перебор будем осуществлять по индексу  $j$ , образуя тем самым матрицы коэффициентов

$$\alpha_j = 2 \int_V \mathbf{X} \mathbf{u}^j dV + 2 \int_{S_u} p_\tau u_\tau^j dS_u + 2 \int_{S_u} p_n u_n^j dS_u + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v \mathbf{u}_v^j dS_p ; \quad \mathbf{A} = [\alpha_j]_N. \quad \mathbf{B} = [\beta_{ij}]_{N \times N}.$$

Коэффициенты Фурье  $c_k$

определяется по зависимости (7). Искомые характеристики определяются рядами (5).

В работе [8] приведено решение контактной задачи для анизотропного цилиндра, находящегося одновременно под действием массовых сил. Контакт происходит по торцовой поверхности цилиндра без трения.

## СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА

В условиях смешанной задачи заданы массовые силы  $\mathbf{X}$ , усилия  $\mathbf{p}_v$  на участке поверхности  $S_p$  и перемещения точек границы  $\mathbf{u}_v$  на участке поверхности  $S_u$ ; естественно что  $S = S_p + S_u$ .

При решении смешанной задачи используются скалярные произведения:

$$(\xi_1, \xi_2) = \int_V (\varepsilon_{ij}^1 \sigma_{ij}^2 + \varepsilon_{ij}^2 \sigma_{ij}^1) dV ;$$

$$(\gamma_1, \gamma_2) = \int_S p_i^1 u_{vi}^2 dS + \int_V X_i^1 u_i^2 dV + \int_S p_i^2 u_{vi}^1 dS + \int_V X_i^2 u_i^1 dV . \quad (8)$$

Представим слагаемые из (8) в следующем виде:

$$\int_S \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS = \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_u ;$$

$$\int_S \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS = \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_u$$

и подставляя их в (8), получим

$$2 \int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_u + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_u +$$

$$+ 2 \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_u + \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p + \int_{S_u} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_u = 2\delta_{ij}.$$

Группируя слагаемые и обозначая

$$\beta_{ij} = 2 \int_V \mathbf{X}^i \mathbf{u}^j dV + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_p + 2 \int_{S_u} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_u ;$$

$$\lambda_{ij} = 2 \int_V \mathbf{X}^j \mathbf{u}^i dV + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v^i dS_p + 2 \int_{S_u} \mathbf{p}_v^i \mathbf{u}_v^j dS_u ; \beta_{ij} + \lambda_{ij} = 2\delta_{ij}.$$

Преобразуем  $\lambda_{ij}$ , базисные механические элементы  $\mathbf{X}^j$ ,  $\mathbf{p}_v^j$ ,  $\mathbf{u}_v^j$  заменяем заданными, и перебор будем осуществлять по индексу  $j$ .

Матрицы коэффициентов

$$\alpha_j = 2 \int_V \mathbf{X} \mathbf{u}^j dV + 2 \int_{S_p} \mathbf{p}_v \mathbf{u}_v^j dS_p + 2 \int_{S_u} \mathbf{p}_v^j \mathbf{u}_v dS_u ; A = [\alpha_j]_N . B = [\beta_{ij}]_{N \times N} .$$

Коэффициенты Фурье  $c_k$  определяется по зависимости (7). Искомые характеристики определяются по зависимостям (6).

Во всех задачах тестирование коэффициентов Фурье осуществляется подстановкой одного из базисных элементов с соответствующими ГУ в

качестве заданного, при этом должны выполняться условия  $c_n = 1$ ,  $n$  – номер тестируемого элемента, остальные коэффициенты Фурье должны равняться нулю.

Пример решения краевой задачи смешанного типа с участием массовых сил приведен в работе [9].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пеньков, В.Б. Метод граничных состояний для решения задач линейной механики / В.Б. Пеньков, В.В. Пеньков. – Текст: непосредственный // Дальневосточный математический журнал. 2001. – Т.2, № 2. – С. 115-137.

2. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – Изд. 2-е. – Москва : Наука, 1977. – 416 с. – Текст: непосредственный.

3. Лурье, А.И. Теория упругости / А.И. Лурье. – Москва : Наука, 1970. – 940 с. – Текст: непосредственный.

4. Саталкина, Л.В. Нарастивание базиса пространства состояний при жестких ограничениях к энергоемкости вычислений / Л.В. Саталкина. – Текст: непосредственный // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – Липецк, 2007. – С. 130-131.

5. Иванов, Д.А. Метод граничных состояний в решении первой основной

задачи теории анизотропной упругости с массовыми силами / Д.А. Иванов. – DOI 10.17223/19988621/66/8. – Текст: непосредственный. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2020. – № 66. – С. 96-111.

6. Александров А.Я.

Пространственные задачи теории упругости (применение методов теории функций комплексного переменного) / А.Я. Александров, Ю.И. Соловьев // Москва : Наука, 1978. – 464 с. – Текст: непосредственный.

7. Иванов, Д.А. Метод граничных состояний в решении второй основной задачи теории анизотропной упругости с массовыми силами / Д.А. Иванов. – DOI 10.17223/19988621/61/5. – Текст: непосредственный // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 61. – С. 45-60.

8. Иванов, Д.А. Решение контактной задачи теории упругости для анизотропных тел вращения с массовыми

силами / Д.А. Иwanyчев. – DOI 10.15593/perm.mech/2019.2.05. – Текст: непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 2. – С. 49-62.

9. **Иванычев, Д.А.** Решение смешанной неосесимметричной задачи теории

Сведения об авторах:

**Иванычев Дмитрий Алексеевич**

Кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей механики Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

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

**Балыкин Данила Игоревич**

аспирант кафедры общей механики Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

[Balykindanila89@gmail.com](mailto:Balykindanila89@gmail.com)

**Ездакова Диана Владимировна**

аспирант кафедры общей механики Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

упругости для анизотропных тел вращения / Д.А. Иwanyчев. – DOI 10.15593/perm.mech/2022.2.08. – Текст: непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 2. – С. 85-97.

Information about authors:

**Ivanychev Dmitry Alekseevich**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

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

**Balykin Danila Igorevich**

Postgraduate Student of the Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

[Balykindanila89@gmail.com](mailto:Balykindanila89@gmail.com)

**Ezdakova Diana Vladimirovna**

Postgraduate Student of the Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk, Moskovskaya str., 30.

[Baskach-di@mail.ru](mailto:Baskach-di@mail.ru)

DOI 10.53015/30343275\_2025\_4\_69

УДК 620.174.21

А.В. СУХАНОВ

## ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

**Аннотация:** В настоящей работе представлено описание методики подбора и оценки прочности сечений элементов конструкций при внецентренном растяжении и сжатии. Методика позволяет сравнительно быстро оценить работоспособность конструкции с учётом заданных геометрических размеров и механических характеристик материала. В статье представлен пример подбора сечения чугунной станины при внецентренном растяжении и пример оценки прочности бетонного столба при внецентренном сжатии, которые могут

использоваться на практике для расчёта как стержневых элементов конструкций при внецентренном нагружении, так и для оценки прочности элементов конструкций, работающих при различных случаях сложного сопротивления. Приведённые в статье рекомендации могут быть полезны для инженеров-проектировщиков, связанных с конкретным проектированием и расчётом бетонных конструкций и деталей машин, и направлены на решение задач, возникающих на производственных предприятиях строительной и машиностроительной отраслей.

**Ключевые слова:** внецентренное растяжение, внецентренное сжатие, продольная сила, осевой момент сопротивления, радиус инерции, ядро сечения.

A.V. SUKHANOV

## CHECKING THE STRUCTURAL ELEMENT STRENGTH UNDER ECCENTRIC TENSION AND COMPRESSION

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

**Abstract:** The paper describes a methodology for selecting and assessing the structural element cross-sectional strength under eccentric tension and compression. This methodology enables a relatively quick assessment of the structural performance given the specified geometric dimensions and mechanical properties of the material. The article contains an example of selecting a cast iron base cross-section under eccentric tension and an example of assessing the strength of a concrete column under eccentric compression. These methods can be practically used to calculate both rod structural elements under eccentric loads and to assessing the strength of structural elements operating under various complex resistance conditions. The recommendations provided in the article can be useful for design engineers involved in the specific design and calculation of concrete structures and machine components and are aimed at solving problems arising at manufacturing facilities in the construction and mechanical engineering industries.

**Keywords:** eccentric tension, eccentric compression, longitudinal force, axial section moment, radius of gyration, section core.

### ВВЕДЕНИЕ

В эксплуатационных условиях элементы конструкций могут испытывать действие различных простых напряжённых состояний: осевого растяжения или осевого сжатия [1], кручения [3, 4], изгиба [2, 5], или их комбинаций [6]. Однако, если, например, на брус действуют продольные сжимающие или растягивающие силы, параллельные оси бруса, но приложенные не в центре тяжести сечения, то такое сопротивление бруса называют внецентренным растяжением или внецентренным сжатием.

Рассмотрим брус произвольного сечения, на который действует одна сила  $P$ , параллельная оси бруса и пересекающая любое поперечное сечение в точке, с координатами  $x_P$  и  $y_P$  (рис. 1, а). Расстояние от этой точки до оси  $z$

называется эксцентриситетом и обозначается буквой  $e$ . В любом поперечном сечении при такой нагрузке действуют внутренние силовые факторы:

$$N = P; M_x = P \cdot y_P; M_y = P \cdot x_P.$$

Напряжения в произвольной точке сечения можно определить по зависимости:

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{P \cdot x_P}{J_y} \cdot x + \frac{P \cdot y_P}{J_x} \cdot y.$$

Выражая осевые моменты через радиусы инерции, получим:

$$\sigma = \frac{P}{F} \left( 1 + \frac{x_P}{i_y^2} \cdot x + \frac{y_P}{i_x^2} \cdot y \right).$$

Для определения опасной точки сечения при сложном профиле целесообразно построить нейтральную линию сечения. Опасной будет точка, наиболее удаленная от нейтральной линии.

Уравнение нейтральной линии получим, приравняв к нулю последнее выражение для напряжений в сечении бруса:

$$\frac{P}{F} \left( 1 + \frac{x_P}{i_y^2} \cdot x + \frac{y_P}{i_x^2} \cdot y \right) = 0$$

Выразив координаты точек нейтральной линии через  $x_0$  и  $y_0$ , получим:

$$\frac{x_P}{i_y^2} \cdot x_0 + \frac{y_P}{i_x^2} \cdot y_0 = -1$$

Подставляя поочередно  $x_0 = 0$  и  $y_0 = 0$  найдем отрезки  $x_H$  и  $y_H$ , отсекаемые нейтральной линией на осях  $x$  и  $y$  (рис. 1, б):

$$x_H = -\frac{i_y^2}{x_P}; \quad y_H = -\frac{i_x^2}{y_P}$$

Проведя к нейтральной линии касательные к контуру сечения, найдем наиболее напряженные точки  $A$  и  $B$ . Напряжения в этих точках и условия прочности имеют вид

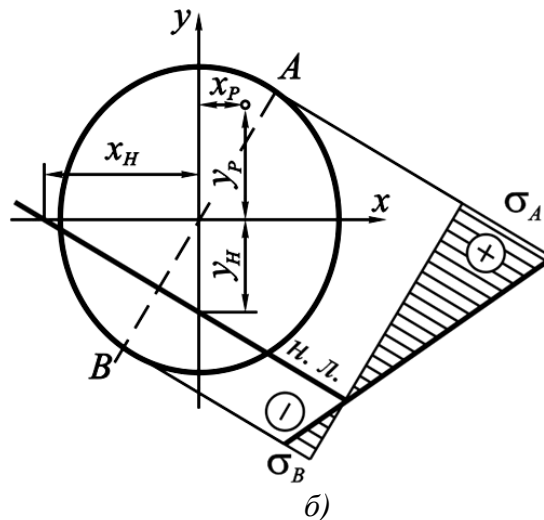
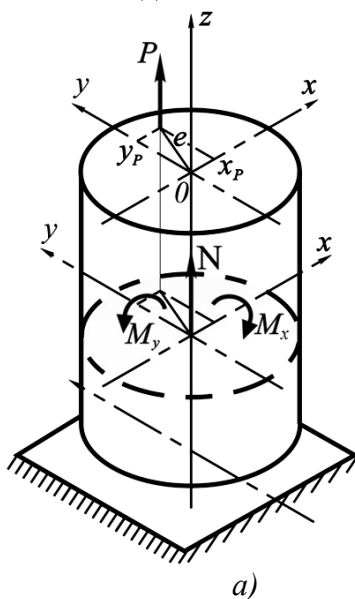


Рис.1. Внецентренное растяжение бруса

Для брусков из материалов, плохо сопротивляющихся растяжению, важно, чтобы по всему поперечному сечению напряжения были одного знака. В этом случае необходимо установить область значений удаления силы  $P$  от оси  $z$ , при которых будет обеспечиваться условие постоянства знака напряжений по сечению. Такая область называется ядром сечения. Для построения ядра сечения необходимо

$$\sigma_{\max} = \sigma_A = \frac{P}{F} \left( 1 + \frac{x_P}{i_y^2} \cdot x_A + \frac{y_P}{i_x^2} \cdot y_A \right) \leq [\sigma_+]$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_B = \frac{P}{F} \left( 1 + \frac{x_P}{i_y^2} \cdot x_B + \frac{y_P}{i_x^2} \cdot y_B \right) \leq [\sigma_-]$$

В общем случае нейтральная линия может проходить и вне сечения бруса. Если расположить точку приложения силы в центре сечения, то нейтральная линия будет проходить в бесконечности. По мере увеличения эксцентриситета нейтральная линия будет приближаться к сечению, и при некотором значении эксцентриситета нейтральная линия начнет пересекать сечение. В последнем случае по одну сторону от нейтральной линии напряжения будут растягивающие, а по другую – сжимающими.

провести нулевые линии, соответствующие их предельному состоянию (это будут касательные к сечению), для каждой из этих линий найти соответствующую ей точку приложения силы и, соединяя полученные точки, получить контур, который и будет являться ядром сечения. Чтобы упростить построение ядра сечения используют свойство нейтральной линии: при повороте нейтральной линии вокруг

некоторой фиксированной точки контура сечения точка приложения силы перемещается вдоль некоторой прямой.

В данной работе рассматриваются методы оценки прочности элементов различных конструкций в условиях внецентренного растяжения и сжатия.

Проверим прочность нижней части бетонного столба, имеющей прямоугольное поперечное сечение 16x20 см (рис. 2). Расчётное сопротивление на растяжение  $R_P = 0,7$  МПа, на сжатие  $R_C = 6$  МПа.

Имеет место случай внецентренного сжатия под действием силы  $P = 6$  кН.

Площадь поперечного сечения в основании

$$F = 16 \cdot 20 = 320 \text{ см}^2.$$

Осевой момент сопротивления

$$W = \frac{16 \cdot 20^2}{6} = 1066,67 \text{ см}^3.$$

Момент инерции

$$I_y = \frac{16 \cdot 20^3}{12} = 10666,67 \text{ см}^4.$$

Продольная сила  $N = P = 6$  кН.

Изгибающий момент

$$M_y = P \cdot e = 6 \cdot 15 = 90 \text{ кН} \cdot \text{см},$$

где  $e$  – расстояние от центра тяжести сечения (ось  $y$ ) до точки приложения силы (точка А).

Учитывая, что опасной точкой сечения является точка В, условие прочности запишем в виде:

$$\sigma_{\max} = \sigma_B = -\frac{N}{F} - \frac{M_y}{W_y} = -\frac{6}{320} - \frac{90}{1066,67} = -0,01875 - 0,084375 = -0,103125 \text{ кН/см}^2;$$

$$|\sigma_{\max}| = 1,03125 \text{ МПа} < R_C = 6 \text{ МПа}.$$

Нормальные напряжения в точке С определим по формуле:

$$\sigma_C = -\frac{N}{F} + \frac{M_y}{W_y} = -\frac{6}{320} + \frac{90}{1066,67} = -0,01875 + 0,084375 = 0,065625 \text{ кН/см}^2;$$

$$\sigma_C = 0,65625 \text{ МПа} < R_P = 0,7 \text{ МПа}.$$

Уравнение нулевой линии:

$$\sigma_0 = -\frac{N}{F} - \frac{M_y}{I_y} \cdot x_0 = 0$$

Координата нулевой линии:

$$x_0 = -\frac{N}{F} \cdot \frac{I_y}{M_y} = -\frac{6}{320} \cdot \frac{10666,67}{90} = -2,22 \text{ см}.$$

Построим эпюры нормальных напряжений (рис. 1):

– от продольной силы  $N$ :

$$\sigma_N = -\frac{N}{F} = -\frac{6}{320} = -0,1875 \text{ МПа};$$

– от изгибающего момента  $M_y$ :

$$\sigma_{M_y} = \frac{M_y}{W_y} = 0,84375 \text{ МПа};$$

– суммарная эпюра:

$$\sigma_B = -\frac{N}{F} - \frac{M_y}{W_y} = -1,03125 \text{ МПа};$$

$$\sigma_C = -\frac{N}{F} + \frac{M_y}{W_y} = 0,65625 \text{ МПа}.$$

Условия прочности для заданного прямоугольного сечения бетонного столба выполнены.

Рассмотрим другой пример. При сверлении детали на шпиндель сверлильного станка передаётся осевое давление  $P = 20$  кН. Необходимо определить диаметр  $d$  круглой чугуновой станины, если расчётное сопротивление на растяжение  $R = 40$  МПа. Опасное сечение будет расположено в левой части станины, опасной точкой будет точка А (рис. 3).

Продольная сила:  $N = P = 20$  кН.

Изгибающий момент:

$$M_x = P \cdot 40 = 800 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

Условие прочности будет иметь вид:

$$\sigma_A = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{W_x} \leq R$$

Площадь поперечного сечения:

$$F = \frac{\pi d^2}{4}$$

Осевой момент сопротивления:

$$W_x = \frac{\pi d^3}{32}$$

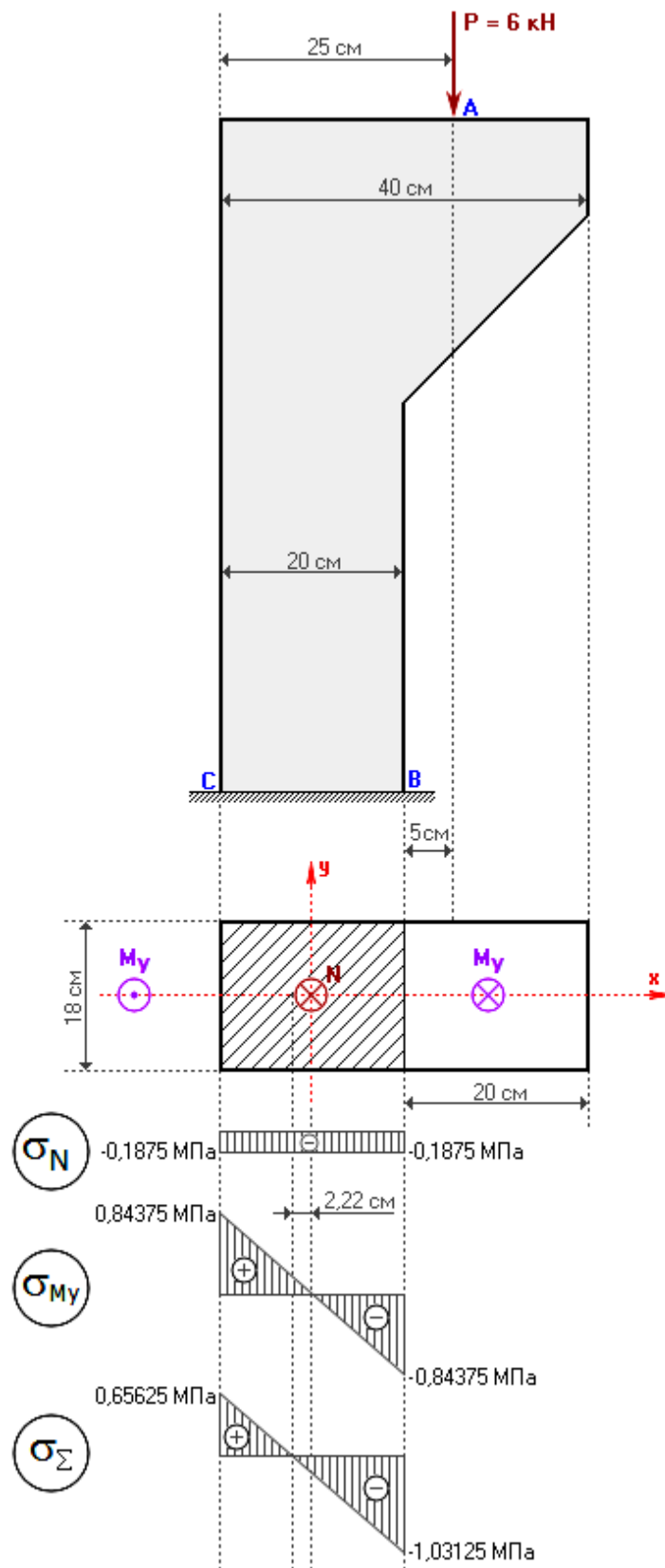


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений при внецентренном сжатии

Диаметр круглой чугунной станины  
подберем из условия:

$$\frac{4P}{\pi d^2} + \frac{32M_x}{\pi d^3} \leq R$$

Как правило, напряжения от изгибающего  
момента намного превышают напряжения  
от продольной силы, поэтому для  
упрощения расчёта первое слагаемое в

вышеприведённом выражении приравняем к нулю:

$$\frac{32M_x}{\pi d^3} \leq R$$

Отсюда находим диаметр станины:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32M_x}{\pi R}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 800 \cdot 10^4}{\pi \cdot 40}} = 12,68 \text{ см.}$$

Принимаем диаметр  $d = 13$  см.

Тогда напряжения в точке А сечения с учётом продольной силы  $P$ :

$$\sigma_A = \frac{4 \cdot 20}{\pi \cdot 13^2} + \frac{32 \cdot 800}{\pi \cdot 13^3} = 38,6 \text{ МПа.}$$

Напряжения в точке В сечения:

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \frac{N}{F} - \frac{M_x}{W_x} = \\ &= \frac{4 \cdot 20}{\pi \cdot 13^2} - \frac{32 \cdot 800}{\pi \cdot 13^3} = -35,6 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Положение нулевой линии:

$$\sigma_0 = \frac{N}{F} - \frac{M_x}{I_x} \cdot y_0 = 0$$

Напряжения от продольной силы  $N$ :

$$\sigma_N = \frac{N}{F} = \frac{4 \cdot 20}{\pi \cdot 13^2} = 1,51 \text{ МПа.}$$

Напряжения от изгибающего момента  $M_x$ :

$$\sigma_{Mx} = \frac{M_x}{W_x} = 37,1 \text{ МПа.}$$

Координата нулевой линии:

$$y_0 = -\frac{N}{F} \cdot \frac{I_x}{M_x} = -\frac{4 \cdot 20}{\pi \cdot 13^2} \cdot \frac{\pi \cdot 13^4}{64 \cdot 800} = -0,26 \text{ см.}$$

По вычисленным значениям построим эпюры нормальных напряжений (рис. 3).

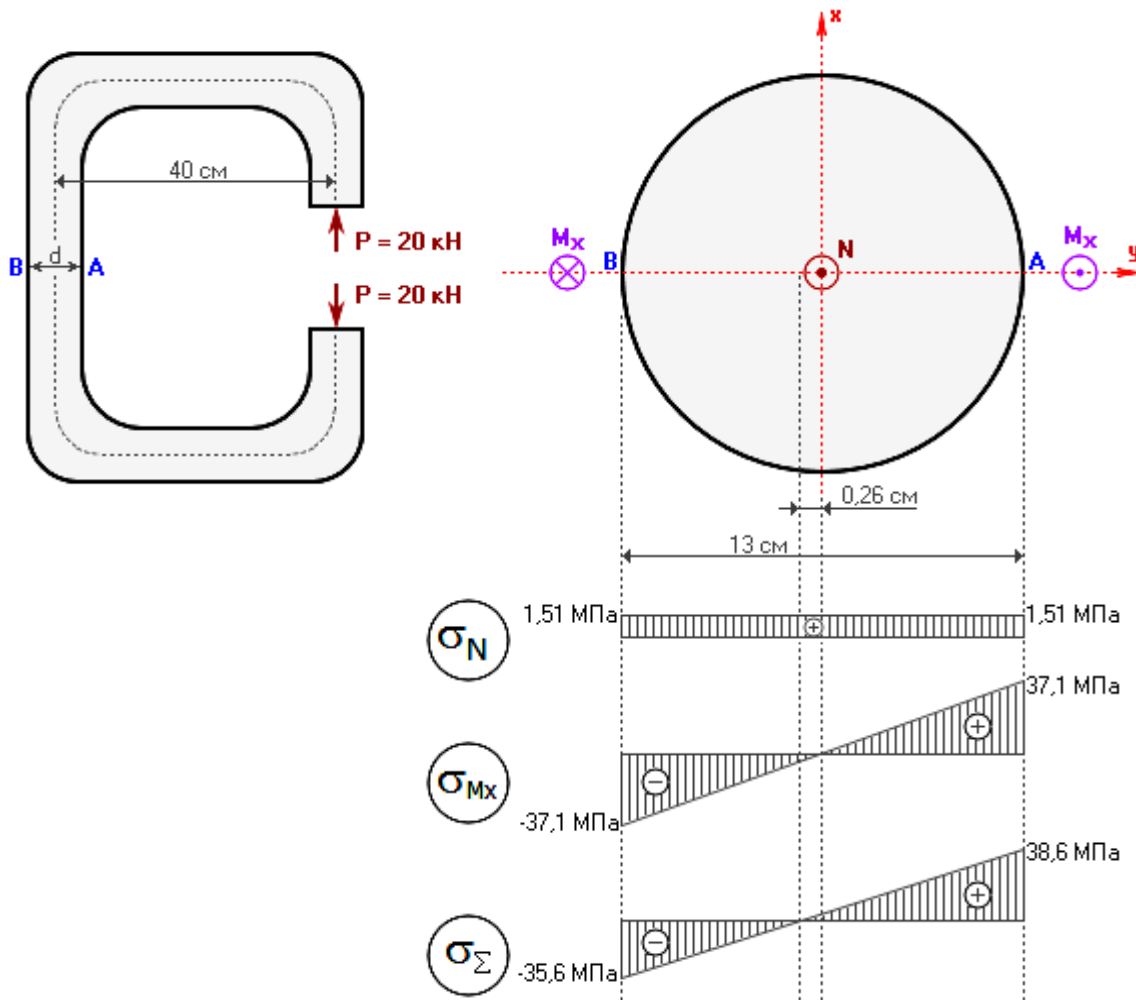


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений в сечении круглой станины

Рассмотренный алгоритм подбора сечений элементов конструкций при

внецентренном растяжении и сжатии позволяет сравнительно быстро оценить

работоспособность конструкции с учётом заданных геометрических размеров и механических характеристик материала.

### ВЫВОДЫ

Представленный алгоритм подбора сечения чугуновой станины при внецентренном растяжении и метод оценки прочности бетонного столба при внецентренном сжатии может использоваться на практике для расчёта как стержневых элементов конструкций при внецентренном нагружении, так и для

оценки прочности элементов конструкций, работающих при различных случаях сложного сопротивления [6, 7, 8].

Приведённые в статье рекомендации могут быть полезны для инженеров-проектировщиков, связанных с конкретным проектированием и расчётом бетонных конструкций и деталей машин, и направлены на решение задач, возникающих на производственных предприятиях строительной и машиностроительной отраслей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Суханов, А.В.** Расчёт на прочность и проверка жёсткости статически определимой балки двутаврового сечения / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 1 (54). – С. 93-100.
2. **Суханов, А.В.** Построение упругой линии балки и определение величины и направления главных напряжений в сечении балки / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 1 (54). – С. 101-109.
3. **Суханов, А.В.** Подбор сечения стального ступенчатого вала с заданной мощностью на шкивах / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – №2 (51). – С. 77-84.
4. **Суханов, А.В.** Определение деформаций и напряжений при кручении статически неопределимого бруса / А.В. Суханов, А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 2 (51). – С. 91-99.
5. **Суханов, А.В.** Расчёт статически неопределимой многоопорной балки при изгибе / А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2025. – № 1 (58). – С. 49-55.
6. **Суханов, А.В.** Подбор сечений двухопорной балки при косом изгибе / А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2025. – № 3 (60). – С. 65-72.
7. **Корнеев, А.М.** Математическое моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния неоднородных сред с непрерывными и дискретными волокнами / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Фундаментальные исследования». – 2016. – № 8. – С. 39-44.
8. **Корнеев, А.М.** Детерминированная математическая модель и алгоритм анализа напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов с дискретными волокнами / А.М. Корнеев, О.П. Бузина, А.В. Суханов. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Современные наукоемкие технологии». – 2016. – № 8. – С. 39-44.

Сведения об авторах:

**Суханов Андрей Владимирович**

старший преподаватель

кафедры общей механики

Липецкий государственный технический  
университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

Information about the authors:

**Sukhanov Andrey Vladimirovich**

senior lecturer of the Department of General  
Mechanics,

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 [vm@stu.lipetsk.ru](mailto: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; характеристику объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическую значимость работы; учебно-методическую 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, с 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, с 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 спроса 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  $d$ ).

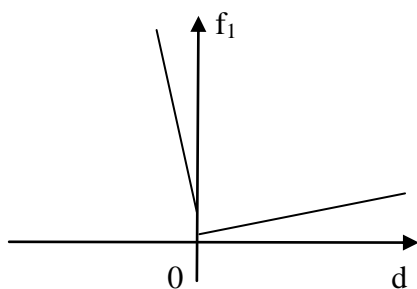


Рис. 1. График функции потерь потребителя

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.

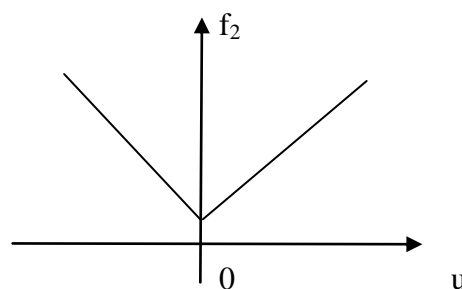


Рис. 2. График функции потерь производителя

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  $a_1 > 0$ ,  $b_1 > 0$  [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.

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. 90–95.

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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

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

ISSN 3034-3275

**ВЕСТНИК**

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

**№ 4 (61) 2025 г.**

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

Регистрационный номер средства массовой информации Эл № **ФС77-87639**.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 25.06.2024 г.

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

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

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

*Телефон: (4742) 32-80-51.*

Липецкий государственный технический университет.

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

Редактор: М.Л. Дрепина

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Дата подписания к использованию 25 декабря 2025 года