

ISSN 3034-3275

Вестник

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

16+

**№ 3(60)
2025**

ISSN 3034-3275

ВЕСТНИК

Липецкого государственного технического университета
(Вестник ЛГТУ)

№ 3 (60) 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)

№ 3 (60) 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: pm@stu.lipetsk.ru

**ВЕСТНИК ЛИПЕЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА (ВЕСТНИК ЛГТУ)
СОДЕРЖАНИЕ
ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ**

**CONTENTS
COMPUTER SCIENCES, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

- СТР.** **И.А. Седых, М.С. Жуков**
5 Интеграция больших языковых
 моделей в клиентоориентиро-
 ванные приложения
- 14** **А.А. Каниугин**
 Применение метода главных
 компонент для выявления
 причин технологических сбоев в
 процессе производства
 сахара-песка
- МЕТАЛЛУРГИЯ**
- 21** **А.Г. Арзамасцев, А.И. Шарапов**
 Оценка энергетической
 эффективности для различных
 вариантов установки подогревателя
 доменного газа в схемах с газовыми
 утилизационными
 бескомпрессорными турбинами
- 27** **В.Н. Титов, И.В. Куприянова,
Т.В. Кравченко**
 Взаимосвязь тепловых потерь с
 охлаждающей водой
 и параметрами работы доменной
 печи
- МАШИНОСТРОЕНИЕ**
- 34** **А.В. Суханов**
 Основные принципы расчёта и
 конструирования грузоподъёмных
 машин
- 43** **В.Б. Пеньков, Л.В. Левина,
Е.С. Несмеянова**
 Интерактивная программа для
 решения задачи термостатики
 методом граничных состояний
- I.A. Sedykh, M.S. Zhukov**
Integrating large language models into
client-oriented applications
- A.A. Kaniugin**
Application of the principal component
method to identify the causes of
technological failures in the granulated
sugar production process
- METALLURGY**
- A.G. Arzamastsev, A.I. Sharapov**
Energy efficiency evaluation for various
options of a blast gas heater position in
patterns with gas utilization
compressorless turbines
- V.N. Titov, I.V. Kupriyanova,
T.V. Kravchenko**
Relationship between heat losses and cooling
water and blast furnace operating parameters
- MACHINE-BUILDING**
- A.V. Sukhanov**
Basic principles of calculating and
designing hoisting machines
- V.B. Penkov, L.V. Levina,
E.S. Nesmeyanova**
Interactive program for solving the
thermostatics problem by the method of
boundary states

- | | | |
|-----------|---|---|
| 50 | Д.А. Иванычев, Д.И. Балыкин,
Д.В. Ездакова
Решение смешанной задачи теории
упругости для анизотропного
полушара | D.A. Ivanychev, D.I. Balykin,
D.V. Ezbekova
Solution of a mixed elasticity theory
problem for
an anisotropic hemisphere |
| 58 | В.В. Неверов, П.Н. Клевцов,
С.В. Лебедев
Особенности сварки изгибов
стальных трубопроводов | V.V. Neverov, P.N. Klevtsov,
S.V. Lebedev
Features of welding steel pipeline bends |
| 65 | А.В. Суханов
Подбор сечений двухопорной балки
при косом изгибе | A.V. Sukhanov
Selection of two-support beam sections
under non-symmetrical bending
conditions |
| 73 | К сведению авторов | |
| 74 | Пример оформления статьи для
публикации в журнале | |

DOI 10.53015/30343275_2025_3_5

УДК 004.8

И.А. СЕДЫХ, М.С. ЖУКОВ

**ИНТЕГРАЦИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ
В КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье рассматриваются аспекты интеграции больших языковых моделей в клиентоориентированные сервисы на двух практических примерах: автоматизированной системы подбора товаров в компьютерном магазине и медицинского ассистента для обработки обращений в скорую помощь. Предложена модульная архитектура решений, включающая обработку естественного языка, преобразование запросов в структурированные данные и интеграцию с внешними системами. Отдельное внимание уделено механизмам многоступенчатого диалога для уточнения параметров запросов. Приведены конкретные реализации на языке программирования Python с использованием платформы искусственного интеллекта Azure AI.

Ключевые слова: большие языковые модели, обработка естественного языка, клиентоориентированные сервисы, автоматизированные системы, электронная коммерция, медицинский ассистент.

I.A. SEDYKH, M.S. ZHUKOV

**INTEGRATING LARGE LANGUAGE MODELS INTO CLIENT-ORIENTED
APPLICATIONS**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The article examines aspects of integrating large language models into customer-oriented services using two practical examples: an automated system for selecting goods in a computer store and a medical assistant to handle emergency room calls. Proposed modular solution architecture, including natural language processing, conversion of queries into structured data and integration with external systems. Special attention has been paid to the mechanisms of a multi-stage dialogue for clarifying the parameters of requests. Concrete implementations in the programming language Python using the artificial intelligence platform Azure AI are given.

Keywords: large language models, natural language processing, customer-oriented services, automated systems, electronic commerce, medical assistant.

ВВЕДЕНИЕ

История использования систем обработки естественного языка насчитывает всего 50 лет, но изо дня в день мы используем модели NLP в различных поисковых запросах, переводчиках и чат-ботах. До появления алгоритмов

машинного обучения в 1980-х годах вся обработка естественного языка сводилась к рукописным и неавтоматизированным правилам. Тем не менее, еще до этого времени появились первые идеи о создании машин, которые могли бы работать

подобно человеческому мозгу, через нейронные связи. Это стало прообразом искусственного интеллекта, построенного на нейронных сетях в будущем [1].

Современные достижения в области искусственного интеллекта, в частности развитие больших языковых моделей, предлагают новую парадигму взаимодействия человека с цифровыми системами. Возможность обработки естественного языка в реальном времени открывает новые горизонты для автоматизации клиентоориентированных сервисов — от электронной коммерции до критически важных медицинских систем. Однако практическая интеграция этих технологий сталкивается с ключевым вызовом: как преобразовать свободные формулировки пользователей в структурированные данные, пригодные для машинной обработки, сохранив при этом естественность диалога?

В данной работе рассматривается решение этой проблемы на двух практических примерах. Первый — система подбора компьютерной техники, где нейросеть выступает «переводчиком» между запросом наподобие «ищу ноутбук для программирования с хорошей батареей» и сложными фильтрами базы данных. Второй — медицинский ассистент, анализирующий описание симптомов для автоматической классификации срочности случаев. Оба примера объединяет общая архитектурная концепция, где языковая модель становится связующим звеном между человеком и системой обработки данных.

1. АРХИТЕКТУРА РЕШЕНИЯ

Ключевая идея представленных модулей [2] — создание промежуточного слоя между естественным языком и структурированными моделями данных. В отличие от классических чат-ботов, ориентированных на генерацию текста, здесь языковая модель выполняет роль интеллектуального парсера, преобразующего свободные формулировки в машиночитаемые форматы: она выделяет из текста такие сущности : как

характеристики товара, симптомы, и их атрибуты — объем памяти.

Но как поставить задачу искусственному интеллекту? Это делается посредством написания промта. Промт — это запрос, команда или набор инструкций, которые пользователь передает нейросети или другой программе с ИИ для выполнения определенной задачи. Промт помогает системе лучше понять намерения человека и выдать наиболее релевантный результат [3]. В промте принято определять три элемента: роль, контекст и задачу [4].

Особый интерес представляет механизм многоуровневого диалога, реализованный в медицинском ассистенте. Если нейросеть оценивает уверенность в корректности распознавания параметров ниже 0.7 (по шкале от 0 до 1), система не просто сообщает об ошибке, а формулирует контекстно-релевантный вопрос для уточнения. Это достигается через цепочку промтов: первый запрос анализирует ввод пользователя, второй генерирует уточняющее сообщение на основе выявленных пробелов.

Интеграция с системами обработки данных выполнена через специальные интерфейсы. Например, для системы подбора товаров, где нужно делать выборку из базы данных, разработан SQL-генератор, автоматически строящий запросы на основе распознанных параметров.

Технической основой для обоих решений стала платформа искусственного интеллекта Azure AI, предоставляющая доступ к подавляющему большинству популярных языковых моделей [5].

Такая архитектура демонстрирует гибкость: заменяя модули интеграции, можно адаптировать систему для новых доменов. Эксперименты показали, что переход от тематики компьютерного магазина к бронированию столиков в ресторане требует изменения ~25 % кодовой базы: изменения касаются написания промта, подходящего для новой задачи, и корректировки моделей данных, в которых требуется хранить полученный ответ от нейросети.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Оба рассмотренных примера, несмотря на разную предметную область, демонстрируют общие принципы работы с запросами на естественном языке. Их основа — цепочка преобразований «текст → структура → действие», где языковая модель выступает интеллектуальным посредником, а бизнес-логика гарантирует семантическую корректность.

2.1. ПОДБОР КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОВАРОВ

Первый практический пример заключается в разработке модуля с использованием большой языковой модели для подбора подходящих товаров в компьютерном магазине.

На вход подается запрос пользователя — описание на естественном языке

требуемого продукта. Роль поисковой системы по базе данных товаров играет нейросеть — в представленных примерах будет использоваться модель GPT-4o-mini [6]. Прототипирование с помощью ИИ-моделей предлагает сервис GitHub Models [7].

На рис. 1 представлен метод класса «ShopAssistant», отвечающий за отправку запроса к нейросети и получение структурированного ответа в виде JSON-файла [8]. Также можно увидеть принятую структуру промта: в качестве роли определяется «менеджер компьютерного магазина», в качестве контекста — желание пользователя купить товар и перечень доступных товаров, в качестве задачи ставится извлечение из пользовательского запроса параметров товара и их структурированный возврат в JSON.

```
20 def parse_user_request(self, user_request: str) -> Optional[Dict[str, str | List[str]]]:
21     prompt = f"""
22     Вы - менеджер компьютерного магазина. Пользователь хочет купить товар. Извлекли из {user_request} запроса параметры товара и верни их в формате JSON.
23     Будь внимателен к тому, что подходящих товаров может быть несколько.
24     Доступные категории: ноутбуки, настольные компьютеры, мониторы, клавиатуры, мыши.
25     При определении подходящей категории указывай cat в том же виде, что и в списке выше.
26     Характеристики:
27     - Ноутбуки: ram (8 ГБ, 16 ГБ, 32 ГБ), storage (256 ГБ SSD, 512 ГБ SSD, 1 ТБ SSD), processor (Intel i5, Intel i7, AMD Ryzen 5, AMD Ryzen 7),
28       screen_size (13 дюймов, 15 дюймов, 17 дюймов)
29     - Настольные компьютеры: ram (8 ГБ, 16 ГБ, 32 ГБ), storage (512 ГБ SSD, 1 ТБ HDD, 2 ТБ HDD), processor (Intel i5, Intel i7, AMD Ryzen 5,
30       AMD Ryzen 7), gpu (NVIDIA GTX 1660, NVIDIA RTX 3060, AMD Radeon RX 6700)
31     - Мониторы: screen_size (24 дюйма, 27 дюймов, 32 дюйма), resolution (1080p, 1440p, 4K), refresh_rate (60 Гц, 144 Гц, 240 Гц)
32     - Клавиатуры: type (мембранная, механическая), layout (ANSI, ISO), backlight (да, нет)
33     - Мыши: type (проводная, беспроводная), dpi (800, 1600, 3200), buttons (2, 5, 7)
34
35     Ответ нужно присылать без лишних знаков форматирования, например:
36     {{
37         "category": "ноутбук",
38         "specs": {{
39             "ram": "16 ГБ",
40             "storage": "512 ГБ SSD",
41             ...
42         }}
43     }}
44
45     Если из ответа пользователя ясно, что он хочет ознакомиться {user_request} товарами разных характеристик, то запиши характеристики в виде списка, например:
46     {{
47         "category": "мышь",
48         "specs": {{
49             "buttons": ["2", "5"],
50             ...
51         }}
52     }}
53
54     Запрос пользователя: {user_request}
55     """
56     response = self.bot.send_request(prompt)
57     print(f"Ответ нейросети: {response}")
58     try:
59         return json.loads(response)
60     except json.JSONDecodeError:
61         return None
```

Рис. 1. Метод отправки запроса нейросети

Далее имитируется среда интеграции модуля (при помощи библиотеки Faker [9] генерируется база данных товаров), в которой будет производиться поиск, после чего пользователю в интерфейсе командной

строки предлагается описать продукт, который необходимо подобрать. Умному модулю остается лишь обработать запрос на естественном языке и вернуть структурированные данные, которые в

дальнейшем выступят в качестве фильтра для выборки из базы данных.

Протестируем программу. На рис. 2 видим, какие тестовые данные

генерируются библиотекой Faker [10], после чего пользователю предлагается описать товар, который ему нужно подобрать.

```
--- Примеры интеграций больших языковых моделей в клиентоориентированные приложения ---
Выберите контекст для рассмотрения:
1. Интернет-магазин электроники
2. обращение в скорую помощь
0. Выход
> 1
Сгенерирован товар: Product(name=Board Somebody, category=настольные компьютеры, specs={'ram': '32 ГБ', 'storage': '256 ГБ SSD', 'processor': 'Intel i5', 'gpu': 'AMD Radeon RX 6700'})
Сгенерирован товар: Product(name=Protect Run, category=клавиатуры, specs={'type': 'механическая', 'layout': 'ISO', 'backlight': 'нет'})
Сгенерирован товар: Product(name=Glass Hit, category=настольные компьютеры, specs={'ram': '8 ГБ', 'storage': '1 ТБ HDD', 'processor': 'AMD Ryzen 5', 'gpu': 'AMD Radeon RX 6700'})
Сгенерирован товар: Product(name=Pm Past, category=мыши, specs={'type': 'беспроводная', 'dpi': '1600', 'buttons': '7'})
Сгенерирован товар: Product(name=Dream Maybe, category=мониторы, specs={'screen_size': '17 дюймов', 'resolution': '4K', 'refresh_rate': '240 Гц'})
Сгенерирован товар: Product(name=City Compare, category=настольные компьютеры, specs={'ram': '16 ГБ', 'storage': '512 ГБ SSD', 'processor': 'AMD Ryzen 5', 'gpu': 'NVIDIA RTX 3060'})
Сгенерирован товар: Product(name=Need Top, category=мыши, specs={'type': 'проводная', 'dpi': '1600', 'buttons': '5'})
Сгенерирован товар: Product(name=Onto North, category=клавиатуры, specs={'type': 'механическая', 'layout': 'ISO', 'backlight': 'нет'})
Сгенерирован товар: Product(name=Positive Stop, category=ноутбуки, specs={'ram': '8 ГБ', 'storage': '2 ТБ HDD', 'processor': 'Intel i5', 'screen_size': '17 дюймов'})
Сгенерирован товар: Product(name=Politics Door, category=мыши, specs={'type': 'беспроводная', 'dpi': '800', 'buttons': '2'})
Сгенерирован товар: Product(name=Still Music, category=ноутбуки, specs={'ram': '16 ГБ', 'storage': '1 ТБ SSD', 'processor': 'AMD Ryzen 5', 'screen_size': '27 дюймов'})
Сгенерирован товар: Product(name=Color Scene, category=клавиатуры, specs={'type': 'механическая', 'layout': 'ISO', 'backlight': 'нет'})
Сгенерирован товар: Product(name=Defense Human, category=ноутбуки, specs={'ram': '16 ГБ', 'storage': '256 ГБ SSD', 'processor': 'Intel i7', 'screen_size': '24 дюйма'})
Сгенерирован товар: Product(name=Realize Beat, category=настольные компьютеры, specs={'ram': '16 ГБ', 'storage': '512 ГБ SSD', 'processor': 'Intel i7', 'gpu': 'AMD Radeon RX 6700'})
Сгенерирован товар: Product(name=Half Man, category=клавиатуры, specs={'type': 'механическая', 'layout': 'ISO', 'backlight': 'да'})
Сгенерирован товар: Product(name=Finally Management, category=мыши, specs={'type': 'проводная', 'dpi': '3200', 'buttons': '7'})
Сгенерирован товар: Product(name=Especially Deep, category=мыши, specs={'type': 'беспроводная', 'dpi': '1600', 'buttons': '5'})
Сгенерирован товар: Product(name=War Least, category=настольные компьютеры, specs={'ram': '32 ГБ', 'storage': '256 ГБ SSD', 'processor': 'Intel i5', 'gpu': 'NVIDIA GTX 1660'})
Сгенерирован товар: Product(name=Audience With, category=клавиатуры, specs={'type': 'мембранная', 'layout': 'ISO', 'backlight': 'нет'})
Сгенерирован товар: Product(name=Tree Officer, category=мыши, specs={'type': 'беспроводная', 'dpi': '3200', 'buttons': '5'})
Сгенерировано и добавлено 20 товаров.
```

Рис. 2. Сгенерированные компьютерные товары

Введем следующий запрос: «Мне нужен компьютер для видеомонтажа и обработки

фото». Структурированный ответ нейросети представлен на рис. 3.

```
Ответ нейросети: {
  "category": "настольные компьютеры",
  "specs": {
    "ram": ["16 ГБ", "32 ГБ"],
    "storage": ["512 ГБ SSD", "1 ТБ HDD", "2 ТБ HDD"],
    "processor": ["Intel i7", "AMD Ryzen 7"],
    "gpu": ["NVIDIA GTX 1660", "NVIDIA RTX 3060", "AMD Radeon RX 6700"]
  }
}
```

Рис. 3. Структурированный ответ нейросети

Как можно увидеть, пользователю достаточно было охарактеризовать собственную задачу, для которой ему требуется компьютер, чтобы нейросеть смогла указать в ответе списки подходящих комплектующих, а именно производителей графических адаптеров и процессоров, которые могли бы помочь с указанной задачей — видеомонтажом.

2.2. МЕДИЦИНСКИЙ АССИСТЕНТ

Второй пример представляет собой более сложную систему, где языковая модель выступает в роли интеллектуального интерфейса между

пациентом и медицинской информационной системой. В отличие от компьютерного магазина, здесь нейросеть решает не только задачу структурирования данных, но и оценивает критичность состояния пациента.

Основная задача системы – преобразовать описание симптомов в структурированную медицинскую запись,

содержащую список симптомов с их характеристиками, и уровень срочности (низкий, средний, высокий, критический).

Для этого разработан многоступенчатый алгоритм обработки запроса (рис. 4). Первый этап аналогичен компьютерному магазину – нейросеть анализирует текст и возвращает JSON с предварительной оценкой состояния.

```
47 def analyze_symptoms(self, initial_input: str) -> Optional[MedicalTicket]:
48     """Многоступенчатый анализ симптомов с уточнениями"""
49     context = initial_input
50     attempts = 0
51     max_attempts = 3
52
53     while attempts < max_attempts:
54         # Формируем запрос с учетом текущего контекста
55         prompt = f"""
56         Ты медицинский ассистент. Проанализируй описание симптомов и верни JSON:
57         {{
58         |     "symptoms": ["список", "симптомов"],
59         |     "priority": "LOW|MEDIUM|HIGH|CRITICAL",
60         |     "confidence": 0.0-1.0 # Уверенность в анализе
61         | }}
62
63         Правила:
64         1. Если что-то неясно, укажи confidence < 0.7 для этого параметра
65         2. Для симптомов: верни массив, даже если один симптом
66         3. Для priority: используй только указанные значения
67
68         Контекст: "{context}"
69         """
70
71         response = self.bot.send_request(prompt)
72         data = self._parse_response(response)
```

Рис. 4. Первичный анализ симптомов

Особенность реализации – введение параметра `confidence`, означающего уверенность системы в корректности анализа. Если значение ниже 0.7, активируется диалоговый модуль, который не просто сообщает об ошибке, а формулирует контекстно-зависимый

вопрос для уточнения. Например, при запросе «мне плохо» система может уточнить: «Уточните, пожалуйста, что именно вас беспокоит: боль, температура, головокружение или что-то еще?». Блок кода, который реализует эту логику, представлен на рис. 5.

```

74     # Проверяем уверенность в данных
75     if data.get("confidence", 0) >= 0.7:
76         try:
77             priority = Priority[data["priority"].upper()]
78             symptoms = [s.strip() for s in data["symptoms"] if s.strip()]
79
80             if not symptoms:
81                 raise ValueError("Нет симптомов")
82
83             return MedicalTicket(
84                 id=None,
85                 symptoms=symptoms,
86                 created_at=datetime.now(),
87                 priority=priority,
88                 patient_info=context
89             )
90         except Exception as e:
91             print(f"Ошибка создания тикета: {str(e)}")
92             data["confidence"] = 0.5 # Принудительно понижаем уверенность
93
94     # Если уверенность низкая, уточняем
95     clarification_needed = []
96     if data.get("confidence", 0) < 0.7:
97         clarification_needed.append("общее состояние")
98     elif len(data.get("symptoms", [])) < 1:
99         clarification_needed.append("симптомы")
100     elif "priority" not in data:
101         clarification_needed.append("степень срочности")
102
103     if clarification_needed:
104         question = self._ask_clarification(
105             ", ".join(clarification_needed),
106             context
107         )
108         print(question)
109         user_response = input("Ваш ответ: ")
110         context += f". Уточнение: {user_response}"
111         attempts += 1
112     else:
113         break
114
115     return None

```

Рис. 5. Генерация уточняющих вопросов

Пример работы системы (рис.6) демонстрирует, как первоначальный расплывчатый запрос «Очень странно себя чувствую» преобразуется в точное обращение после уточняющего вопроса.

Важно отметить, что система не ставит диагнозов — она лишь классифицирует симптомы по степени срочности, оставляя окончательное решение за медицинским персоналом.

Опишите ваши симптомы (например: 'болит голова и температура'):
 > Очень странно себя чувствую
 Могли бы вы уточнить, какое именно общее состояние вы имеете в виду?
 Ваш ответ: Как минимум головокружение, но есть что-то еще...
 Можете, пожалуйста, уточнить, как вы оцениваете свое общее состояние? Какие еще симптомы вас беспокоят?
 Ваш ответ: Думаю, что слабость, какое-то бессилие

Запись обращения в скорую помощь #3 создана.
 Симптомы: головокружение, слабость, бессилие
 Приоритет: Средний
 Статус: Новый

Рис. 6. Пример многоступенчатого диалога с медицинским ассистентом

В то же время, если мы сможем сразу точно указать на беспокоящие симптомы, то нейросеть не станет задавать

дополнительных вопросов. Пример такого обращения представлен на рис. 7.

Опишите ваши симптомы (например: 'болит голова и температура'):
 > Колет в области сердца, быстро бьется, хотя я ничего не делаю

Запись обращения в скорую помощь #5 создана.
 Симптомы: колющие боли в области сердца, учащенное сердцебиение
 Приоритет: Высокий
 Статус: Новый

Рис. 7. Пример обращения к медицинскому ассистенту с конкретной жалобой

Таким образом мы можем обрабатывать неструктурированные описания, которые типичны для экстренных ситуаций, сохраняя при этом возможность интеграции с формализованными медицинскими системами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанная работа наглядно демонстрирует возможности больших языковых моделей в клиентоориентированных сервисах. Рассмотренные примеры в виде компьютерного магазина и медицинского ассистента раскрывают новый способ взаимодействия человека с цифровыми системами, где естественный язык становится полноценным интерфейсом для работы со сложными структурированными данными.

Ключевое достижение представленных решений — преодоление традиционного ограничения NLP-систем, которые либо

работали с жесткими шаблонами, либо генерировали свободный текст без гарантий структурной целостности [11]. Разработанная архитектура успешно сочетает гибкость обработки естественного языка с точностью формальных систем.

Особого внимания заслуживает реализованный в медицинском ассистенте механизм контекстно-зависимых уточнений. В отличие от большинства существующих чат-ботов, которые либо принимают ввод «как есть», либо требуют заполнения жестких форм, разработанные модули имитируют естественную логику профессионального диалога — задают целенаправленные вопросы, когда уверенность в интерпретации недостаточна. Это не только повышает точность, но и улучшает пользовательский опыт [12].

Техническая реализация на базе Azure AI [13] подтвердила важность настройки языковых моделей под конкретные домены. Современные большие языковые модели

общего назначения требуют специальных промптов для корректного распознавания профессиональной терминологии, механизмов валидации выходных данных и интеграционных адаптеров для существующих бизнес-процессов.

Практическая значимость работы подтверждается не только техническими метриками, но и потенциальным социальным эффектом. Внедрение таких систем способно снизить нагрузку на операторов колл-центров, уменьшить время обработки экстренных медицинских обращений, а также повысить доступность

сложных каталогов для неподготовленных пользователей [14].

Таким образом, представленные решения открывают путь к новому поколению интерфейсов, где коммуникация с информационной системой происходит на человеческом языке без потери точности машинной обработки. Дальнейшие исследования в этом направлении должны фокусироваться на повышении надежности систем и разработке стандартов интеграции больших языковых моделей в архитектуры коммерческих программных продуктов [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краткая история NLP – Natural Language Processing . – URL : <https://habr.com/ru/articles/713804/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
2. Агентный AI: как модульный подход изменит будущее искусственного интеллекта– URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/news/880716/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
3. Что такое промт, для чего он нужен и как правильно его написать. – URL : <https://trends.rbc.ru/trends/industry/66fa5ba09a79470e8f5a71d9> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
4. Оливье Келен, Мари-Алис Блете. Разработка приложений на базе GPT-4 и ChatGPT. – Астана: «Спринт Бук», 2024. – 192 с. – Текст : непосредственный.
5. Microsoft запустила платформу Azure AI Foundry Labs. – URL : <https://habr.com/ru/companies/bothub/news/884490/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
6. GPT-4o mini: advancing cost-efficient intelligence. – URL : <https://openai.com/index/gpt-4o-mini-advancing-cost-efficient-intelligence/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
7. Prototyping with AI models. – URL : <https://docs.github.com/en/github-models/prototyping-with-ai-models> (дата обращения: 22.04.2025). – Текст : электронный.
8. JSON: что это за формат и как с ним работать [Электронный ресурс]. – URL : <https://skillbox.ru/media/code/json-что-eto-za-format-i-kak-s-nim-rabotat/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
9. Faker. – URL: <https://pypi.org/project/Faker/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
10. Игра в имитацию: используем Python для генерации синтетических данных для ML и не только. URL : <https://habr.com/ru/articles/888830/> (дата обращения: 29.04.2025). – Текст : электронный.
11. Ваш путеводитель по миру NLP (обработке естественного языка). – URL : <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/705482/> (дата обращения: 22.04.2025). – Текст : электронный.
12. Как улучшить пользовательский опыт с помощью чат-ботов. – URL : <https://outcode.ru/blog/kak-uluchshit-polzovatel'skiy-opyt-s-pomoschyu-chat-botov> (дата обращения: 22.04.2025). – Текст : электронный.
13. Azure AI services documentation. – URL : <https://learn.microsoft.com/en->

[us/azure/ai-services/](https://us.azure/ai-services/) (дата обращения : 22.04.2025). – Текст : электронный.

14. Тихая революция: как большие языковые модели изменяют бизнес. – URL : <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/cmrm/65113f2e9a79473de4a72e13/> (дата обращения: 22.04.2025). – Текст : электронный.

Сведения об авторах:

Седых Ирина Александровна

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматизированных систем управления,
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Жуков Максим Сергеевич

студент кафедры автоматизированных систем управления,
Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

15. ИИ в электронной коммерции: как он меняет отрасль. – URL : <https://firecode.ru/blog/ii-v-elektronnoj-kommercii-kak-on-menyayet-otrasl> (дата обращения: 22.04.2025). – Текст : электронный.

Information about authors:

Sedykh Irina Aleksandrovna

Doctor of Technical Sciences,
Associate professor,
Professor of the Department of Automated Control Systems,

Lipetsk State Technical University.

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

e-mail: sedykh-irina@yandex.ru

Zhukov Maxim Sergeevich

Student of the Department of Automated Control Systems

Lipetsk State Technical University.

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

А.А. КАНЮГИН

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СБОЕВ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА-ПЕСКА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье проведен анализ причин технологических сбоев в производстве сахара-песка на основе применения метода главных компонент к множеству технологических параметров, включая параметры тепловых процессов. Независимо от целей и задач, которые предъявляются к конечному результату, основным требованием является оперативность его проведения. В данном случае априори в процессе имеется известное множество всех потенциальных источников возмущений, которые могли привести к отклонению параметров технологического процесса от номинальных значений (сбою). Метод главных компонент может рассматриваться как эффективный инструмент для оперативного выделения реальных источников возмущений из множества потенциальных.

Ключевые слова: тепловые процессы, метод главных компонент, регулирование технологических процессов, выпарная станция.

A.A. KANIUGIN

APPLICATION OF THE PRINCIPAL COMPONENT METHOD TO IDENTIFY THE CAUSES OF TECHNOLOGICAL FAILURES IN THE PRODUCTION PROCESS OF GRANULATED SUGAR

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The causes of technological failures in the production of granulated sugar can be analyzed through the application of the principal component method to a number of operating parameters including the parameters of thermal processes. Irrespective of the goals and tasks concerning the final result, the main requirement is the promptness of applying the method. In this case, a priori, there is a known number of all potential sources of disturbances in the process that could lead to a deviation of the operating parameters from the nominal values (failure). The principal component method can be considered as an effective tool for the prompt identification of real sources of disturbances among the potential ones.

Key words: thermal processes, principal component method, technological process control, evaporation station.

ВВЕДЕНИЕ

В производстве сахара-песка протекает множество последовательных и параллельных технологических, а также тепловых процессов, связанных между собой весьма разнообразно, см. [1] – [4]. Если рассматривать производство сахара как систему с заданными номинальными технологическими параметрами, а сбой в производстве – как отклонение от этих параметров, то необходимо найти

процессы и причины, которые приводят к отклонению в системе. Применение в данном случае метода главных компонент имеет ряд преимуществ, таких как преобразование многомерных данных с сохранением наиболее важной информации, сокращение избыточности, графическое представление большого количества данных в виде двух или трех главных компонент. Исходя из этого, применение данного метода помогает

задать направление поиска основных причин тех или иных отклонений.

ВЫБОР ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА

На рис.1 изображен тренд уровня конденсата в секции сборника конденсата. Всего непрерывно произведено 93 600 замеров с периодичностью в 0,5 секунд.

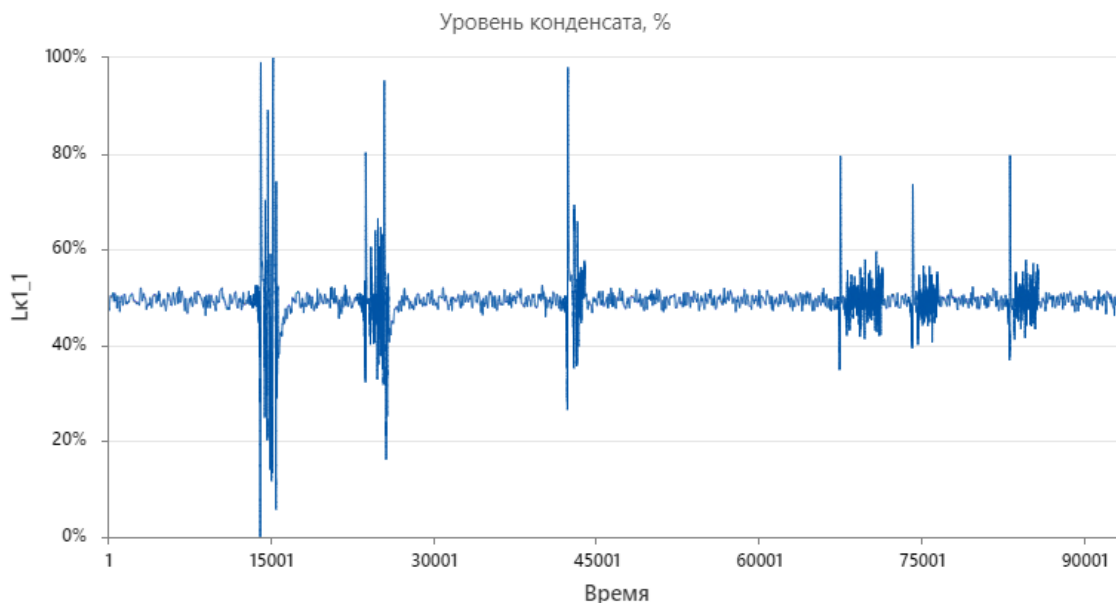


Рис.1. Тренд уровня конденсата в сборнике

Видно, что с определенной периодичностью происходит «всплеск» уровня конденсата в секции сборника.

В этот момент времени уровень конденсата резко меняется. Данный параметр является регулируемым.

Регулирование уровня происходит за счет автоматической заслонки, работа которой управляется PID-регулятором. На рис. 2 показан тренд со значениями положения автоматической заслонки.

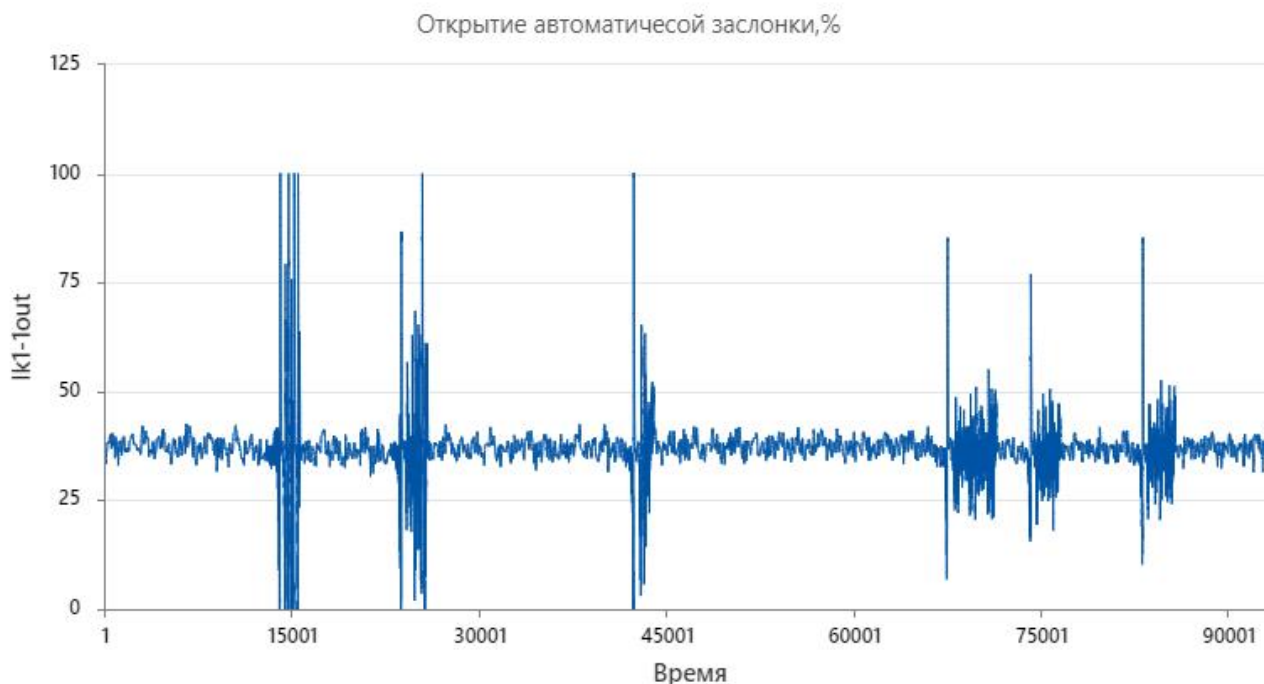


Рис.2. Тренд открытия автоматической заслонки

Визуальный анализ трендов показывает, что существуют области значений с относительно небольшой величиной колебаний (45 000–60 000). Это является нормальным режимом работы. Области «всплесков» имеют величину колебаний от 0 % до 100 %, где 50 % соответствует номинальному режиму. В данном случае это рассматривается как сбой. Для

исключения причины сбоя в работе регулирующего органа рассмотрим рис. 3. В промежутке 13 800–15 500 происходит резкое изменение уровня в короткий промежуток времени. В значениях 13 970, 15 092 открытие автоматической заслонки достигает 100 %, но уровень конденсата продолжает расти, что говорит о возникновении возмущения.

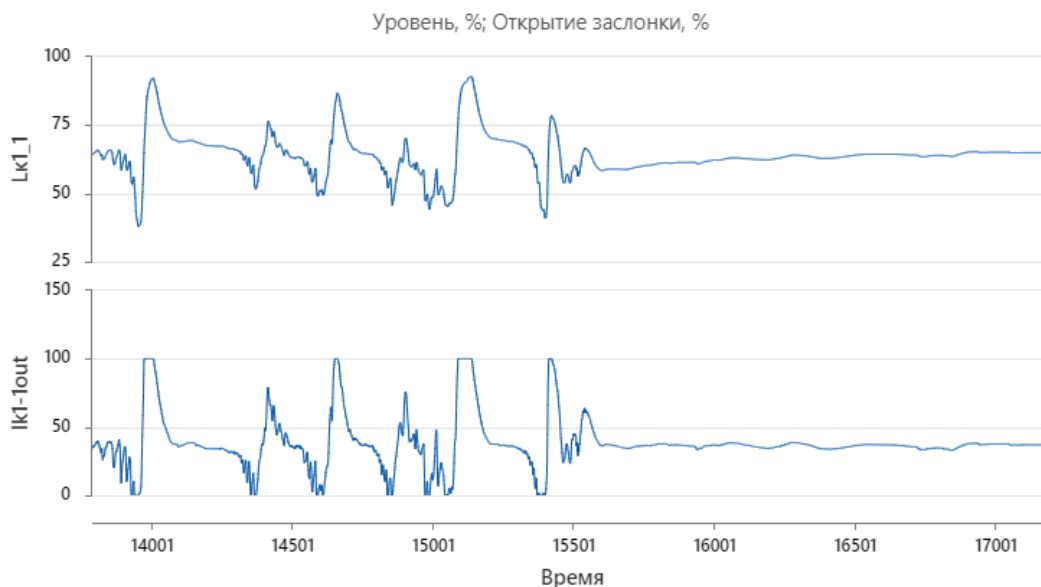


Рис.3. Тренды а периоде 13 800–17 500

Согласно схеме процессов основных и вспомогательных станций сахарного завода потенциальными источниками возмущения может быть множество процессов, описанных в [1], [2]. Конденсатный сборник относится к конденсатному хозяйству. По ранее построенной (см. [1], [2]) окрестностной

модели (см. [5]) теплового процесса производства сахара-песка и принципиальной тепловой схеме выпарной станции сахарного завода можно произвести выбор параметров для анализа на предмет источника возмущения. Выбранные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры для анализа

№	Наименование	Обозн.	Ед. изм.
1	Суммарный перепад давления на выпарной станции	dP_{BY}	Бар
2	Уровень раствора в 1-А корпусе выпарной станции	L_{BY1A}	%
3	Уровень раствора в 1-Б корпусе выпарной станции	L_{BY1B}	%
4	Уровень конденсата в секции 1-1 сборника конденсата	$L_{к1_1}$	%
5	Давление над уровнем конденсата в секции 1-1	$P_{к1_1}$	Бар
6	Уровень конденсата в секции 1-2 сборника конденсата	$L_{к1_2}$	%
7	Расход конденсата и сборника конденсата	$F_{к1}$	м ³ /час
8	Давление ретурного пара перед выпарной станцией	P_{pet}	Бар
9	Процент открытия автоматической заслонки 1-1	$l_{к1-1out}$	%

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Для применения метода воспользуемся программой STATISTICA 10 [6]. Для каждой переменной есть 1801 численное значение в выборке. Построим график собственных значений, который показан на рис. 4. На графике обозначены 9

факторов которые объясняют 100 % общей дисперсии. При использовании графических методов выделения основных факторов видно, что резкое замедление убывания возникает после третьей точки. Следовательно, графически можно выделить три фактора.

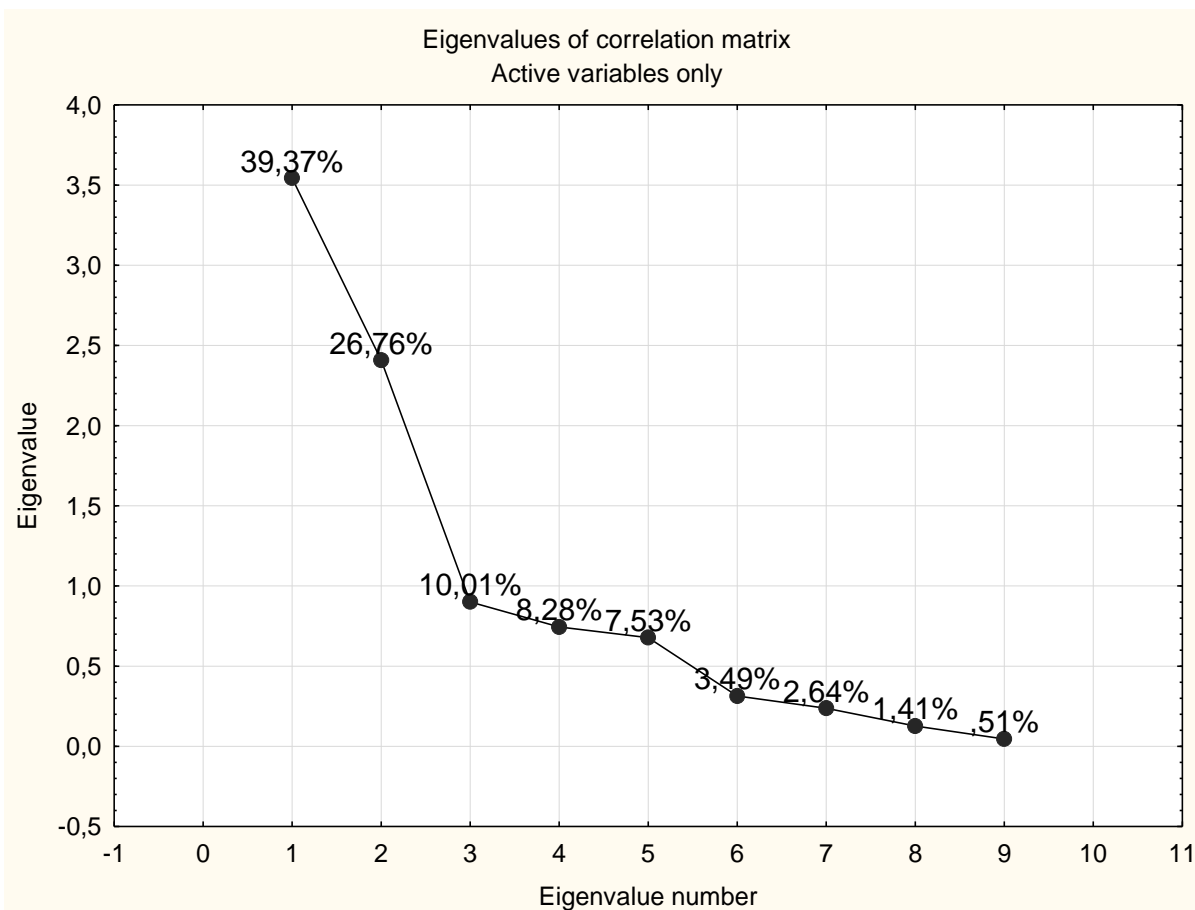


Рис.4. Собственные значения корреляционной матрицы

В столбце Eigenvalue таблицы собственных значений (табл. 2) представлены дисперсии факторов –

собственные числа. Согласно критерию Кайзера, отбираем факторы с собственными значениями больше 1.

Таблица 2

Таблица собственных значений

Eigenvalues of correlation matrix, and related statistics (Лист1 in 0_13600-15600) Active variables only				
Value number	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	3,543310	39,37012	3,543310	39,3701
2	2,408080	26,75645	5,951391	66,1266
3	0,900598	10,00664	6,851989	76,1332
4	0,744944	8,27715	7,596933	84,4104
5	0,678011	7,53346	8,274944	91,9438
6	0,314531	3,49479	8,589475	95,4386
7	0,237481	2,63868	8,826956	98,0773
8	0,126784	1,40871	8,953739	99,4860
9	0,046261	0,51401	9,000000	100,0000

Согласно критерию Кайзера, отбираем факторы с собственными значениями больше 1. Первый фактор объясняет 39,37 % общей дисперсии, второй фактор объясняет 26,76 % общей дисперсии. Таким образом Третий фактор отпадает в силу критерия Кайзера. Определим факторные нагрузки при корреляции выделенных переменных более 0,8. Так как исходные переменные, согласно окрестностной структуре тепловых и

технологических процессов, имеют прямую связь, то они имеют высокую степень корреляции. В нашем случае необходимо выделить переменные с наивысшей степенью корреляции. В табл. 3 показаны факторные нагрузки с выделенными переменными. При построении применен поворот осей Varimax normalized для лучшей интерпретации.

Таблица 3

Факторные нагрузки

Variable	Factor Loadings (Varimax normalized) (Лист1 in 0_13600-15600) Extraction: Principal components (Marked loadings are >,800000)	
	Factor 1	Factor 2
Ppet	-0,844082	0,144967
LBY1A	0,865348	0,028073
LBY1B	0,786288	-0,060470
d PBY	-0,860433	0,065384
Pk1_1	0,031538	0,841039
Lk1_1	0,141990	-0,914772
Lk1_2	0,117667	-0,787703
Fk1	0,366978	-0,318021
lk1-1out	0,064757	-0,813712
Expl.Var	2,993762	2,957628
Prp.Totl	0,332640	0,328625

Первый фактор больше всего коррелирует с P_{pet} , dP_{BY} , L_{BY1A} . Второй фактор больше всего коррелирует с L_{k1-1} , P_{k1-1} , $l_{k1-1out}$. Ниже представлена табл. 4 со значениями общностей переменных.

Общность – это доля объясненной дисперсии, которая характеризует степень общности переменной с другими переменными по заданному числу факторов. Видно, что самая высокая степень общности с другими переменными у L_{k1-1} , dP_{BY} , L_{BY1A} .

Значения общности переменных

Variable	Communalities (Лист1 in 0_13600-15600) Extraction: Principal components Rotation: Varimax normalized		
	From 1 Factor	From 2 Factors	Multiple R-Square
Ppet	0,712475	0,733490	0,794412
LBY1A	0,748827	0,749615	0,742185
LBY1Б	0,618249	0,621906	0,651918
d PBY	0,740344	0,744619	0,826159
Pk1_1	0,000995	0,708340	0,699624
Lk1_1	0,020161	0,856969	0,904198
Lk1_2	0,013845	0,634321	0,600453
Fk1	0,134673	0,235810	0,324730
lk1-1out	0,004193	0,666320	0,843755

Проведем регрессионный анализ для L_{k1-1} , в зависимости от переменных с наибольшей степенью корреляции по

факторам №1 и №2. Результаты представлены в табл. 5. Коэффициент детерминации R^2 равен 0,86.

Значения общности переменных

N=1801	Regression Summary for Dependent Variable: Lk1_1 (Лист1 in 0_13600-15600) R=,931468 R?=,867633 Adjusted R?=,867264 F(5,1795)=2353,1 p<0,0000 Std.Error of estimate:3,7628					
	Beta	St. Err. of Beta	B	St. Err. of B	t(1795)	p-value
Intercpt			686,070	28,20300	24,3261	0,000000
Pk1_1	-0,337109	0,010292	-85,281	2,60378	-32,7529	0,000000
lk1-1out	0,705009	0,009891	0,291	0,00408	71,2755	0,000000
Ppet	0,212346	0,016157	224,909	17,11318	13,1425	0,000000
LBY1A	-0,100000	0,011632	-0,758	0,08815	-8,5971	0,000000
d PBY	-0,388514	0,016709	-391,141	16,82225	-23,2514	0,000000

ВЫВОДЫ

Применение метода главных компонент позволяет проверить взаимосвязи множества переменных между собой. В данном случае были рассмотрены параметры, связь с ключевым параметром которых предполагалась, но точно не была определена, как и не была определена величина влияния в совокупности. На примере изменения уровня конденсата в конденсатном сборнике удалось выявить влияние изменения перепада давления на выпарной станции dP_{BY} , давления ретурного пара P_{pet} , уровня раствора в 1-А корпусе выпарной станции L_{BY1A} на «всплеск» уровня L_{k1-1} . В применении

данного метода важно знать ориентиры и возможные зависимости между исследуемым параметром (или группой параметров) с выбираемыми переменными. В данном случае основой для выбора послужила окрестностная структура теплового процесса производства сахара-песка. Но такие переменные как температура в данном анализе были исключены по причине прямой зависимости от давления. Полученные результаты на практике подтверждает адекватность применения метода главных компонент в анализе сбоев в технологическом производстве сахара-песка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Канюгин, А.А.** Технологические и тепловые процессы на предприятиях по производству сахара / А.А. Канюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 4(57). – С. 5–9.

2. **Канюгин, А.А.** Технологические и тепловые процессы выпарной станции на предприятиях по производству сахара / А.А. Канюгин. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2025. – № 1(58). – С. 20–27.

3. **Силин, П.М.** Технология сахара/ П.М. Силин. – Москва : Пищевая

промышленность, 1967. – 625 с. – Текст : непосредственный.

4. **Штангеев, К.О.** Рационализация теплоиспользования в свеклосахарной промышленности / К.О. Штангеев. – Москва : МГПП-Пищепромэнергонадка, 2005. – 68 с. – Текст : непосредственный.

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

6. **Халафян, А.А.** STATISTICA 6. Статистический анализ данных / А.А. Халафян. – Москва : Бином, 2007. – 507 с. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Канюгин Андрей Артурович

аспирант кафедры прикладной математики и системного анализа,

Липецкий государственный технический университет. 398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

kanyginandrey@yandex.ru

Information about the authors:

Kaniugin Andrey Arturovich

Postgraduate Student at the Department of Applied Mathematics and Systems Analysis, Lipetsk State Technical University. 398055, Russia, Lipetsk, 30, Moskovskaya.

kanyginandrey@yandex.ru

DOI 10.53015/30343275_2025_3_21
УДК 621.31:669.162.2

А.Г. АРЗАМАСЦЕВ, А.И. ШАРАПОВ

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ
ВАРИАНТОВ УСТАНОВКИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ДОМЕННОГО ГАЗА В СХЕМАХ С
ГАЗОВЫМИ УТИЛИЗАЦИОННЫМИ БЕСКОМПРЕССОРНЫМИ ТУРБИНАМИ**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье выполнен анализ эффективности применения подогрева доменного газа, получена зависимость по расчету значения оптимального давления подогрева для схем с использованием на металлургических предприятиях газовых утилизационных бескомпрессорных турбин. Проведена оценка энергетической эффективности при использовании разных вариантов установки подогревателя доменного газа.

Ключевые слова: газовая утилизационная бескомпрессорная турбина, подогрев газа, оптимальное давление подогрева.

A.G. ARZAMASTSEV, A.I. SHARAPOV

**EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY FOR VARIOUS OPTIONS INSTALLING A
DOMESTIC GAS HEATER IN SCHEMES WITH GAS UTILIZATION
COMPRESSORLESS TURBINES**

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: Efficiency of using blast gas heating is analyzed for patterns with gas utilization compressorless turbines at iron and steel enterprises, dependence is obtained as to the calculation of the optimal heating pressure value. Energy efficiency is evaluated for using different options of a blast gas heater position.

Keywords: gas recovery compressorless turbine, gas heating, optimal heating pressure.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время повышение энергоэффективности современных российских металлургических предприятий является актуальной задачей. Решение данной проблемы может быть только комплексным и сочетать несколько направлений, одним из которых является максимально полное использование потенциала вторичных энергоресурсов, образующихся в ходе производственных процессов на самом предприятии. Повышение эффективности использования

вторичных энергоресурсов дает возможность снизить затраты на закупку топлива у сторонних организаций и позволит уменьшить себестоимость конечной продукции. Одним из таких вторичных энергоресурсов является доменный газ. Доменный газ образуется в большом количестве в доменной печи при производстве чугуна (на 1 тонну вышедшего из печи жидкого чугуна приходится около 2,2 тонн доменного газа), имеет избыточное давление до 3 атм и температуру после газоочистки около 50–60 °С [1].

Основной энергетической составляющей доменного газа является его теплота сгорания, поэтому доменный газ на металлургических предприятиях используют как топливо, однако дополнительным энергетическим потенциалом доменного газа является его избыточное давление. Теме использования избыточной энергии давления газа при его расширении в турбинах для получения электроэнергии посвящен ряд работ [2–8]. На большинстве металлургических предприятий доменный газ перед сжиганием пропускают через газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ). В ГУБТ в процессе расширения газ совершает полезную работу, которая затем преобразуется в электроэнергию в соединенных с ГУБТ электрогенераторами.

Повышение электрической мощности ГУБТ можно достигнуть при использовании подогрева газа. В работах [9–11], посвященных теме использования подогрева газов при их прохождении через газовые турбины или турбодетандеры различной мощности, указывается на потенциальные перспективы применения подогрева газа и отмечена принципиальная возможность его осуществления. Энергоэффективность схемы с подогревом определяется конечной температурой подогрева газа и местом установки подогревателя: перед ГУБТ или между ее ступенями. При принятии решения о промежуточном расположении подогревателя необходимо определить оптимальное давление доменного газа в подогревателе, при котором достигается максимальная мощность ГУБТ. Стоит отметить, что в данных работах рассматривается только предварительная установка подогревателя, не проведено сравнение энергоэффективности схем с оптимально установленным подогревателем и предварительным подогревом.

Целью данной статьи является определение энергетической эффективности от применения различных схем подогрева и поиск оптимального

расположения подогревателя доменного газа.

ПОДОГРЕВ ДОМЕННОГО ГАЗА

Применение подогрева газа позволяет повысить выработку мощности ГУБТ, но требует дополнительных затрат, поэтому решение о применении подогрева должно приниматься только на основании комплексного технико-экономического анализа. Первым шагом такого анализа является определение энергетического эффекта от использования подогрева газа.

Для организации подогрева необходимо выбрать источник подогрева и место установки подогревателя. Рассмотрим возможные источники подогрева доменного газа, имеющиеся на металлургическом предприятии с полным производственным циклом.

Одним из вариантов является подогрев доменного газа за счет сжигания топлива, в качестве которого можно использовать избыточное количество горючих вторичных энергоресурсов [9]. Такая схема сильно удорожает и усложняет процесс подогрева, так как в этом случае придется организовать процесс горения. Применять этот способ можно только при наличии избыточного количества горючих вторичных энергоресурсов.

Более целесообразным представляется применение уходящих газов после сжигания различных топлив.

Уходящие газы металлургических печей обладают высокой температурой (до 1110 °С), но их энергетический потенциал, как правило, используется сначала в рекуператорах печей для подогрева воздуха, а затем в котлах-утилизаторах для получения из воды пара, идущего на производственные нужды. Также не всегда металлургические цеха располагаются рядом с цехами, в которых установлены ГУБТ, что потребует проведения дополнительных газопроводов.

Оптимальным вариантом представляется использование для подогрева уходящих газов после доменного воздухоподогревателя, которые имеют достаточно высокую температуру (до 400 °С). На большинстве металлургических предприятий

физическая энергия этих газов не используется. К тому же доменные цеха расположены относительно близко от мест расположения ГУБТ, что уменьшает длину дополнительных газовых коммуникаций.

Установка подогревателя перед газовой турбиной является наиболее простым вариантом, так как при этом конструкция турбины остается одноступенчатой, однако использование оптимально установленного промежуточного теплообменника газа позволяет повысить мощность ГУБТ.

Мощность ГУБТ при предварительном подогреве доменного газа будет находиться по формуле:

$$N = G \cdot c'_p \cdot T_{\text{под}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_d \cdot \eta_{\text{э.м.}}, \quad (1)$$

где G – расход проходящего через ГУБТ доменного газа, $\text{нм}^3/\text{с}$; $P_0, P_{\text{вых}}$ – давление газа на входе в турбину и на выходе из нее соответственно, Па; $T_{\text{под}}$ – температура подогрева газа, К; k – показатель адиабаты доменного газа; c'_p – изобарная объемная теплоемкость доменного газа, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; η_d – внутренний относительный КПД ГУБТ; $\eta_{\text{э.м.}}$ – электромеханический КПД ГУБТ.

Необходимо отметить, что выработанная мощность прямо пропорциональна значению термодинамической температуры газа (К) на входе в турбину, что обуславливает применение подогрева газа как одного из возможных вариантов повышения выработки мощности.

Рассмотрим расчет мощности ГУБТ при установке промежуточного подогревателя. В этом случае ГУБТ можно рассматривать как двухступенчатую турбину. Прошедший газоочистку доменный газ поступает в первую ступень турбины, в которой расширяется до определенного давления, при этом процесс расширения газа сопровождается его охлаждением. Затем доменный газ поступает в промежуточный подогреватель, где нагревается до требуемой температуры подогрева. После подогревателя газ

поступает во вторую ступень турбины, в которой происходит дальнейшее расширение газа до конечного давления, чуть большего давления окружающей среды.

Мощность ГУБТ при установке промежуточного подогревателя доменного газа будет находиться по формуле:

$$N = G \cdot c'_p \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{под}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_d \cdot \eta_{\text{э.м.}} + G \cdot c'_p \cdot T_{\text{под}} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{под}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \eta_d \cdot \eta_{\text{э.м.}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{под}}$ – давление газа в промежуточном подогревателе, Па; T_0 – температура газа перед ГУБТ, К.

Из анализа уравнения (2) получена зависимость для нахождения величины оптимального давления газа в подогревателе, при котором достигается максимальная мощность ГУБТ:

$$P_{\text{под}}^{\text{опт}} = \sqrt{P_0 \cdot P_{\text{вых}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{под}}}{T_0} \right)^{\frac{k}{2 \cdot (k-1)}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{под}}^{\text{опт}}$ – оптимальное давление газа в подогревателе, Па.

Чем выше температура подогрева, тем больше оптимальное давление установки подогревателя. Начиная с определенного значения температуры подогрева, оптимальное давление сравнивается с давлением газа на входе в турбину, в этом случае наилучшим вариантом будет установка подогревателя перед ГУБТ.

На основании зависимости (3) получена формула по расчету значения температуры подогрева, при которой оптимальным будет расположение подогревателя перед ГУБТ:

$$T_{\text{под}}^{\text{перед}} = T_0 \cdot \left(\frac{P_0}{P_{\text{вых}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (4)$$

Сравнивая подогрев газа в одном и том же теплообменнике перед турбиной и между ее ступенями при равенстве значений конечных температур и расходов газа, следует отметить, что промежуточный подогрев потребует

большого расхода греющей среды, чем предварительный, так как доменный газ в процессе расширения в первой ступени турбины будет охлаждаться. Разница в расходах греющего теплоносителя в предварительном и промежуточном подогревателе будет снижаться при росте величины оптимального давления газа в промежуточном подогревателе.

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ПОДОГРЕВА

Проведем анализ энергетической эффективности от использования различных вариантов установки подогревателя в схемах с ГУБТ.

Принимаем следующие допущения для проведения расчетов. Состав доменного газа: $CO=30\%$, $CO_2=20\%$, $N_2=50\%$. Температура доменного газа перед ГУБТ $60\text{ }^\circ\text{C}$, абсолютное давление 3 бар, давление газа на выходе из ГУБТ 1,1 бар. Расход газа равен 612,5 тыс $\text{м}^3/\text{ч}$, что обеспечивает при внутреннем относительном КПД ГУБТ 0,85 и электромеханическом КПД 0,97 выработку мощности 15 МВт для схемы с отсутствием подогрева доменного газа. Падением давления газа в подогревателе пренебрегаем.

Для расчетов необходимо задаться диапазоном температур подогрева доменного газа в подогревателе. Минимальную температуру подогрева газа примем $100\text{ }^\circ\text{C}$. Максимальный подогрев доменного газа ограничивается определяемой по формуле (4) температурой, которая в данном случае составляет $177\text{ }^\circ\text{C}$.

Расчет мощности ГУБТ для схемы с предварительным подогревом проводится по формуле (1). Для схемы с промежуточным подогревом по зависимости (3) определяется оптимальное давление газа в подогревателе, которое затем используется для расчета мощности ГУБТ по формуле (2).

На рисунке приведены зависимости мощности ГУБТ от температуры подогрева газа для подогревателя перед

ГУБТ и оптимально расположенного промежуточного подогревателя.

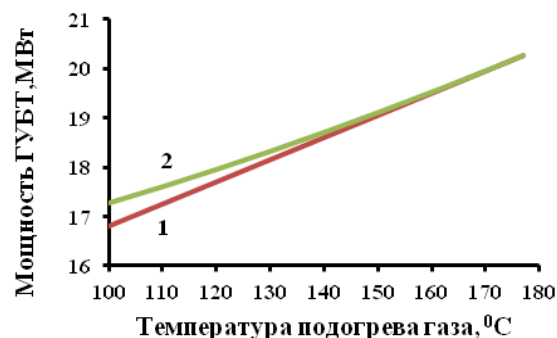


Рис. Зависимость выработанной мощности ГУБТ от температуры подогрева газа:
1- схема с предварительным подогревом;
2- схема с оптимальным промежуточным подогревом газа

С увеличением температуры подогрева газа прирост мощности при оптимально установленном промежуточном подогревателе по сравнению с подогревателем перед ГУБТ будет все время уменьшаться, пока при достижении температурой подогрева значения, определяемого по формуле (4), не станет равным нулю. При температурах подогрева, равных или превышающих вычисленное по формуле (4) значение температуры, наибольшая мощность будет достигнута при установке подогревателя перед ГУБТ.

Прирост мощности от оптимального установленного промежуточного подогревателя по сравнению с подогревателем перед ГУБТ будет составлять до 0,46 МВт (что соответствует приросту мощности до 2,7 процентов), достигая в рассмотренном примере наибольшего значения при температуре подогрева газа $100\text{ }^\circ\text{C}$. Следует отметить, что данный прирост мощности будет быстро уменьшаться с ростом температуры. Зададимся минимальной разницей мощностей между двумя схемами в 0,1 МВт, при которой можно считать эффект от оптимального промежуточного подогрева несущественным. Для данного случая такая разница мощностей достигается при температуре подогрева $140\text{ }^\circ\text{C}$, что позволяет рекомендовать установку

предварительного подогревателя при температурах подогрева от 140 °С и выше.

При сравнении рассмотренных схем с подогревом газа со схемой без подогрева можно сделать вывод, что в рассматриваемом диапазоне температур применение подогрева позволяет увеличить выработку мощности от 1,8–2,27 МВт до 5,27 МВт (относительный прирост составит от 12–15 до 35%). Можно сделать вывод, что применение подогрева во всех рассмотренных диапазонах температур может значительно повысить выработку мощности ГУБТ.

ВЫВОД

В статье проведено исследование энергоэффективности от применения различных вариантов подогрева доменного газа для схем с ГУБТ. Получена зависимость по определению оптимального давления промежуточного подогрева, при котором работа ГУБТ

максимальна. Для рассмотренного примера показано, что разница в выработке мощности между вариантами с оптимальным промежуточным и предварительным подогревом может составлять до 0,46 МВт (относительный прирост до 2,7 %). Показано, что при достижении температурой подогрева определенного значения подогреватель необходимо устанавливать перед ГУБТ и получена формула по определению данной температуры. При более низких температурах подогрева энергетическая эффективность выше у оптимально установленного промежуточного подогревателя. По сравнению с вариантом с отсутствием подогрева прирост мощности ГУБТ для любой из рассмотренных схем с подогревом достаточно существенен и составляет от 12 до 35 процентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кудрин, В.А.** Технология получения качественной стали / В.А. Кудрин, В.М. Парма. – Москва : Металлургия, 1994. – 320 с. – Текст : непосредственный.

2. **Шарапов, А.И.** Совершенствование схемы снабжения холодным дутьём доменных печей / А.И. Шарапов, Ю.В. Шацких, Р.М. Некрасов. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Энергетика. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 59–69.

3. **Сверкач, И.Е.** Перспективы внедрения газовых утилизационных бескомпрессорных турбин / И.Е. Сверкач. – Текст : непосредственный // Сталь. – 2004. – № 2. – С. 2-4

4. **Варганова, А.В.** Комплексная оптимизация режимов работы промышленных тепловых электростанций / А.В. Варганова, Н.Ф. Джагаров. – Текст : непосредственный // Электроэнергетические системы и комплексы. – 2020. – № 4(49). – С.11–16.

5. **Cinella, P.** Robust optimization of dense gas flows under untertrain operating conditions / P.Cinella, S.Hercus.– Text :

immediate // Computers und fluids. – 2010. – P.1893-1908.

6. **Congedo, P.** Shape optimization for dense gas flows in turbine cascades / P. Congedo, P. Cinella, C. Corre. – Text : immediate // Proceeding of ICCFD4 . – 2006. – P. 555–560.

7. Влияние детандер-генераторного агрегата на работу двигателей внутреннего сгорания в составе когенерационных котельных / А.Г. Арзамасцев, А.И. Шарапов, Ю.В. Шацких, М.С. Никифоров. – Текст : непосредственный // Новое в российской электроэнергетике. – 2024. – № 10. – С. 31–36. – EDN TZEFFV.

8. **Lemort, V.** Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle / V. Lemort, S. Quoilin, C. Cuevas [et al].– Text : immediate // Applied Thermal Engineering. – 2009. –Vol. 29. – P. 3094–3102.

9. **Krähenbühl, D.** Theoretical and experimental results of a mesoscale electric power generation system from pressurized gas flow / D. Krähenbühl, C. Zwysig, H. Weser [et. al]. – Text : immediate // IOP

Publishing, Journal of Micromechanics and Microengineering. –2009. – № 19. – P. 1–7.

10. **Стребков, А.С.** Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа / А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий. – Текст : непосредственный // Вестник Брянского государственного университета. –2013. – №4. – С. 77–86.

11. **Лукин, С.В.** Модель сжигания доменного газа в смешивающем подогревателе перед газовой утилизационной безкомпрессорной турбиной / С.В. Лукин. – Текст : непосредственный // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – № 2(83). – С.18-24.

12. **Шарапов, А.И.** Снабжение холодным дутьем доменных печей при совместной работе двух воздуходувок с использованием струйного аппарата / А.И. Шарапов, Р.М. Некрасов, М.С. Никифоров // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2023. – № 1(50). – С. 64-69.

13. **Агабабов, В.С.** О подогреве газа в детандер-генераторных агрегатах / В.С. Агабабов. – Текст : непосредственный // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – № 1. – С.38–42.

14. **Жигулина, Е.В.**, Эффективность подогрева природного газа при использовании детандергенераторных агрегатов на тепловых электрических станциях / Е.В. Жигулина, Н.В. Калинин, В.Г. Хромченков. – Текст : непосредственный // Новости теплоснабжения. –2010. – № 4. – С. 34–37.

15. **Нитченко, К.А.** Анализ вариантов использования пара производственного отбора для увеличения эффективности работы теплоэлектроцентрали / К.А. Нитченко, А.И. Шарапов. – Текст : непосредственный // Молодежь и наука: шаг к успеху : сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 19–20 марта 2020 года / Юго-Западный государственный университет; Московский политехнический университет. Том 5. – Курск : Юго Западный государственный университет, 2020. – С. 208-211. – EDN NHCKVQ.

16. Methods for assessing the impact of technological variables of systems on costs / L.S. Abdullah, A.I. Sharapov, A.G. Arzamastsev [et al.]. – Text : immediate // Tec Empresarial. – 2024. – Vol. 19, No. 1. – P. 2848-2855. – EDN UUZTGA.

Сведения об авторах:

Арзамасцев Алексей Геннадьевич
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры промышленной
теплоэнергетики,
Липецкий государственный технический
университет.

398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
e-mail: arzamastcev-ag@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

Information about the authors:

Arzamastsev Alexey Gennadievich
Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department,
Industrial Heat and Power Engineering
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.

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

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ С ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ И ПАРАМЕТРАМИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье приведены результаты оценки влияния технологических параметров на уровень тепловых потерь. Отмечено, что регулированием шихтовых условий, дутьевым, газодинамическим и шлаковым режимами возможно оказывать влияние на уровень тепловых потерь. Показано, что рост тепловых потерь на 10 МДж/т чугуна вызывает необходимость увеличивать расход топлива на 1,3 кг/т чугуна для их компенсации.

Ключевые слова: охлаждение, тепловые потери, расход топлива, основность шлака, дутьевой режим.

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

RELATIONSHIP BETWEEN HEAT LOSSES WITH COOLING WATER AND BLAST FURNACE OPERATING PARAMETERS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The results of assessing the influence of operating parameters on the heat loss level are presented. It is noted that it is possible to influence the heat loss level by regulating the charge conditions, as well as the blast, gas-dynamic and slag modes. It is shown that an increase in heat losses by 10 MJ/t of hot metal necessitates a fuel consumption increase by 1.3 kg/t of hot metal to compensate for them.

Keywords: cooling, heat loss, fuel consumption, slag basicity, blast mode

ВВЕДЕНИЕ

Охлаждение доменной печи является важным элементом конструкции доменной печи [1-3], обеспечивающим долговечность доменной печи. На долю потерь тепла с охлаждающей водой может приходиться до 10 % от общей тепловой потребности плавки. Это предопределяет тот факт, что величина тепловых потерь может являться важным показателем, который характеризует ход протекания процессов во внутреннем пространстве доменной печи.

Основными факторами, обуславливающими величину тепловых потерь с охлаждающей водой, являются:

- характер развития процессов восстановления [4];
- характер распределения газового потока [4, 5];

- состояние и свойства гарнисажа [6];
- виды дополнительно вдуваемого топлива и выплавляемого чугуна [7, 8];
- остаточная толщина футеровки и конструкция печи [9-11];
- характеристика (форма) зоны когезии [12-14].

Следует отметить, что в зависимости от условий доменной плавки, удельный расход кокса, необходимый для компенсации тепловых потерь, может изменяться от 10 до 40 кг на тонну чугуна.

В соответствии с работой [15] расход кокса на компенсацию тепловых потерь ($k_{пот}$, кг/т) определяется удельным уровнем этих потерь (q , МДж/т) и с высокой степенью точности ($R^2 = 0,988$) выражается зависимостью:
 $k_{пот} = 0,075 \cdot q - 4,272$.

Таким образом, создание условий для поддержания уровня тепловых потерь на минимально допустимом уровне позволит повысить эффективность доменной плавки в части сокращения энергетических и финансовых затрат на производство чугуна.

Целью настоящей работы является оценка взаимосвязи тепловых потерь с охлаждающей водой и параметрами доменной плавки.

Оценку связи тепловых потерь с показателями доменной плавки производили на доменной печи большого объема (полезный объем 3 900 м³), система охлаждения которой включала как медные холодильники (запечники – низ шахты), так и чугунные (низ – середина шахты) холодильники. При анализе использовали среднемесячные значения тепловых потерь и параметров доменной плавки. Значения тепловых потерь приведены в табл. 1.

Можно отметить, что общие тепловые потери в районе запечников – шахты изменялся от 330–430 МДж/т чугуна. При

этом на медные холодильники (нижняя часть зоны) приходится порядка 60 %.

Анализируемая доменная печь работала с производительностью от 8 500 до 9 500 т/сут. При этом расход кокса находился на уровне 310–350 кг/т чугуна при расходах природного газа и пылеугольного топлива 63–73 м³/т чугуна и 95–115 кг/т чугуна соответственно. Суммарный расход топлива составлял 460–490 кг/т чугуна.

Шихтовые условия характеризовались долей окатышей на уровне 35–42 %. Содержание кислорода в дутье изменялось от 28 до 32 % при поддержании теоретической температуры горения 2 000–2 200 °С. Основность шлака поддерживалась на уровне 1,05–1,12 по модулю В2 и 1,31–1,36 по модулю В3. Частные перепады давления составляли 0,20–0,25 кгс/см² верхний и 1,31–1,61 кгс/см² нижний. Соотношение расхода ПУТ и природного газа поддерживалось на уровне 1,25–1,8 кг/м³.

Таблица 1

Значения тепловых потерь

Q 7-11 медные, МДж/т	Q 12-15 чугунные, МДж/т	Q общие 7-15 ряд, МДж/т
252	172	424
222	182	403
220	155	376
234	195	429
211	170	381
192	137	329
205	149	354
215	176	392
187	172	358
200	162	362
218	148	366
206	131	337
233	164	398
236	150	386
222	149	371
201	131	332
190	163	353
193	129	322
195	156	350
219	128	347

На рис. 1. представлено влияние доли окатышей на тепловые потери.

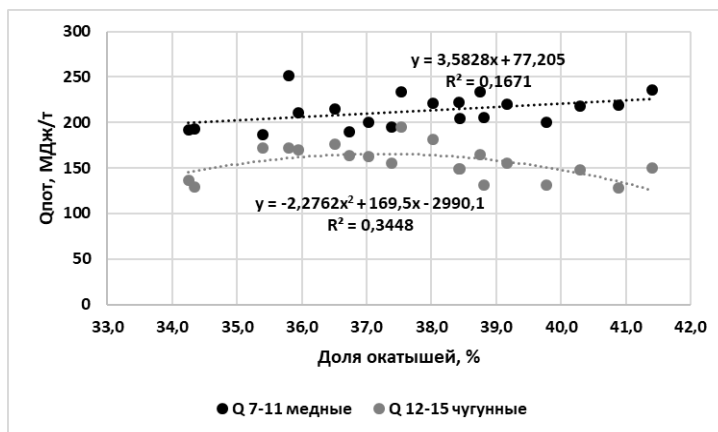


Рис. 1. Влияние доли окатышей в шихте на тепловые потери

Можно отметить, что с ростом доли окатышей тепловые потери в нижней части печи возрастают, тогда как влияние в верхней части носит нелинейный характер с максимумом. Характер влияния на тепловые потери в нижней части печи может быть обусловлен как повышением содержанием FeO в первичных шлаках, так и смещением зоны когезии вверх, что приводит к увеличению объема высокотемпературной зоны. Нелинейный характер влияния на тепловые потери в верхней части связан с изменением зоны когезии (рост) и

повышением газопроницаемости столба шихты из-за того, окатыши имеют более однородный гранулометрический состав относительно агломерата (снижение).

На рис. 2 представлена связь тепловых потерь с содержанием кислорода в дутье. Можно отметить, что характер влияния одинаков для обеих зон и является нелинейным. Наибольшее увеличение тепловых потерь отмечается при увеличении содержания кислорода более 30 %, что связано с изменением температуры фурменного очага и его приближения к стенкам печи.

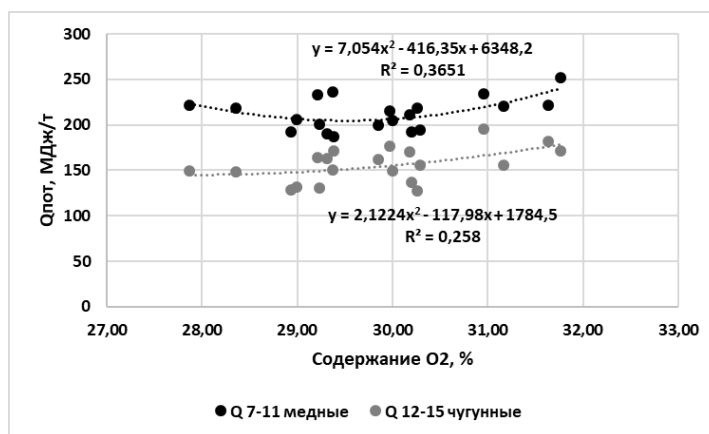


Рис. 2. Связь тепловых потерь с содержанием кислорода в дутье

На рис. 3 приведена связь тепловых потерь с нижним перепадом давления. Можно отметить, что связь является нелинейной с минимумом. Данный характер обусловлен тем, что изначально рост перепада сопровождается изменением зоны потока шихтовых материалов, что способствует снижению

уровня тепловых потерь. Однако при превышении определенных («критических») значений происходит изменение движения газового потока и его смещение в сторону стен с соответствующим ростом уровня тепловых потерь.

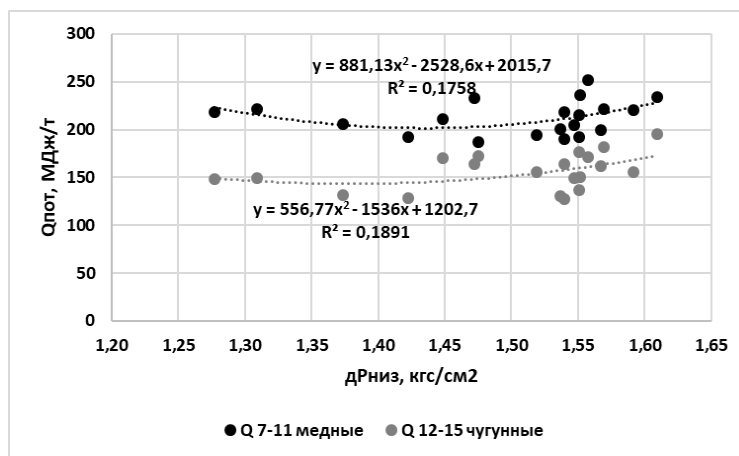


Рис. 3. Связь тепловых потерь с нижним перепадом давления

На рис. 4 представлено влияние соотношения расходов пылеугольного топлива и природного газа на тепловые потери. Можно отметить, что данное соотношение оказывает влияние только на уровень тепловых потерь в нижней части (запечи-ниж шахты). Видно, что при

росте соотношения более $1,55 \text{ кг/м}^3$ тепловые потери растут, в связи с тем, что с увеличением соотношения ПУТ/ПГ снижается скорость дутья и газовый поток приближается к стенкам, увеличивая тепловые потери.

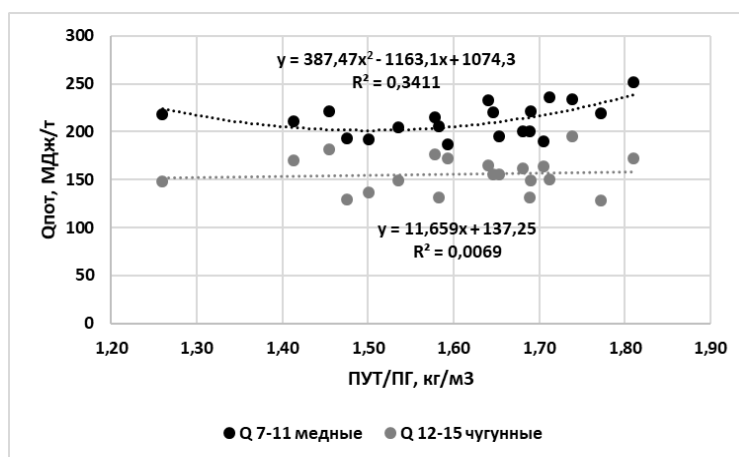


Рис. 4. Связь тепловых потерь с соотношением расходов ПУТ и ПГ

На рис. 5 приведена информация о связи тепловых потерь с основностью шлака по модулю В2 (CaO/SiO_2).

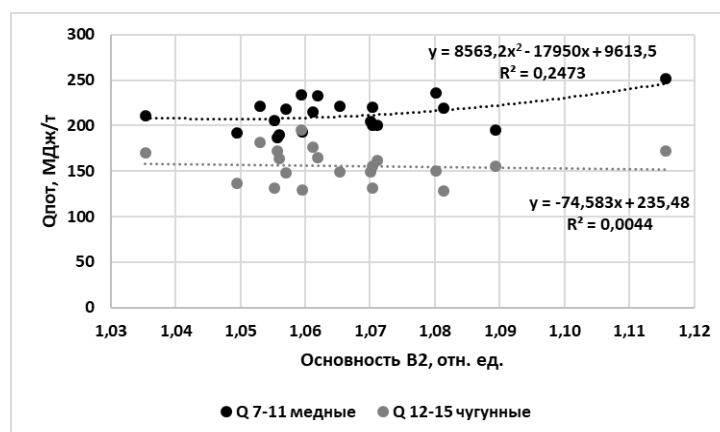


Рис. 5. Связь основности шлака по модулю В2 с тепловыми потерями

Можно отметить, что с ростом основности шлака по модулю В2 происходит рост тепловых потерь в нижней части печи (при увеличении выше 1,08 ед.), при этом влияния на тепловые потери в верхней части шахты не отмечено. Данный характер влияния можно объяснить тем, что при росте основности сверх «критического» значения происходит ухудшение газодинамики в нижней части печи, в результате чего газовый поток движется ближе к стенам, вызывая рост тепловых потерь.

В дальнейшем провели оценку влияния уровня тепловых потерь (суммарная величина) на удельный расход суммарного топлива. Результаты оценки приведены на рис. 6.

На рис. 6 можно увидеть, что с ростом тепловых потерь происходит рост суммарного топлива. В среднем увеличение тепловых потерь на 10 МДж/т чугуна приводит к необходимости увеличения расхода топлива на их покрытие на 1,3 кг/т чугуна.

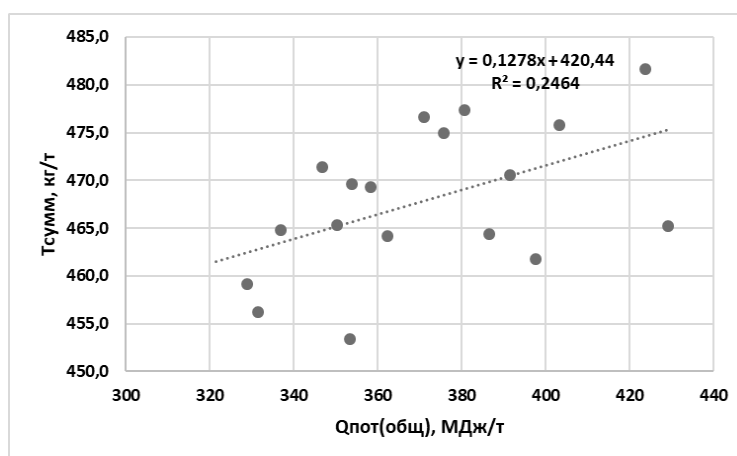


Рис. 6. Влияние тепловых потерь на удельный расход суммарного топлива

ВЫВОД

Проведена оценка влияния шихтовых условий, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов на уровень тепловых потерь. Результаты оценки показали, что изменяя технологические параметры

возможно управлять уровнем тепловых потерь и повышать эффективность доменной плавки. Сокращение уровня тепловых потерь на 10 МДж/т чугуна способствует снижению расхода топлива на их покрытие на 1,3 кг/т чугуна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Устройство и проектирование доменных печей: учебное пособие / Л. И. Каплун, А. В. Малыгин, О. П. Онорин, А. В. Пархачев. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 219, 234 с. – Текст : непосредственный.
2. **Шарафутдинов, Ю.** Исследование системы охлаждения доменных печей / Ю. Шарафутдинов, А.А. Баскакова, С.В. Иванова. – Текст : непосредственный. // Энергетика теплотехнологий. – 2019. – № 2. – С. 20–28.
3. Металлургия чугуна: учебник для вузов, 3-е изд., перераб. и доп. / под

редакцией Ю.С. Юсфина. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с. – Текст : непосредственный.

4. **Джимбо, С.О.** Анализ возможных способов снижения потерь тепла при выплавке чугуна в доменных печах : Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Джимбо Сумайла Омеза. – Екатеринбург, 2017. с. 22. – Текст : непосредственный.

5. Исследования теплогазодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи и применение их результатов / В.И. Большаков, А.А. Сохацкий, А.Л. Чайка [и др.] .

– Текст : непосредственный.
Металлургическая и горнорудная промышленность, – № 2. – 2013. – С.15–19.

6. Влияние состава и свойств материалов гарнисажа на его образование и стойкость / В.Ф. Мороз, Д.Н. Тогобицкая, Н.М. Можаренко [и др.]. – Текст : непосредственный // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Выпуск 22. – С.85–94.

7. **Андреев, В.И.** Исследование тепловых потерь в доменной печи при вдувании в горн пылеугольного топлива / В.И. Андреев, А.В. Поздняков, Ю.Л. Курбатов // Металл и литье Украины. – № 7. – 2014. – С.3–9. – Текст : непосредственный.

8. Теплофизика периферийной зоны доменной печи. А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко. С.П. Сущев. Домна в энергетическом измерении. 2006г. С. 73–79. – Текст : непосредственный.

9. Исследование теплообменных процессов, протекающих в области холодильников печей шахтного типа. А.Д. Горбунов, Е.Л. Глущенко. – Текст : непосредственный //Теория и практика металлургии, 2010. – с. 39– 42.

10. Оценка влияния некоторых факторов на тепловые потери с водой охлаждающей шахту доменной печи. / В.Е. Левченко, Н.Г. Васильев, М.Е. Алпаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия ВУЗов Ч.М. 1986, – № 9. – С. 39. – Текст : непосредственный.

11. **Чернобривец, Б.Ф.** Практика доменного производства / Б.Ф. Чернобривец, В.В. Капорулин, В.А. Завидонский – Москва : Металлургия, – 1992. – С.111. – Текст : непосредственный.

12. **Титов, В.Н.** Связь тепловых потерь с охлаждающей водой с режимом работы доменной печи / В.Н. Титов, В.Л. Емельянов, В.И. Басов. – Текст : непосредственный // Современная металлургия начала нового тысячелетия : сборник научных трудов. Часть 1. – Липецк : ЛГТУ, 2005. – С. 98–103.

13. **Титов, В.Н.** Управление распределением газового потока по величине тепловых потерь с охлаждающей водой на доменной печи / В.Н. Титов, С.С. Ляпин, Д.Д. Иванов. – Текст : непосредственный. // Сталь № 2. – 2006. – С. 6–7.

14. **Титов, В.Н.** Исследование распределения газового потока в доменной печи большого объема и разработка алгоритма управления его радиальным распределением : Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Владимир Николаевич Титов. Липецк, 2006. – 21 с. – Текст : непосредственный.

15. **Павлов, А.В.** Некоторые вопросы технологии, управления и диагностики доменной плавки: монография / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, [под общ. ред. Н. А. Спирина]; Министерство науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург : АМК «День РА», 2023. – 282 с. – Текст: непосредственный.

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

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

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

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

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

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

DOI 10.53015/30343275_2025_3_34
УДК 621.01: 531.8 (075)

А.В. СУХАНОВ

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЁТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ
ГРУЗОПОДЪЁМНЫХ МАШИН**

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В настоящей работе представлены базовые принципы расчёта и конструирования наиболее характерных и прогрессивных грузоподъёмных машин для металлургического и машиностроительного производства. К таким машинам относятся краны мостового и стрелового типа. В статье дополнительно приведены принципы проектирования крановой тележки, электролебёдки, кран-балки и электротали. Для всех механизмов грузоподъёмных машин даны рекомендации по выбору исходных данных и расчёту основных деталей. Приведённые в статье рекомендации могут быть полезны для инженеров-проектировщиков, связанных с конкретным производством подъёмно-транспортных механизмов, и направлены на решение задач, возникающих на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: мостовой кран, электроталь, полиспаг, редуктор, электродвигатель.

A.V. SUKHANOV

BASIC PRINCIPLES OF CALCULATION AND DESIGN OF LIFTING MACHINES

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper presents the basic principles of calculating and designing the most typical and progressive hoisting machines for iron-and-steel and machine-building production. Such machines include overhead and boom cranes. The article also presents the principles of designing a crane trolley, electric winch, crane beam and electric hoist. For all hoisting machine mechanisms, recommendations are given on the initial data selection and calculation of the main parts. The recommendations given in the article can be useful for engineers designing specific lifting and hoisting mechanisms and are aimed at solving problems that arise at industrial enterprises.

Keywords: bridge crane, electric hoist, block and tackle, gear unit, electric motor.

ВВЕДЕНИЕ

Для расчёта и конструирования подъёмно-транспортных машин необходимо соблюдать ряд базовых принципов.

1. Необходимо экономить металл, снижая вес конструкции, и не превышать при этом рекомендуемых запасов прочности.

2. Упрощать схемы и конструкцию механизмов, стремиться к уменьшению габаритов установок.

3. Обеспечивать удобство обслуживания, доступный и качественный ремонт.

4. Параметры проектирования машин должны соответствовать

требованиям государственных стандартов на машины данного типа, а применяемые материалы, покупные изделия и комплектующее оборудование – соответствующим стандартам. К числу основных параметров кранов относятся: грузоподъёмность, пролёт, высота крана, вылет стрелы, колея тележки, скорости подъёма, передвижения и поворота.

5. При конструировании механизмов стремятся к тому, чтобы они были агрегатны, то есть все входящие в механизм узлы должны собираться отдельно и уже в виде блока устанавливаться на машину. Необходимо широко использовать унифицированные узлы (ходовые колёса, барабан, блоки, тормоза, редукторы).

6. Соблюдать правила устройства и безопасности эксплуатации грузоподъёмных машин [1, 2].

При проектировании грузоподъёмных машин необходимо знать вес машины в целом и её отдельных узлов. Значение этих весов обычно назначается по таблицам или графикам с учётом имеющегося опыта проектирования подобных машин. Существует ряд

рекомендаций по выбору весов (масс) различных машин и их узлов.

Вес крановых тележек с установленными на них механизмами можно определять по графику (рис. 1, а).

Вес крановых тележек без механизмов $G_T = (0,15 \div 0,3)Q$, причём меньшие значения для грузоподъёмностей более 3,2 тонн, где Q – грузоподъёмность крана. Вес мостового крана с учётом веса механизма передвижения и электрооборудования можно определить по графику, представленному на рисунке 1, б. Вес моста кран-балки с учётом веса механизма передвижения и электрооборудования определяется по графикам, представленным на рисунке 1, в, г, и считается равномерно распределённым по длине балки.

Вес тележек электротали принимается по таблице 1. Вес остальных элементов тали, приведённый к оси крюковой подвески, составляет примерно $(0,02-0,03)Q$.

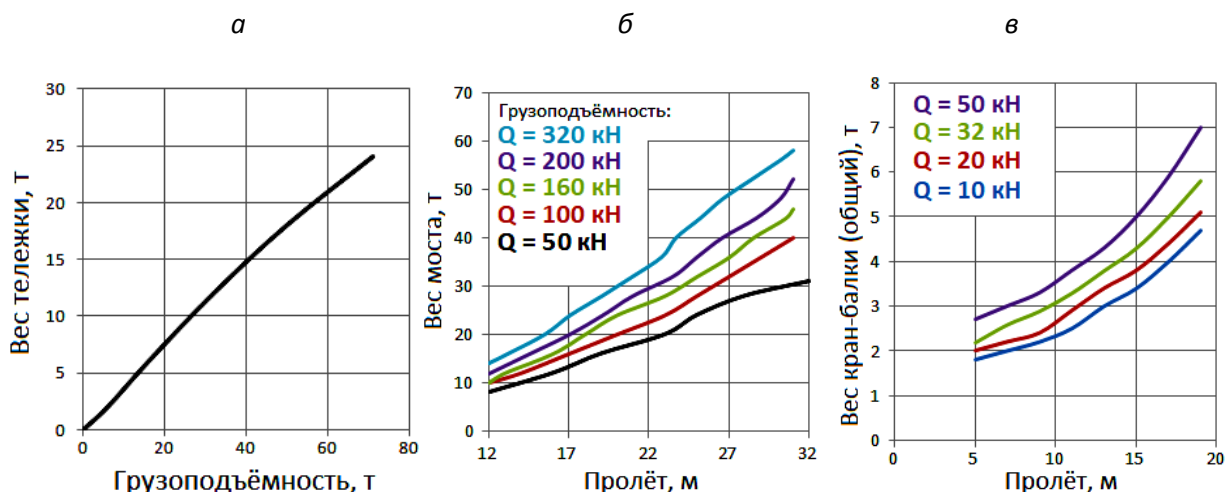


Рис. 1. Вес основных конструкций грузоподъёмных машин

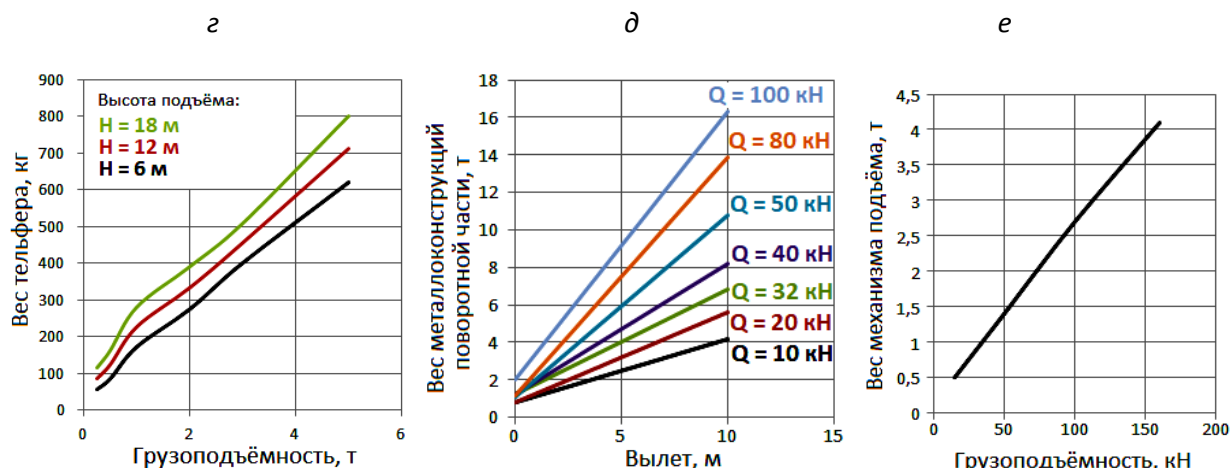


Рис. 1. Окончание. Вес основных конструкций грузоподъёмных машин

Таблица 1

Веса тележек электротали

Грузоподъёмность Q, кН	Приводная; вес, кг	Холостая; вес, кг
0,5	17	4,5
1	40	9,4
2	57	15
3	68	27
5	165	51

Таблица 2

Типы и передаточные числа крановых полиспастов

Характер навивки	Типы полиспастов	Кратность m_n при Q, кН				
		До 10	20-60	50-100	150-200	300-400
Непосредственно на барабан (простой) (мостовые)	Сдвоенный (простой)	2	2	2	2-3	3-4
		(1)	(2)	-	-	-
Через блок (стреловые)	Простой (сдвоенный)	1-2	2-3	3-4	4-6	-
		-	(2)	(2)	-	-

Вес (масса) поворотной части стреловых кранов грузовой тележки определяется по графику (рис. 1, д). Центр тяжести поворотной части следует принимать на расстоянии 1/3-1/4 наибольшего вылета от оси вращения. Вес неповоротной части стрелкового крана вместе с механизмом передвижения можно принимать равным весу поворотной части

крана; центр тяжести находится в центре опорного контура или смещается от центра не более 1/8-1/10 наибольшего размера опорного контура.

Вес механизма подъёма груза ориентировочно определяется по графику, показанному на рис.1. Центр тяжести механизма подъёма груза располагается

между двигателем и барабаном, несколько ближе к двигателю.

Вес механизма поворота примерно равен половине веса механизма подъёма груза; центр тяжести находится между двигателем и редуктором.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОСТОВОГО КРАНА

Исходными данными для проектирования мостового крана являются: грузоподъёмность Q (кН или тс), высота подъёма H (м), пролёт L (м), скорость передвижения крана (м/мин), скорость передвижения тележки (м/мин), скорость подъёма груза (м/мин) и режим работы. Помимо этого, задаются или выбираются на основе анализа схемы механизмов подъёма груза, передвижения крана и тележки.

Кратность полиспаста для крана выбирается по табл. 2 в зависимости от грузоподъёмности и схемы навивки каната на барабан (непосредственно или через направляющий блок). В таблице 2 данные, указанные в скобках, относятся к специальным случаям (тельферы малой грузоподъёмности и др.). При этом необходимо выполнить условие, чтобы канат при набегании на блок или барабан с нарезкой не склонялся от нормального положения более чем на $5-6^\circ$. В случае работы каната с гладким барабаном отклонение не должно превышать $1-2^\circ$.

Расчёт каната производится по правилам Ростехнадзора.

Определение основных размеров барабанов можно производить по существующим рекомендациям [1]. Диаметры барабанов и блоков измеряются по дну канавки и определяются по правилам Ростехнадзора. Длина цилиндрической части барабана определяется длиной, необходимой для размещения рабочих витков каната, $1,5-2$ витков трения и длиной, необходимой для

закрепления конца каната, принимаемой равной $3-4$ диаметра каната. В случае, если на барабане имеются две нарезки (правая и левая при сдвоенных полиспастах), длина ненарезанной части барабана в центре назначается приблизительно $100-200$ мм.

Расчёт барабана на прочность производится по напряжениям сжатия, изгиба и кручения. Последние два вида напряжений учитываются, если длина барабана больше его трёх диаметров (длинный барабан). В качестве материала барабанов в крюковых кранах общего назначения обычно применяют чугунное литьё марки не ниже СЧ15-32. В кранах большой грузоподъёмности при тяжёлом режиме работы барабаны иногда изготавливают из стального литья марки не ниже 25Л. Коэффициент запаса прочности при расчёте барабанов на сжатие можно определить по данным [2]. Число оборотов барабана определяется в зависимости от кратности полиспаста, скорости подъёма груза и диаметра барабана.

Двигатель механизма подъёма выбирается по расчётной статической мощности, которая определяется с учётом режима работы при подъёме номинального груза:

$$N = \frac{QV_{ГР}}{102 \cdot 60 \cdot \eta_0},$$

где η_0 – коэффициент полезного действия крановых передач, который можно определять по источнику [3].

Мощность выбранного двигателя при номинальной продолжительности включения должна быть примерно равна расчётной мощности. Выбранный двигатель необходимо проверить на нагрев. Эта проверка производится путём сравнения номинальной мощности (или номинального момента двигателя) со среднеквадратичной мощностью (или с эквивалентным моментом). Перегрева двигателя не произойдёт, если будет соблюдено условие $N_{\text{ном}} \geq N_{\text{ср.кв}}$ или

$$M_3 \leq M_{\text{ном. дв.}}$$

Время неустановившегося движения (время пуска t_n и время торможения t_r) определяется для всех случаев подъёма и опускания грузов, заданных графиком загрузки. При пуске (разгоне) и торможении механизма подъёма движение можно считать равномерно ускоренным или равнозамедленным, причём в первом случае (пуск) действует средний пусковой момент двигателя $M_{п.ср}$, равный 1,5-2 номинального момента двигателя, а во втором случае (торможение) – средний тормозной момент двигателя $M_{т.ср}$ или механического тормоза M_t .

Маховые моменты движущихся частей механизма подсчитываются по известным формулам механики [2].

Время пуска и торможения механизма подъёма должно быть таким, чтобы среднее ускорение при пуске было примерно следующим: для монтажных кранов – $0,1 \text{ м/с}^2$; для кранов машиностроительного производства – $0,2 \text{ м/с}^2$; для кранов металлургических цехов (кроме кранов, работающих с расплавленным металлом) – $0,5 \text{ м/с}^2$.

При проектировании системы передач механизма подъёма обычно ориентируются на типовые редукторы (реже проектируют специальный редуктор) [6]. При выборе или проектировании редуктора исходными параметрами являются: передаточное число i ; передаваемая мощность, равная

расчётной мощности; число оборотов входного вала, обычно равное номинальному числу оборотов двигателя; режим нагрузки.

Примеры расчёта валов на прочность приведены в работах [7, 8].

Передаточное число редуктора может отличаться от исходного не более чем на $\pm 10\%$, а мощность, которую может передать редуктор, должна быть равна или несколько больше исходной. Число оборотов входного вала редуктора должно быть примерно равно заданному (колебания не более $\pm 10\%$).

Наилучшего совпадения исходных данных с параметрами выбранного или спроектированного редуктора можно достичь за счёт применения полиспаатов с различной кратностью, изменяя диаметр барабана или звёздочки, изменяя скорость подъёма в пределах $\pm 10\%$ от заданной.

Тормозной момент M_t механизма подъёма определяется по крутящему моменту на валу, где установлен тормоз, для случая спуска номинального груза, при этом коэффициент запаса торможения принимается по нормам Ростехнадзора.

По величине тормозного момента подбирается тормоз. В случае проектирования тормоза диаметр тормозного шкива можно найти по табл. 3. На механизмах подъёма должны устанавливаться автоматические нормально замкнутые тормоза.

Таблица 3

Диаметры тормозных шкивов

Величина тормозного момента, Н·м	Диаметр тормозного шкива, мм
До 20	100
30-50	150
50-100	200
80-200	250
200-400	300

Желателен подбор стандартной крюковой подвески. При этом вначале решается вопрос о выборе типа подвески – нормальной или укороченной. Крюковые подвески подвергаются полному расчёту на прочность лишь в случае

конструктивной разработки. Крюки подвергаются проверке на прочность в исключительных случаях по указанию инженеров.

Крепление каната к барабану осуществляется прижимными планками,

исходя из необходимого количества планок, которые принимаются по правилам Ростехнадзора. Основные размеры крепления приведены в [2].

Далее производится расчёт механизма передвижения тележки (крана), определяется сопротивление передвижению. Определение крутящего момента на валу ведущего ходового колеса производится для случая перемещения с номинальным грузом. Число оборотов ведущего ходового колеса определяется исходя из заданной скорости передвижения. Для определения крутящих моментов предварительно подсчитывается сопротивление передвижению крана или тележки W . Это сопротивление состоит из трёх составляющих: сопротивление от трения $W_{тр}$ в опорно-ходовой части тележки (крана); сопротивление от уклона подкрановых путей $W_{ук}$ (уклон принимается 0,002-0,003 для тележек и 0,002-0,005 для кранов); сопротивление от ветровой нагрузки (определяется согласно рекомендациям [3]).

Двигатель механизма передвижения выбирается по расчётной статической мощности, которая определяется с учётом режима работы при перемещении номинального груза и при действии максимального сопротивления передвижению W_{max} . Остальные положения по выбору двигателя механизма передвижения ввиду полной аналогии принимаются подобно выбору двигателя механизма подъёма.

Выбранный двигатель должен быть проверен по времени пуска. При пуске механизма передвижения движение можно считать равноускоренным под действием среднего пускового момента, равного 1,5-2 от номинального момента двигателя. Маховые моменты определяются так же, как указано для механизмов подъёма.

Время пуска при перемещении номинального груза при максимальном сопротивлении передвижению W_{max} для типовых машин обычно лежит в пределах 2-8 секунд, а ускорение (замедление) – 0,1-0,5 м/с² [2]. Полученное расчётом время пуска t_n должно быть проверено на отсутствие буксования ведущих ходовых

колёс. Время пуска, подсчитанное по условию отсутствия буксования, должно быть меньше или равно времени, подсчитанному выше. В расчётах на буксование нагрузка на ведущие колёса должна приниматься минимальной, а сопротивление передвижению – максимальным. Коэффициент сцепления (трения) ведущих колёс с рельсом: для кранов, работающих на открытом воздухе $\varphi = 0,12$; для кранов, работающих в помещении, когда попадание влаги исключено, $\varphi = 0,15$.

В случае, если буксование имеет место, необходимо увеличить время пуска или увеличить число ведущих колёс.

Тормозной момент M_T механизма передвижения определяется при отсутствии юза ходовых ведущих колёс. При этом сначала находится минимальное время торможения t_T , при котором отсутствует юз, а затем M_T . При этих расчётах нагрузка на ведущие колёса и сопротивление передвижению принимаются минимальными, а грузозахватный орган – без груза.

По величине тормозного момента подбирается тормоз.

Диаметр ходовых колёс и их количество определяются расчётом по максимальным или эквивалентным нагрузкам [1, 2]. Затем колёса проверяются на контактную прочность.

Далее определяются основные конструктивные размеры главной балки мостового крана. Например, высоту двухстенчатой балки коробчатого сечения принимают в пределах: $h_6 = (0,1-0,05) \cdot L$. Ширину горизонтального листа балки, из условия обеспечения горизонтальной жёсткости, принимают в пределах: $B = (0,5-0,333) \cdot h_6$. Она должна быть не менее $B = (0,025-0,02) \cdot L$. Толщина вертикальных стенок балок должна быть не менее 6 мм. Высота опорного сечения балки $h_{оп} = (0,6-0,7) \cdot h_6$. Длина скоса в месте примыкания главной балки к концевой $C = (0,1-0,2) \cdot L$. Высоту главных решетчатых ферм в середине пролёта принимают: $h_{ф} = (0,0833-0,0625) \cdot L$.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРАНОВОЙ ТЕЛЕЖКИ

Исходные данные для проектирования: грузоподъёмность Q , кН; высота подъёма груза H , м; скорость подъёма груза $V_{ср}$, м/мин; скорость передвижения тележки V_t , м/мин; режим работы механизмов; схемы механизмов.

Расчёт механизмов и узлов тележки производится по методике, указанной при расчёте мостового крана с некоторыми дополнениями:

1. Расчёт крюковой подвески производится с проверкой прочности всех элементов выбранной крюковой подвески.
2. При расчёте узла ходовых колёс дополнительно производится подбор подшипников по эквивалентной нагрузке и расчёт вала ходовых колёс.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛЕБЁДКИ

Исходные данные для проектирования: тяговое усилие каната Q , кН; канатоёмкость барабана, м; скорость каната, м/мин; режим работы; схема механизма; кратность полиспаста.

В основу проекта чаще принимается однобарабанная приводная лебёдка с

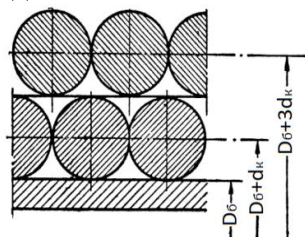


Рис. 2. Схема навивки каната на барабан

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРАН-БАЛКИ

Исходные данные для проектирования: грузоподъёмность Q , кН; длина пролёта L , м; высота подъёма груза H , м; скорость подъёма груза, м/мин; скорость передвижения тали, м/мин; скорость передвижения кран-балки; режим работы; схемы механизмов.

Выбор электротали производится на основании существующих рекомендаций [4]. Расчёт механизма подъёма производится согласно приведённым выше правилам. Основные расчёты

асинхронным электродвигателем (например, монтажные лебёдки).

Ввиду того, что проектирование лебёдки усложнено наличием полиспаста, расчёт каната, который выполняется по нормам Ростехнадзора, производится с учётом кратности полиспаста, равной двум.

В лебёдках для уменьшения длины барабана (если она получается значительной при однослойной навивке) применяют многослойную навивку. Длина каната, наматываемого на барабан, рассчитывается по формуле: $L_k = H \cdot m_n$.

Длина каната, приходящаяся на один шаг при двухслойной навивке (рис. 2), принимается равной $l = \pi(2D_b + 4d_k)$, где d_k – диаметр каната. Число витков каната на длине барабана при двухслойной навивке $Z_b = (L_k/l) + (10 \div 15)$, где 10-15 витков учитывают неплотность навивки. Необходимая длина барабана $L_b = Z_b \cdot d_k$.

Расчёт крюковой подвески является проектировочным (производится полный расчёт всех элементов нормальной крюковой подвески).

целесообразно производить согласно рекомендациям [3]. Дополнительно производится расчёт трансмиссионного вала и узла ходовых колёс. Тихоходные трансмиссионные валы рассчитываются на совместное действие кручения и изгиба. Быстроходные – из условия отсутствия резонанса (по критическому числу оборотов) проверяются на жёсткость по углу закручивания. Расчёт металлоконструкции кран-балки производится согласно рекомендациям [4].

ПРОЕКТ ЭЛЕКТРОТАЛИ

Исходные данные для проектирования: грузоподъёмность Q , кН; высота подъёма груза H , м; скорость подъёма груза, м/мин; скорость передвижения электротали, м/мин; режим работы; исполнение (продольное, поперечное).

При проектировании электротали существует два варианта установки электродвигателя. В первом случае он устанавливается на корпусе грузоподъёмного механизма неподвижно, во втором – статор запрессовывается в барабан и вращается вместе с ним. При этом снижается вес и уменьшаются габариты электротали, но конструкция и обслуживание усложняются.

При проектировании электротали грузоподъёмностью до 10 кН возможно перемещение электротали толканием груза, т.е. в этом случае механизм передвижения не проектируется.

При электрическом приводе и скорости, превышающей 30 м/мин, механизм передвижения снабжается стопорным тормозом. При меньшей скорости тормоз отсутствует.

В зависимости от расположения электротали (вдоль или поперёк пути) выбирается одинарный или двоярный полиспаст. Так, при поперечном исполнении применяется двоярный полиспаст.

Электродвигатель механизма подъёма обычно устанавливается асинхронный односкоростной фланцевый или специальный (в случае, если он встраивается в барабан). При проектировании специальных электроталей возможна установка многополосного электродвигателя, который позволяет изменять скорость опускания и подъёма груза. Мощность электродвигателя определяется при подъёме номинального груза с заданной скоростью при учёте потерь на трение.

Разработка кинематической схемы и расчёт редуктора производится по методике, описанной в работе [5]. С целью создания большой компактности для изготовления зубчатых колёс редуктора рекомендуется применение высоко-

качественных легированных сталей. Редуктор в большинстве случаев проектируется двухступенчатым (реже трёхступенчатым) [6]. На быстроходном валу устанавливается стопорный тормоз, на промежуточном – грузоупорный.

Колодочные тормоза, устанавливаемые на механизмах подъёма – нормальнозамкнутые. В электроталих обычно устанавливают колодочные тормоза с разжимным кулачком и приводом от электромагнита типа ЭС. Наименьший допустимый диаметр тормозного шкива может быть подсчитан по формуле:

$$D_r = 1,53 \sqrt{\frac{M_r}{\rho \mu}}$$

где M_r – расчётный тормозной момент; ρ, μ – допускаемое удельное давление на поверхности тормозной колодки и коэффициент трения между колодкой и шкивом [2].

Остальные размеры тормоза выбираются конструктивно в зависимости от диаметра тормозного шкива, после подбора двигателя эти размеры уточняются.

При проектировании грузоподъёмного тормоза необходимо учесть, что резьбу на тормозном валу выполняют прямоугольной или трапецеидальной (вторая предпочтительнее). Диаметр резьбы берут минимальным по условиям прочности вала и по удельному давлению в резьбе. Допускаемое давление в резьбе при трении стали по чугуну равно 40-50 кг/см², а при трении стали по бронзе 60-80 кг/см². Угол подъёма резьбы принимают равным 15-20°. Число заходов винта $n = 2-4$. Наружный радиус диска тормоза принимают $R_n = (1,5 \div 2,5) \cdot R_b$, где R_b – внутренний радиус диска.

При скорости на среднем радиусе трения, не превышающем 3-4 м/с, силами инерции можно пренебречь.

После подбора стандартного крюка необходимо рассчитать опорный подшипник, гайку крюка, поперечину и подшипники блоков по методике [3].

ВЫВОДЫ

Приведённые в статье рекомендации могут быть полезны для инженеров-проектировщиков, связанных с

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шаманова, А.А.** Курсовое проектирование грузоподъемных машин : учебное пособие / А.А. Шаманова, Д.А. Лутов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2019. – 76 с. – Текст : непосредственный.

2. **Руденко, Н.Ф.** Курсовое проектирование грузоподъемных машин / Н.Ф. Руденко, М.П. Александров, А.Г. Лысяков. – Москва : Машиностроение, 1966. – 331 с. – Текст : непосредственный.

3. **Павлов, Н.Г.** Примеры расчётов кранов / Н.Г. Павлов. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 349 с. – Текст : непосредственный.

4. **Дукельский, А.И.** Справочник по кранам / А.И. Дукельский. – Москва : Машиностроение, 1972. – Т.1–3. – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Суханов Андрей Владимирович
старший преподаватель
кафедры общей механики
Липецкий государственный технический университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.

конкретным производством подъёмно-транспортных механизмов, и направлены на решение задач, возникающих на промышленных предприятиях.

5. **Чернавский, С.А.** Проектирование механических передач / С.А. Чернавский, Г.М. Ицкович // Москва : Машиностроение, 1976. – 608 с. – Текст : непосредственный.

6. **Суханов, А.В.** Кинематический расчёт цилиндрического редуктора с раздвоенной быстроходной ступенью / А.В. Суханов. – Текст : непосредственный // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2024. – № 4 (57). – С. 30-37.

7. **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. 77–83.

8. **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.

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.

В.Б. ПЕНЬКОВ, Л.В. ЛЕВИНА, Е.С. НЕСМЕЯНОВА

ИНТЕРАКТИВНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕРМОСТАТИКИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В статье продемонстрирован результат работы интерактивной программы на применении метода граничных состояний к решению задачи Дирихле и Неймана для однородного уравнения Лапласа, описывающего термостатическое состояние тела. В качестве конкретного объекта рассмотрен эллипсоид с цилиндрической полостью. Выполнены расчеты, прокомментированы результаты, сделаны выводы.

Ключевые слова: энергетические методы, уравнение Лапласа, задача Дирихле, задача Неймана, метод граничных состояний, МГС.

V.B. PENKOV, L.V. LEVINA, E.S. NESMEYANOVA

INTERACTIVE PROGRAM FOR SOLVING THE PROBLEM OF THERMOSTATICS BY THE METHOD OF BOUNDARY STATES

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The operating result of an interactive program is demonstrated by applying the boundary state method to solving the Dirichlet and Neumann problem for the homogeneous Laplace equation describing the thermostatic state of a body. An ellipsoid with a cylindrical cavity is considered as an example. Calculations are performed, the results are commented on, and conclusions are drawn.

Keywords: energy methods, Laplace equation, Dirichlet problem, Neumann problem, method of boundary states, MBS.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи теплопроводности являются классическими примерами краевых задач математической физики для уравнений эллиптического типа [1]. Современный энергетический метод МГС (метод граничных состояний) позволяет средствами компьютерных алгебр строить численно-аналитические и даже полнопараметрические аналитические решения задач математической физики и уже применялся к задачам теории упругости, теплопроводности, электростатики, стационарному потоку идеальной жидкости, термоэластостатики [2, 3].

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ

ПЛЮМ-T

Последовательность интерактивных действий: 1) постановка краевой задачи; 2) описание «геометрии» тела; 3) ортогонализация базисов пространств состояний; 4) решение разрешающей бесконечной системы линейных алгебраических уравнений; 5) иллюстрирование результатов.

1. Постановка задач термостатики. Изначально все параметры задачи и определяющие уравнения предполагаются безразмерными. Тело $V = V_1 \setminus V_2$ представляет собой незначительный по толщине эллипсоид вращения V_1 , ослабленный полостью V_2 . В безразмерном

$$\text{виде } V_1 = \left\{ (x, y, z) \in R^3 \mid \frac{x^2}{10^2} + \frac{y^2}{10^2} + \frac{z^2}{4} \leq 1 \right\},$$

$V_2 = \left\{ (x, y, z) \in R^3 \mid x^2 + y^2 \leq 1 \right\}$. Граница тела состоит из трех частей («пятен»): $\partial V = S_1 \cup S_2 \cup S_3$, где $S_1 \cup S_2$ представляет верхнюю и нижнюю поверхности эллипсоида

соответственно, а S_3 – поверхность цилиндра, ограничивающего полость. В задаче Дирихле на границе удержаны безразмерные значения температуры, непрерывные по контуру

$$\text{сечения } T|_{\partial V} = \begin{cases} 0, (x, y, z) \in S_1, \\ (10 - r)/9, (x, y, z) \in S_2, \\ 0.5 - \frac{5}{3\sqrt{11}} z, (x, y, z) \in S_3. \end{cases}$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

2. Описание геометрии тела. Описание области V , занятой телом; формы границы ∂V .

Для параметризации области тела пользователь назначает способ ее описания: системы координат, пределы изменения параметров, индикатор положительности области («1» – односвязная ограниченная область; «-1» – полость). Обратная параметризация формируется программным модулем. Результаты параметризации эллипсоида с полостью представлены на рис. 1

Подобласть 1	Параметризация	$\{x \rightarrow r \cos[fi], y \rightarrow r \sin[fi], z \rightarrow z1\}$
	Якобиан	r
	Ограничения	$\{ \{fi, -\pi, \pi\}, \{r, 1, 10\}, \{z1, -\frac{1}{10} \sqrt{100 - r^2}, \frac{\sqrt{100 - r^2}}{10} \} \}$
	индикатор +	1
	Обр. параметризация	$\{ fi \rightarrow \text{ArcTan} \left[\frac{y}{x} \right] + \frac{1}{2} \pi (1 - \text{Sign}[x]) \text{Sign}[y], r \rightarrow \sqrt{x^2 + y^2}, z1 \rightarrow z \}$
	Окрестности особ. точек	{}
'NLO'	Параметры обл.	{}

Рис. 1. Параметризация области

Для параметризации границы тела пользователь разбивает границу на участки. Для каждого участка из представленных вариантов выбирается система координат, пределы изменения параметров, направление

внешней нормали. Обратная параметризация, вектор нормали формируется программным модулем. Результаты параметризации области V представлены в виде таблицы на рис. 1, границы области – на рис.2.

Граница 1	Параметризация	$\left\{ x \rightarrow r \cos[\varphi], y \rightarrow r \sin[\varphi], z \rightarrow \frac{\sqrt{100-r^2}}{10} \right\}$
	Якобиан	$\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}$
	Обр. параметризация	$\left\{ \varphi \rightarrow \text{ArcTan}\left[\frac{y}{x}\right] + \frac{1}{2}\pi(1 - \text{Sign}[x])\text{Sign}[y], r \rightarrow \sqrt{x^2 + y^2} \right\}$
	Ограничения	$\{\{\varphi, -\pi, \pi\}, \{r, 1, 10\}\}$
	Нормаль	$\left\{ \frac{r^2 \cos[\varphi]}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r^2 \sin[\varphi]}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}} \right\}$
	Касательная 1	$\{-\sin[\varphi], \cos[\varphi], 0\}$
	Касательная 2	$\left\{ -\frac{r \cos[\varphi]}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, -\frac{r \sin[\varphi]}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r^2}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}} \right\}$
Граница 2	Параметризация	$\left\{ x \rightarrow r \cos[\varphi], y \rightarrow r \sin[\varphi], z \rightarrow -\frac{1}{10} \sqrt{100-r^2} \right\}$
	Якобиан	$\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}$
	Обр. параметризация	$\left\{ \varphi \rightarrow \text{ArcTan}\left[\frac{y}{x}\right] + \frac{1}{2}\pi(1 - \text{Sign}[x])\text{Sign}[y], r \rightarrow \sqrt{x^2 + y^2} \right\}$
	Ограничения	$\{\{\varphi, -\pi, \pi\}, \{r, 1, 10\}\}$
	Нормаль	$\left\{ \frac{r^2 \cos[\varphi]}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r^2 \sin[\varphi]}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, -\frac{r}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}} \right\}$
	Касательная 1	$\{-\sin[\varphi], \cos[\varphi], 0\}$
	Касательная 2	$\left\{ \frac{r \cos[\varphi]}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r \sin[\varphi]}{\sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}}, \frac{r^2}{10 \sqrt{100-r^2} \sqrt{r^2 + \frac{r^4}{10000-100r^2}}} \right\}$
Граница 3	Параметризация	$\{x \rightarrow \cos[\varphi], y \rightarrow \sin[\varphi], z \rightarrow z_1\}$
	Якобиан	1
	Обр. параметризация	$\left\{ \varphi \rightarrow \text{ArcTan}\left[\frac{y}{x}\right] + \frac{1}{2}\pi(1 - \text{Sign}[x])\text{Sign}[y], z_1 \rightarrow z \right\}$
	Ограничения	$\{\{\varphi, -\pi, \pi\}, \{z_1, -\frac{3\sqrt{11}}{10}, \frac{3\sqrt{11}}{10}\}\}$
	Нормаль	$\{-\cos[\varphi], -\sin[\varphi], 0\}$
	Касательная 1	$\{-\sin[\varphi], \cos[\varphi], 0\}$
	Касательная 2	$\{0, 0, -1\}$

Рис.2. Параметризация границы тела

Тестирование информации о форме тела на непротиворечивость основано на использовании следствия теоремы Остроградского-Гаусса, согласно которой поток радиус-вектора через замкнутую поверхность ∂V равен утроенному значению объема V . Визуальный контроль непротиворечивости осуществляется иллюстрированием (рис. 3).

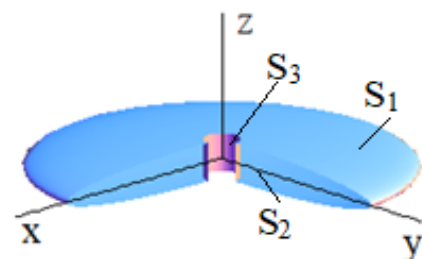


Рис. 3. Эллипсоид с цилиндрической полостью

3. Описание граничных условий. Корректными в математической физике называют постановки краевых задач, удовлетворяющих условиям: 1) решение краевой задачи существует; 2) решение единственное; 3) решение непрерывным образом зависит от граничных условий: малое изменение граничных условий влечёт за собой малое изменение результатов решения. Классическими примерами постановки ГУ для корректных краевых задач термостатики являются следующие: 1) задача Дирихле (тип задачи {1}): на поверхности тела задано распределение температуры $T|_{\partial V} = T_0$; 2) задача Неймана (тип {2}): на поверхности тела задан температурный поток через границу $\frac{dT}{dn}|_{\partial V} = \varphi_0$;

3) основная смешанная задача (тип {1, 2})

$$T|_{s_r} = T_0, \quad \frac{dT}{dn}|_{s_n} = \varphi_0.$$

Ниже (рис.4) представлено диалоговое окно, предназначенное для описания ГУ.

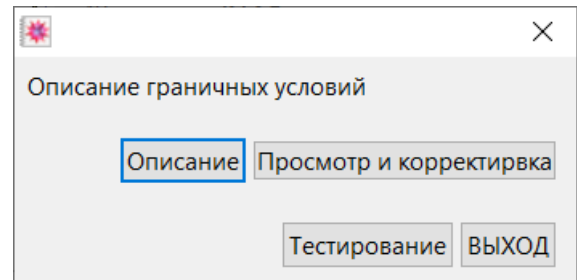


Рис. 4. Описание ГУ

Для полостного эллипсоида описание условий Дирихле при отсутствии теплоисточников $Q=0$ (рис. 5):

Пятно 1	на границе	1
	тип ГУ	1
	ограничения	{{fi, -π, π}, {r, 1, 10}}
	значения ГУ	{0}
Пятно 2	на границе	2
	тип ГУ	1
	ограничения	{{fi, -π, π}, {r, 1, 10}}
	значения ГУ	{ $\frac{10-r}{9}$ }
Пятно 3	на границе	3
	тип ГУ	1
	ограничения	{{fi, -π, π}, {z1, - $\frac{3\sqrt{11}}{10}$, $\frac{3\sqrt{11}}{10}$ }}
	значения ГУ	{ $\frac{5(\frac{3\sqrt{11}}{10} - z1)}{3\sqrt{11}}$ }
Параметры нагрузки		{}
объемный теплоисточник Q		0
Тип задачи		{1}

Рис.5. Результат работы модуля по вводу ГУ

4. Генерирование исходного термостатического базиса. Термостатический базис для ограниченного тела набирается из набора гармонических многочленов $q^k \in \{x, y, z, x^2 - y^2, x^2 - z^2, xy, xz, yz, xyz, \dots\}$. (1)

В случае неограниченного тела используется инверсия гармонических многочленов:

$$Q_n(x, y, z) = \frac{P_n(x, y, z)}{r^{2n+1}}, \quad (2)$$

где $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ – расстояние от точки x до центра x_0 , назначенного внутри полости, $P_n(x, y, z) = q^k$, n – порядок однородного многочлена в числителе.

В случае ограниченного тела с полостью базис термостатического пространства составлен из совокупности двух базисов (1) и (2) [4]

$$T^k \in \{\dots, q^2, q^1, \frac{1}{r}, \frac{q^1}{r^3}, \frac{q^2}{r^3}, \dots\}. \quad (3)$$

Под внутренним состоянием термостатической среды понимаем набор из

температуры и ее градиента $\xi = \{T, T_i\}$; под граничным – набор из температуры на границе и нормального градиента $\gamma = \left\{ T|_{\partial V}, \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}|_{\partial V} \right\}$.

Описанный выше подход позволяет сформировать счетные базисы внутренних Ξ и граничных Γ состояний.

5. Ортогонализация базисов.

Ортогонализация базисов проводится на основе алгоритма Грама-Шмидта с использованием скалярных произведений

$$(\xi^{T(k)}, \xi^{T(m)})_{\Xi^T} = \int_V T_i^{(k)} T_i^{(m)} dV$$

в пространстве внутренних состояний, или

$$(\gamma^{T(k)}, \gamma^{T(m)})_{\Gamma^T} = \int_{\partial V} T^{(k)} \frac{dT^{(m)}}{d\mathbf{n}} dS$$

в пространстве граничных состояний. Одно из основных свойств гармонических функций устанавливает равенство обоих скалярных произведений для изоморфных пар элементов. С вычислительной точки зрения удобнее проводить ортогонализацию в пространстве граничных состояний Γ (рис. 6).

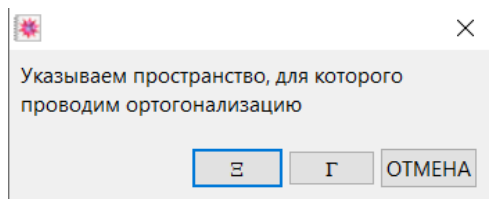


Рис. 6. Назначение пространства для ортогонализации базиса

6. Решение бесконечной системы уравнений. Краевая задача сводится к решению бесконечной системы уравнений (БСУ) вида $A\mathbf{c} = \mathbf{b}$, где A – матрица БСУ («скелет» задачи), \mathbf{c} – коэффициенты Фурье, \mathbf{b} – вектор правых частей.

В случае задач Дирихле и Неймана A – единичная матрица, поэтому $\mathbf{c} = \mathbf{b}$. Ниже компоненты, помеченные верхними индексами «k», «m» есть элементы ортонормированных базисов (п.5). В задаче Дирихле

$$c_k = b_k = \int_{\partial V} T_0 \frac{dT^{(k)}}{d\mathbf{n}} dS, \text{ в задаче Неймана}$$

$$c_k = b_k = \int_{\partial V} \varphi_0 T^{(k)} dS. \text{ В случае основной}$$

смешанной задачи элементы матрицы A и правые части суть:

$$a_{km} = \int_{S_r} \frac{\partial T^{(k)}}{\partial \mathbf{n}} T^{(m)} dS + \int_{S_n} T^{(k)} \frac{\partial T^{(m)}}{\partial \mathbf{n}} dS$$

$$, \quad b_k = \int_{S_r} T \frac{\partial T^{(k)}}{\partial \mathbf{n}} dS + \int_{S_n} \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} T^{(k)} dS.$$

Тогда коэффициенты Фурье восстанавливаются традиционно: $\mathbf{c} = A^{-1}\mathbf{b}$.

Точность решения зависит от размера удерживаемого отрезка базиса. Насыщение суммы Бесселя (левая часть неравенства Бесселя) косвенно позволяет судить о сходимости решения (рис. 7).

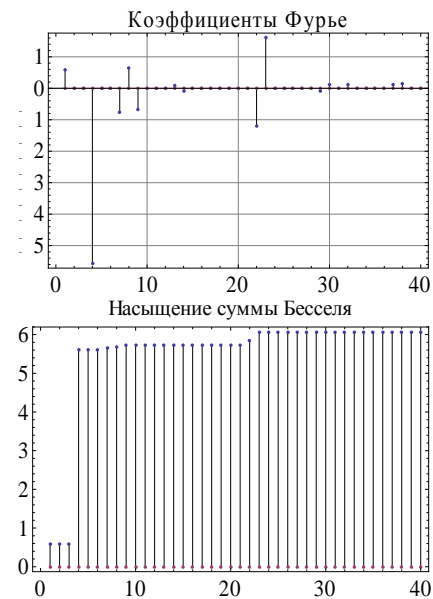


Рис. 7. Коэффициенты Фурье и сумма Бесселя

7. Построение действительного состояния. Действительное состояние является линейной комбинацией элементов базиса: $\xi = \sum_k c_k \xi^{(k)}$, откуда следует выражение для температуры: $T = \sum_k c_k T^{(k)}$. Для оценки невязки решения с заданными граничными условиями

используется разложение $\gamma = \sum_k c_k \gamma^{(k)}$.

Интегральная невязка найденного граничного состояния γ с заданными граничными условиями $\bar{\gamma}$ оценивается нормой $\delta = \|\gamma - \bar{\gamma}\|$. Ее величина характеризует точность решения.

На рис.8 представлено диалоговое окно для построения действительного состояния и оценка точности решения.

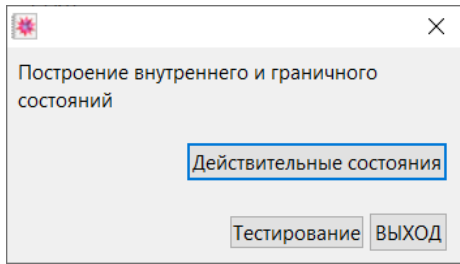


Рис.8. Построение действительного состояния

8. Представление решения в графическом виде. Результат решения задачи имеет громоздкую аналитическую форму записи. Для удобства представления результата используем графическую форму представления. В табл. представлено

распределение температуры в осевом сечении для полостного эллипсоида (3 столбец), выполненное на базе информации о ГУ (2 столбец). В задаче Неймана в ГУ задан нормальный градиент температуры $T_n = \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}$, причем обеспечено условие стационарности теплового потока через границы: сколько тепла поступает в 1 единицу времени, столько и выходит.

Таблица

Распределение температуры в эллипсоиде с полостью

1	$T _{av} = \begin{cases} 0, (x, y, z) \in S_1, \\ (10-r)/9, (x, y, z) \in S_2, \\ 0.5 - \frac{5}{3\sqrt{11}} z, (x, y, z) \in S_3. \end{cases}$	
2	$T _{av} = \begin{cases} 1/9(-1+r), (x, y, z) \in S_1, \\ 1, (x, y, z) \in S_2, \\ 0.5 - \frac{5}{3\sqrt{11}} z, (x, y, z) \in S_3. \end{cases}$	
3	$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} _{av} = \begin{cases} 0, (x, y, z) \in S_1, \\ 0, (x, y, z) \in S_2, \\ -10z/(3\sqrt{11}), (x, y, z) \in S_3. \end{cases}$	

Анализ распределения температуры в осевом сечении позволяет сделать выводы:

В задаче 1 характер распределения температуры вдоль оси z явно соответствует заданным ГУ. Некоторая неравномерность в зависимости от радиуса обусловлена уменьшением толщины диска. В задаче 2 в случае повышения температуры в прямой зависимости от радиальной координаты характер кривизны температурных слоев меняется на противоположный: более тонкие

места прогреваются значительно сильнее. В задаче 3 внешняя поверхность эллипсоида заизолирована и тепло не пропускает. Сбалансированные потоки тепла проходят антисимметрично через цилиндрическую границу полости. Неожиданным оказался эффект «жонглирования» потоков внутри тела, что наблюдается на картине распределения температуры в осевом сечении.

ВЫВОД

1. Интерактивный подход к решению задач математической физики является эффективным средством обучения, позволяющим оперативно переходить к исследованию технико-технических постановок задач.

2. Численно-аналитический энергетический метод граничных состояний является весьма удобным средством для решения задач,

возникающих в науке и технике и связанных с математической физикой.

3. Проиллюстрирован подход к обеспечению построения решения на примере эллипсоида с круговым отверстием.

4. В перспективе возникает необходимость в проведении исследований по построению решений задач о влиянии сингулярностей геометрического и физического характера на внутреннее состояние тела.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тихонов, А.Н.** Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – Москва : Наука, 1977. – 735 с. – Текст : непосредственный.

2. **Пеньков, В.Б.** Метод граничных состояний с возмущениями: неоднородные и нелинейные задачи теории упругости и термоупругости / В.Б. Пеньков, Л.В. Саталкина. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., 2012. – 108 с. – Текст : непосредственный.

3. **Penkov, V.** An Effective Method for Assessing the Thermoelastostatic State of the

Cavity Body / V.Penkov, L. Levina, M. Levin – Text : immediate // 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2023, 2023. – P. 165–170.

4. **Penkov, V. B.** The use of the method of boundary states to analyse an elastic medium with cavities and inclusions / V. B. Penkov, L.V. Satalkina, A.S. Shulmin. – Text : immediate // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2014, vol 78, no. 4. – P. 384-394. – Text : immediate.

Сведения об авторах:

Пеньков Виктор Борисович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

vbpenkov@mail.ru

Левина Любовь Владимировна

кандидат физико-математических наук, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

satalkina_lyubov@mail.ru

Несмеянова Елена Сергеевна

студент кафедры прикладной математики, Липецкий государственный технический университет.

398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30.

elnesmeyana@gmail.com

Information about the authors:

Penkov Viktor Borisovich

Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor of the Department of General Mechanics,

Lipetsk State Technical University.

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

vbpenkov@mail.ru

Levina Lyubov Vladimirovna

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics,

Lipetsk State Technical University.

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

satalkina_lyubov@mail.ru

Nesmeyanova Elena Sergeevna

Student group of the Department of Applied Mathematics,

Lipetsk State Technical University.

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

elnesmeyana@gmail.com

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

РЕШЕНИЕ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ АНИЗОТРОПНОГО ПОЛУШАРА

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе представлена математическая модель по построению напряженно-деформированного состояния трансверсально-изотропных тел вращения, находящихся в условии краевой смешанной задачи теории упругости. Показанная методика представляет собой развитие метода граничных состояний на класс смешанных задач для анизотропных тел. Предложены новые методики формирования базисов внутренних и граничных состояний и назначение скалярных произведений в этих пространствах. Пространства состояний сопряжены изоморфизмом, что позволяет отыскание внутреннего состояния свести к исследованию граничного состояния.

Решена задача для тела в форме полушара из горной породы алевролита крупного темно-серого, находящегося под действием равномерно распределенных усилий. Проведен анализ точности решения. Результаты представлены в графическом виде.

Ключевые слова: смешанные задачи, полушар, метод граничных состояний, пространства состояний, краевые задачи.

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

SOLUTION OF A MIXED PROBLEM OF ELASTICITY THEORY FOR AN ANISOTROPIC HEMISPHERE

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper presents a mathematical model for constructing the stress-strain state of transversely isotropic bodies of revolution that are in the condition of a boundary mixed problem of elasticity theory. The presented method is a development of the boundary state method for a class of mixed problems for anisotropic bodies. New techniques for forming the bases of internal and boundary states and assigning scalar products in these spaces are proposed. The state spaces are conjugated by isomorphism, which makes it possible to reduce finding the internal state to studying the boundary state.

The problem is solved for a body in the form of a hemisphere made of large dark gray siltstone rock which is under the action of uniformly distributed forces. The accuracy of the solution is analyzed. The results are presented in a graphical form.

Keywords: mixed problems, hemisphere, boundary state method, state spaces, boundary value problems.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривается равновесие трансверсально-изотропного тела, ограниченного одной или несколькими коаксиальными поверхностями вращения (рис. 1). В основной смешанной задаче требуется восстановить механическое поле

в области V по заданным поверхностным усилиям $\mathbf{p} = \{p_r, p_z\}$ на части границе S_p и перемещениям $\mathbf{u} = \{u_r, u_z\}$ на части границе S_u . Естественно что $S = S_p + S_u$.

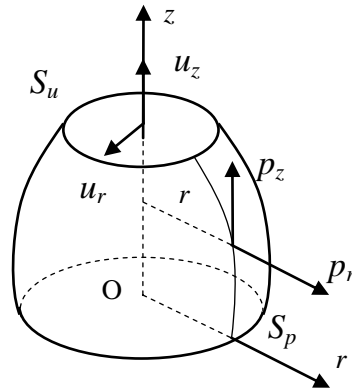


Рис. 1. Изолинии компонент полученного вектора перемещения

Требуется определить возникающее в теле напряженно-деформированное состояние.

В данной работе предполагается развитие энергетического метода граничных состояний [1] на класс статических смешанных задач теории упругости для анизотропных тел вращения. На область тела наложено ограничение: любая линия, проведенная в области тела, должна пересекать его поверхность не более, чем в двух точках.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Метод граничных состояний [1] 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.

Фундамент метода составляют пространства внутренних Ξ и граничных Γ 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:

$$\xi_k = \{u_i^k, \varepsilon_{ij}^k, \sigma_{ij}^k\}. \quad (1)$$

Основной сложностью формирования решения в МГС является конструирование базиса внутренних состояний, который опирается на общее или фундаментальное решение для среды;

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

причем в силу коммутативности состояний среды:

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

Граничное состояние определяется компонентами вектора перемещения точек границы и поверхностных усилий:

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

где n_j – компонента нормали к границе.

В пространстве граничных состояний Γ скалярное произведение выражает работу внешних сил по поверхности тела S , например для 1 и 2-го состояния:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = \int_S p_i^1 u_{vi}^2 dS,$$

причем в силу принципа возможных перемещений:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = (\gamma_2, \gamma_1).$$

Доказано, что в случае гладкой границы оба пространства состояний являются гильбертовыми и сопряжены изоморфизмом [1]. 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. В случае первой и второй основной задачи механики проблема сводится к разрешающей системе уравнений относительно коэффициентов Фурье, разложения искомых внутреннего ξ и граничного γ состояний в ряд по элементам ортонормированного базиса:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \xi_k; \quad \gamma = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \gamma_k, \quad (2)$$

или в развернутом виде:

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

Основная смешанная задача состоит в определении упругих характеристик, если на одной части границы S_p заданы поверхностные усилия \mathbf{p} , а на другой части

границы S_u заданы поверхностные перемещения \mathbf{u} . Тогда задача сводится к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений [2]:

$$\sum_{j=1}^{\infty} Q_{kj} c_j = \bar{q}_k, \quad Q_{kj} = 2\delta_{jk} - a;$$

$$a_{kj} = \int_{S_p} u_i^{(j)} p_i^{(k)} dS + \int_{S_u} p_i^{(j)} u_i^{(k)} dS;$$

$$\bar{q}_k = \int_{S_u} u_i p_i^{(k)} dS + \int_{S_p} p_i u_i^{(k)} dS,$$

где компоненты с верхними индексами (j) и (k) принадлежат соответствующим компонентам в базисе граничных состояний. Компоненты без индексов соответствуют заданным граничным условиям [2].

ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ

В работе [3] на основе метода интегральных наложений установлена зависимость между пространственным напряженным и деформированным состоянием упругого трансверсально-

изотропного тела и определенными вспомогательными двумерными состояниями, компоненты которого зависят от двух координат z и y (переменных).

В качестве плоских вспомогательных состояний используется плоская деформация, возникающая в цилиндрах, имеющих в точке плоскость упругой симметрии, параллельную плоскости zy (направление η) [3]:

$$\begin{aligned}
u_y^{pl} &= \text{Re}[iq_1\varphi_1(\zeta_1) + iq_2\varphi_2(\zeta_2)]; \\
u_z^{pl} &= \text{Re}[p_1\varphi_1(\zeta_1) + p_2\varphi_2(\zeta_2)]; \\
\sigma_z^{pl} &= -\text{Re}[\gamma_1^2\varphi_1'(\zeta_1) + \gamma_2^2\varphi_2'(\zeta_2)]; \\
\sigma_y^{pl} &= \text{Re}[\varphi_1'(\zeta_1) + \varphi_2'(\zeta_2)]; \\
\sigma_{zy}^{pl} &= -\text{Re}[\gamma_1\varphi_1'(\zeta_1) + \gamma_2\varphi_2'(\zeta_2)]; \\
\sigma_{z\eta}^{pl} &= \text{Re}[i\gamma_3\varphi_3(\zeta_3)]; \quad \sigma_{y\eta}^{pl} = -\text{Re}[\varphi_3(\zeta_3)]; \\
\sigma_\eta^{pl} &= \nu_r\sigma_y^{pl} + \nu_z\frac{E_r}{E_z}\sigma_z^{pl},
\end{aligned} \tag{3}$$

где константы q_i , p_i и γ_3 определены упругими параметрами материала, $\zeta_j = z/\gamma_j + iy$, γ_1 и γ_2 – комплексные корни характеристического уравнения [3],

функции $\varphi_j(\zeta_j)$ – аналитические по своим переменным.

Переход к осесимметричному пространственному состоянию в цилиндрических координатах осуществляется по зависимостям [4]:

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{\sigma_z^{pl}}{\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \quad \sigma_{zr} = \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{\sigma_{zy}^{pl}}{r\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \quad \tau_{z\theta} = \tau_{r\theta} = 0; \\
\sigma_r - \sigma_\theta &= \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{(\sigma_y^{pl} - \sigma_\eta^{pl})(2y^2 - r^2)}{r^2\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \quad \sigma_r + \sigma_\theta = \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{(\sigma_y^{pl} + \sigma_\eta^{pl})}{\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \\
u &= \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{u_y^{pl}}{r\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \quad w = \frac{1}{\pi} \int_{-r}^r \frac{u_z^{pl}}{r\sqrt{r^2 - y^2}} dy; \quad v = 0.
\end{aligned} \tag{4}$$

В силу осевой симметрии граничных условий компоненты тензора напряжений $\tau_{r\theta}$, $\tau_{z\theta}$ и тензора деформаций $\gamma_{r\theta}$, $\gamma_{z\theta}$ равны нулю.

Придавая функциям $\varphi_j(\zeta_j)$ в (3) поочередно значения:

$$\begin{pmatrix} \varphi_1(\zeta_1) \\ \varphi_2(\zeta_2) \end{pmatrix} \in \left\{ \begin{pmatrix} \zeta_1^m \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ \zeta_2^m \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} i\zeta_1^m \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ i\zeta_2^m \end{pmatrix}, \dots \right\}, \quad m \in N,$$

можно сгенерировать набор плоских вспомогательных состояний (3) и по зависимостям (4) построить совокупность пространственных состояний, образуя базис пространства внутренних состояний (1).

Соотношения (4) полностью удовлетворяют уравнения теории упругости [5].

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим равновесие трансверсально-изотропного тела в форме полушара (рис. 2) из горной породы алевролита крупного темно-серого [6]. После процедуры обезразмеривания, аналогия которой приведена в [7], упругие характеристики материала:

$E_z = 6.21$; $E_r = 5.68$; $G_z = 2.55$;
 $\nu_z = 0.22$; $\nu_r = 0.24$ и область тела
 $V = \{(z, r) \mid 0 \leq r \leq 1, 0 \leq z \leq \sqrt{1-r^2}\}$.

Граница S_2 полушара закреплена:
 $\mathbf{u} = 0$; к границе S_1 приложена
растягивающая вдоль оси z нагрузка:
 $p_r = 0$; $p_z = 1 - r^2$ (рис. 2).

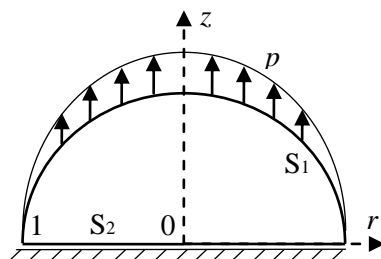


Рис. 2. Граничные условия в первой задаче для полушара

После построения базиса внутренних состояний (1), проводится его ортогонализация по рекурсивно-матричному алгоритму [8]. Компоненты

вектора перемещения в ортонормированном базисном наборе представлены в табл. 1 (показано 6 элементов).

Таблица

Ортонормированный базисный набор компонент вектора перемещения

N	u	w
ξ_1	$0.32946r$	$-0.61716z$
ξ_2	$-0.30358r$	$0.31968z$
ξ_3	$-0.2774rz + 0.7398rz$	$0.3421r^2 + 0.5344z^2 - 0.7125z^2$
ξ_4	$-0.6311rz + 1.6831rz$	$-1.1545r^2 + 0.1639z - 0.2185z^2$
ξ_5	$0.5598r - 0.3613r^3 - 1.4441rz + 1.3536rz^2$	$-0.2259r^2 - 0.8078z + 1.3536r^2z + 1.0702z^2 - 0.8936z^3$
ξ_6	$0.398r + 0.0121r^3 - 2.9829rz + 3.5543rz^2$	$1.1265r^2 + 0.6433z - 2.1265r^2z + 1.0546z^2 - 0.9727z^3$

Для восстановления упругого поля рядами (2) потребовался базис из 25 элементов. Здесь и далее истинное значение показанной величины в таблицах и на рисунках равно показанному значению, умноженному на коэффициент k .

Рис. 3 представляет собой график, иллюстрирующий «насыщение» суммы Бесселя (левая часть неравенства Бесселя). Это является косвенным признаком сходимости решения.

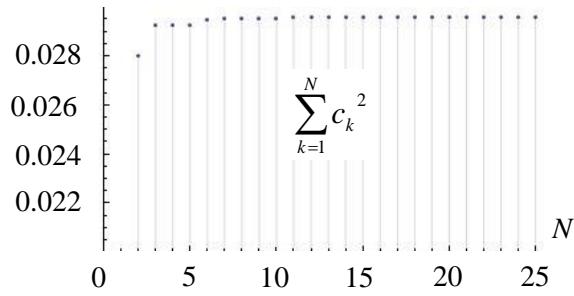
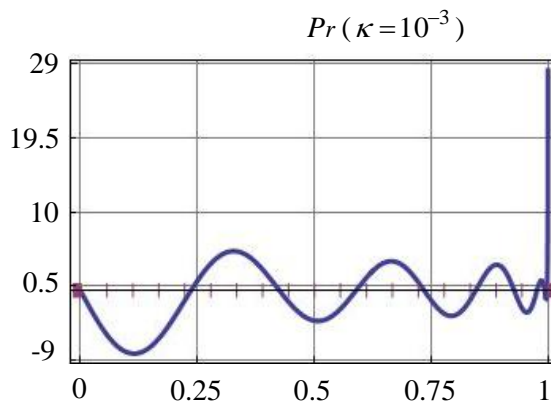


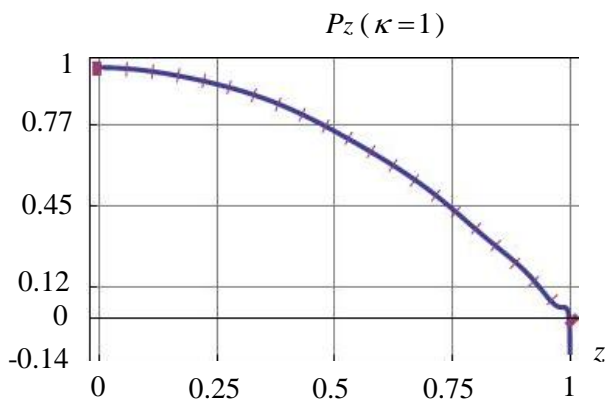
Рис. 3. Сумма Бесселя в задаче для полушара

Проверка результата и оценка точности решения осуществляется сопоставлением заданных граничных условий с восстановленными в результате решения (рис. 4). Здесь и далее, на графиках заданные (| | | |) и

восстановленные (————) ГУ изображены в масштабе. Например, истинное значение p_r на левом графике рис. 4, а равно значению на графике, умноженному на коэффициент κ .



S1



S2

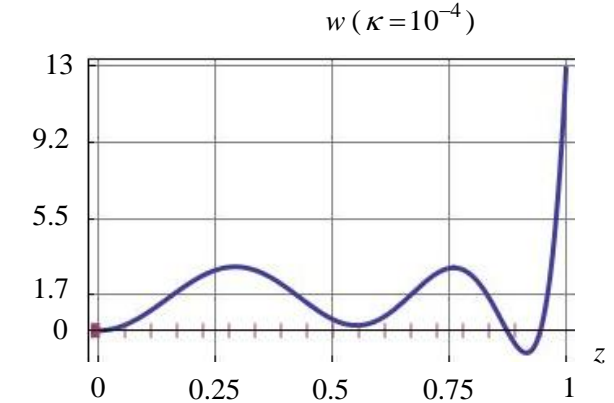
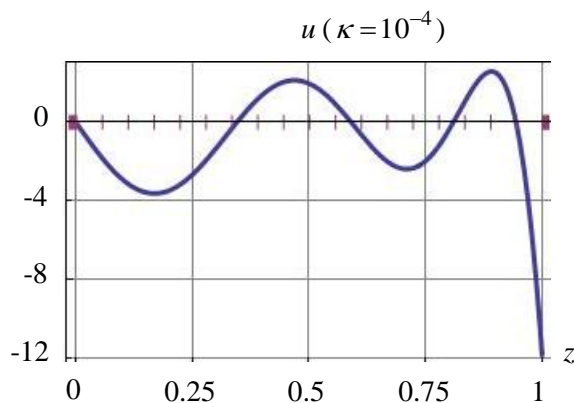


Рис. 4. Верификация граничных условий на участках границы

Как видно из правого верхнего графика, усилие p_z на поверхности S_1 восстановлено с высокой погрешностью (13 %). Это связано с влиянием геометрической особенности (угловая точка на меридиональном сечении) тела на распределение напряжений вблизи такой

особенности. Увеличение числа используемых элементов базиса не приводит к удовлетворительному результату – сходимость в этой области не наблюдается. Поэтому решение в этой области (достаточно близкой к угловой

поверхности тела) не достоверно и его нужно исключить из рассмотрения.

Изолинии полученных компонент упругого поля представлены на рис. 5 (выражения имеют громоздкий вид и в явном виде необозримы). В силу осевой

симметрии изображена область $\{(z,r) \mid 0 \leq r \leq 1, 0 \leq z \leq \sqrt{1-r^2}\}$. Контур деформированного состояния (рис. 5) показан в гипертрофированном виде.

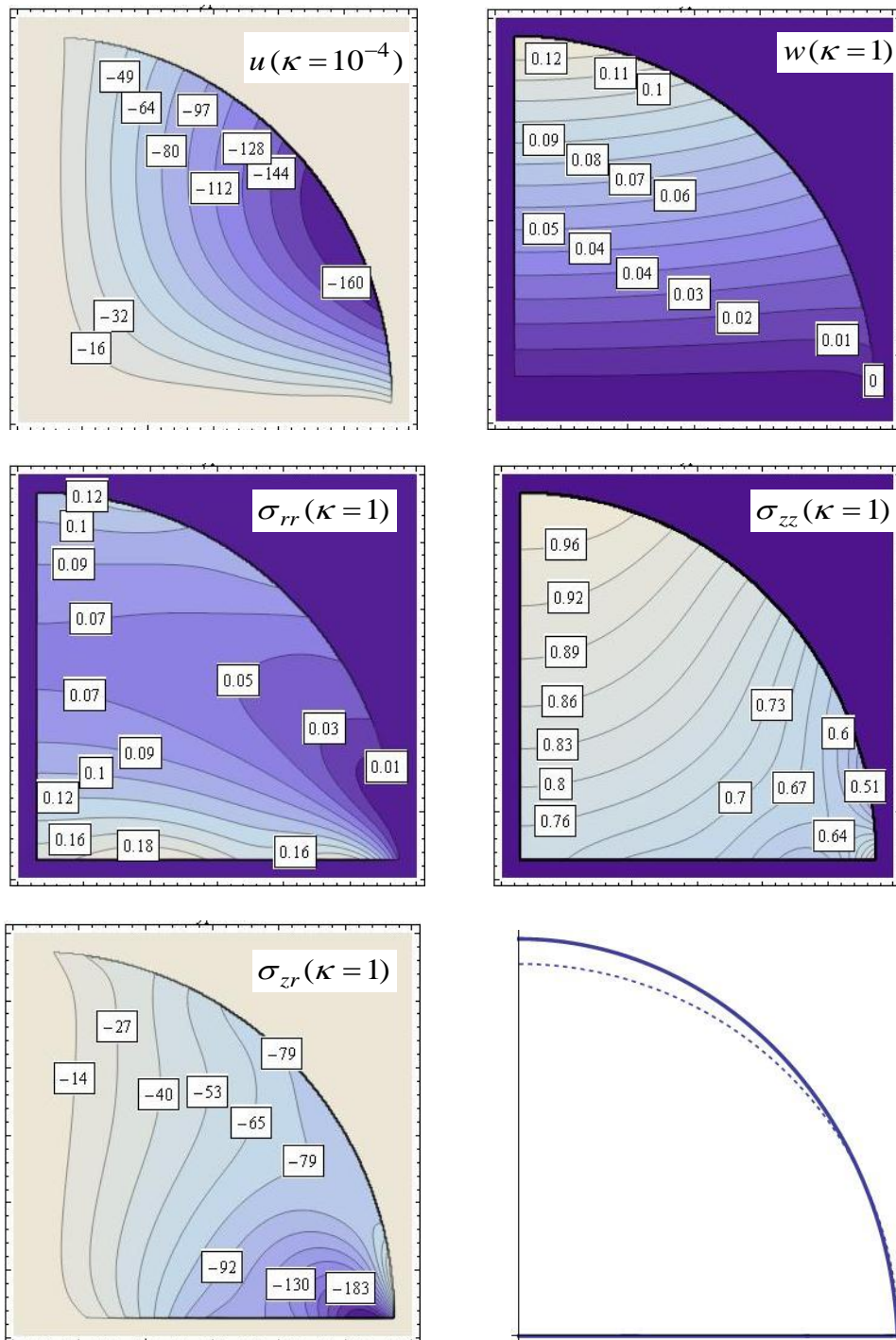


Рис 5. Изолинии характеристик напряженно-деформированного состояния и контур деформированного тела

Следует отметить, что решение смешанных задач теории упругости методом граничных состояний является

наиболее «энергозатратным» в плане машинного времени процессом, чем решение первой и второй основных задач.

Здесь возникает необходимость в вычислении матрицы коэффициентов a_{kj} , которая представляет собой квадратуры от довольно громоздких выражений. Сходимость решения обеспечивается путем наращивания базиса внутренних состояний. Исключения составляют особые точки границы.

По предложенной методике в работе [9] приведено решение смешанной

задачи теории упругости для анизотропного кругового цилиндра, защемленного одним торцом.

Таким образом, метод граничных состояний показал свою эффективность в определении осесимметричного напряженно-деформированного состояния трансверсально-изотропных тел вращения в условиях смешанной стационарной задачи теории упругости.

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. **Пеньков, В.Б.** Метод граничных состояний для основной смешанной задачи линейного континуума / В.Б. Пеньков, В.В. Пеньков. – Текст : непосредственный // Всероссийская конференция. Тезисы докладов. – Тула : ТулГУ, 2000. – С.108–110.

3. **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.

4. **Иванычев, Д.А.** Решение неосесимметричной задачи эластостатики для трансверсально-изотропного тела вращения / Д.А. Иванычев. – Текст : непосредственный. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки, 2022. – № 2(101). – С. 4–21.

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

6. **Лехницкий, С.Г.** Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – Москва : Наука, 1977. – 300 с. – Текст : непосредственный.

7. **Левина, Л.В.** Полнопараметрическое решение задачи теории упругости односвязного ограниченного тела / Л.В. Левина, О.С. Новикова, В.Б. Пеньков. – Текст : непосредственный // Вестник ЛГТУ. – 2016. – № 2 (28). – С. 16–24.

8. **Саталкина, Л.В.** Наращивание 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 : ЛГТУ, 2007. – С. 130–131.

9. **Иванычев, Д.А.** Решение смешанной неосесимметричной задачи теории упругости для анизотропных тел вращения / Д.А. Иванычев. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального-исследовательского политехнического университета. Механика, 2022. – № 2. – С.85–97.

Сведения об авторах:

Иванычев Дмитрий Алексеевич
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры общей механики,
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
lsivdmal@mail.ru

Information about the authors:

Ivanychev Dmitry Alekseevich
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences,
Associate Professor of the Department
of General Mechanics,
Lipetsk State Technical University.
398055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.
lsivdmal@mail.ru

Балыкин Данила Игоревич
аспирант кафедры общей механики
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
Balykindanila89@gmail.com
Ездакова Диана Владимировна
аспирант кафедры общей механики
Липецкий государственный технический
университет.
398055, Россия, г. Липецк,
ул. Московская, д. 30.
Baskach-di@mail.ru

Balykin Danila Igorevich
Postgraduate student
Lipetsk State Technical University.
398055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.
Balykindanila89@gmail.com

Ezdakova Diana Vladimirovna
Postgraduate student
Lipetsk State Technical University.
398055, Lipetsk, Moskovskaya st., 30.
Baskach-di@mail.ru

DOI 10.53015/30343275_2025_3_59
УДК 621.791

В.В. НЕВЕРОВ, П.Н. КЛЕВЦОВ, С.В. ЛЕБЕДЕВ

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ИЗГИБОВ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В работе описаны основные затруднения, возникающие при сварке деталей трубопроводов, предназначенных для изменения направления расположения трубопровода. Приведены приспособления, предназначенные для устранения возникновения дефектов сварных соединений. Показана последовательность основных технологических операций.

Ключевые слова: детали трубопровода, труборезы, центраторы, вращатели.

V.V. NEVEROV, P.N. KLEVTSOV, S.V. LEBEDEV

FEATURES OF WELDING STEEL PIPELINE BENDS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper describes the main difficulties encountered in welding pipeline parts designed to change the direction of the pipeline. Devices are given designed to eliminate the occurrence of defects in welded joints. The sequence of basic technological operations is shown.

Keywords: pipeline parts, pipe cutters, centralizers, rotators.

ВВЕДЕНИЕ

При сварке стальных трубопроводов различного назначения особое внимание уделяется сварке стыков элементов при изготовлении технологических отводов (рис. 1). При соединении деталей в этом случае возникают затруднения, связанные с центровкой элементов в связи с тем, что

при их изготовлении возможно нарушение геометрии, что особенно актуально при изготовлении трубопроводов диаметром более 200 мм. В случае расхождения в диаметрах соединяемых деталей возможно возникновение негерметичности стыка и снижение его механических свойств вследствие нарушения формирования сварного шва [1–3].

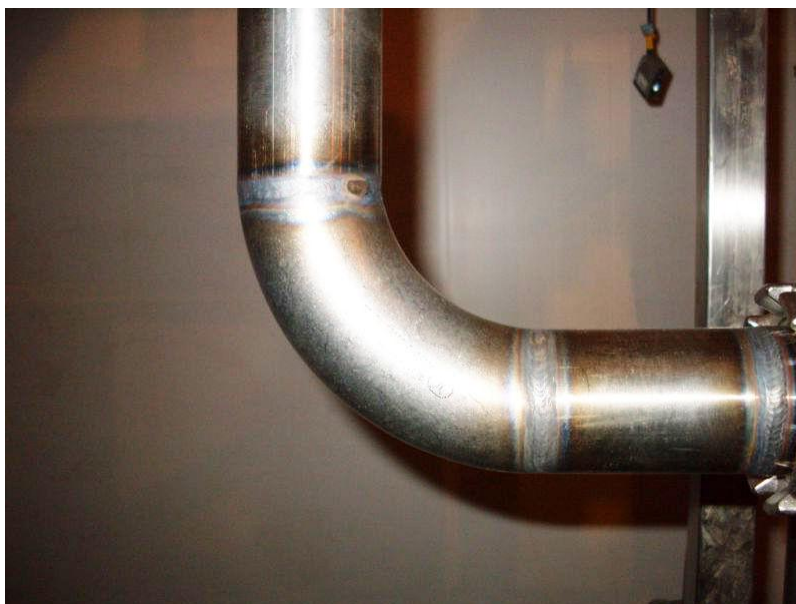


Рис. 1. Общий вид отвода трубопровода

Для решения такой проблемы необходима качественная подготовка деталей для сварки. Непосредственно для сварки используют специальные приспособления, обеспечивающие выравнивание и центровку соединяемых деталей перед сваркой [3–5].

Технологический процесс заготовки деталей изделий из труб для изготовления отвода начинается с подбора металла по размерам и маркам стали и включает разметку, резку, очистку.

Разметка – это процесс нанесения на металл в натуральную величину контура детали. В процессе разметки необходимые указания по обработке наносят на металл с использованием мерительного и специального инструмента: металлических рулеток, линеек, чертилок, угольников, молотков и др. Качество разметки во многом зависит от точности измерительного инструмента.

Резка труб производится с помощью трубореза, обеспечивающего

качественный рез и подготовку кромок под сварку.

Электрические разъемные труборезы предназначены для отрезки, обработки наружной фаски и расточки внутреннего диаметра труб под последующую сварку. Оборудование для резки труб, показанное на рис. 2, позволяет произвести отрезку в любом месте трубопровода. Переносные труборезы базируются по наружному диаметру трубы, состоят из взаимозаменяемых модулей и имеют пневматический или электрический приводы, а также могут комплектоваться гидроприводами во взрывобезопасном исполнении.

В стандартном комплекте поставки оборудование комплектуется режущим инструментом из быстрорежущей стали в количестве 6...8-ми двухсторонних резцов на механизм и принадлежностями для выполнения отрезки и обработки наружной фаски.



Рис. 2 . Общий вид трубореза

Основные

характеристики трубореза:

- время установки на трубе 1–3 минуты;
- облегченные планшайба и корпус;
- унифицированный быстросъемный электропривод;
- возможность работы в автоматическом режиме;
- возможность отключения подачи резцов во время работы;
- замена резцов без снятия механизма;
- возможность обработки труб любой толщины (от тонкостенных до толщины 100 мм и более);
- возможность обработки любых материалов (от пластика до высоколегированных и нержавеющей сталей, а также цветных металлов и сплавов).

Стандартный комплект поставки:

- вращатель;

- привод;
- два отрезных суппорта;
- режущий инструмент из Р18 (8–10 резцов);
- комплект принадлежностей и запасных частей.

Сборка также производится с помощью специализированных устройств, а именно центратора и роликового стенда. Цепной центратор (рис. 3) с двумя упорными винтами создан для соединения труб и фитингов под сварку. Устройство уровня и поддержки центратора позволяет прочно закрепить трубу, отвод, фланец и другие фитинги во время сборки и сварки.



Рис. 3. Цепной центратор с двумя упорными винтами

Существуют модели центраторов из углеродистой и нержавеющей стали для труб диаметром 254–2134мм. Как правило, они имеют следующую комплектацию и характеристики:

- сверхточность - струбцина с двумя упорными винтами позволяет производить сварку шва, не снимая центратора с трубы;
- точное позиционирование — струбцина с двумя упорными винтами, находящаяся по внешнему диаметру трубы, обеспечивает точное соединение и выравнивание труб с погрешностью 0,4 мм;
- возможность выправления деталей трубопроводов при соединении;
- безопасность - отводы, фланцы и другие фитинги поддерживаются уровнем и устройством поддержки, уменьшающими риск получения повреждений;
- универсальность - центратор соединяет и исправляет трубы, отводы, тройники и другие фитинги.

Базовый комплект центратора:

- цепь необходимой длины;

- двойная струбцина для упорных винтов на соответствующий диапазон диаметров труб;
- основной блок;
- устройство точной настройки;
- уровень и устройство поддержки;
- ключ;
- распорные винты из углеродистой или нержавеющей стали;
- бокс для хранения;
- инструкция по эксплуатации.

Последовательность сборочно-сварочных операций заключается в следующем. При помощи подъемного крана участки трубопровода укладываются на роликовый стенд (рис. 4–7), посредством которого осуществляется вращение свариваемых деталей. Фиксация собранных деталей осуществляется на прихваточных сварочных швах. После сборки производится непосредственно сварка. При необходимости собранные перед сваркой детали могут быть подогреты до определенной температуры,

технологическим процессом изготовления изделия (обычно не более 300 °С). Перед сваркой центратор обычно удаляется за ненадобностью, так как жёсткость

конструкции обеспечивается прихваточными швами. Смещение наружных кромок обычно не должно превышать 3,0 мм.

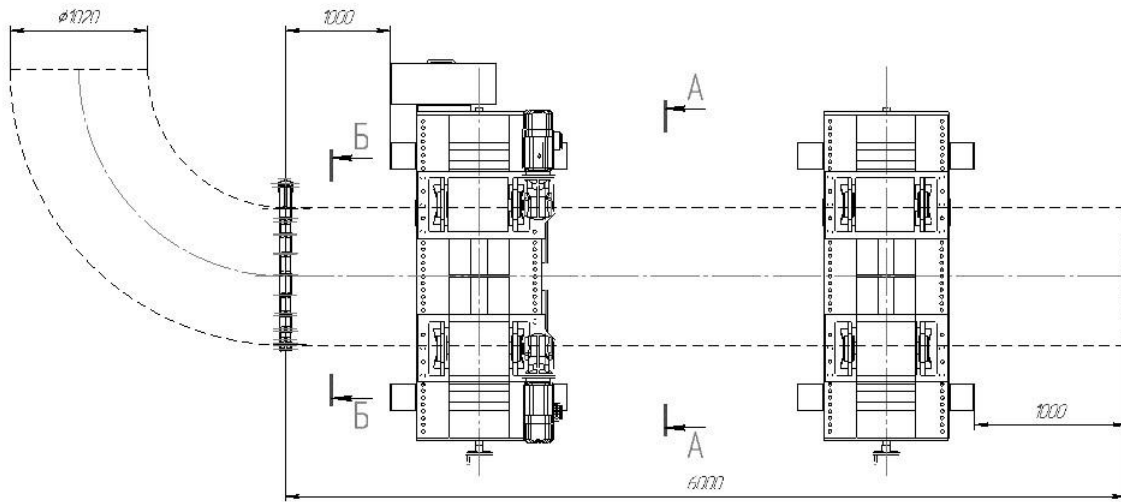


Рис. 4. Положение деталей трубопровода на роликовом стенде (размеры ориентировочные)

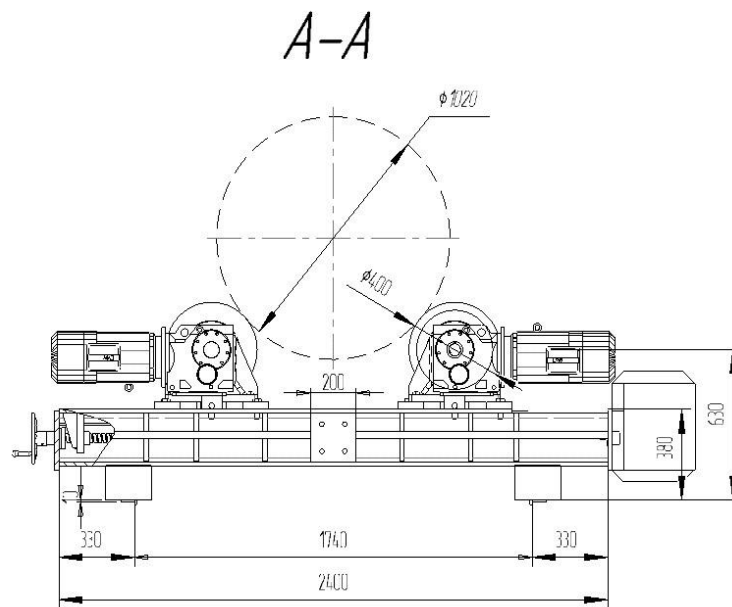


Рис. 5. Положение трубы в роликовом стенде (размеры ориентировочные)

Б-Б

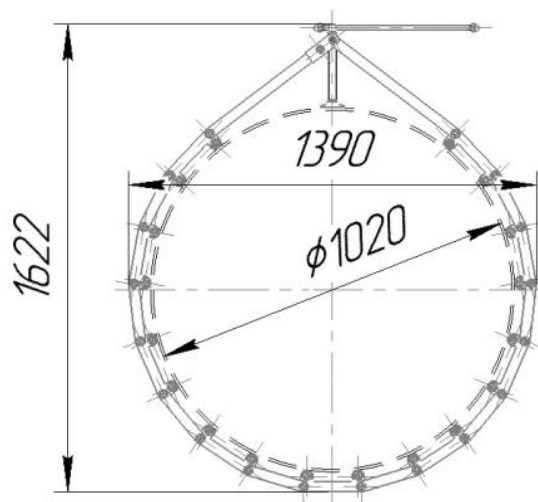


Рис. 6. Положение трубы в центраторе (размеры ориентировочные)

После сварки производятся мероприятия по контролю качества сварного соединения. Обычно применяются методы визуально-измерительного контроля, ультразвуковая дефектоскопия и (или) рентгенографические исследования.

Таким образом, для получения качественного сварного соединения элементов трубопроводов соблюдения одних лишь технологических приёмов

сварки недостаточно, необходимо использование дополнительных приспособлений. Их применение хотя и достаточно затратно (помимо финансовых вложений, требуется время на их монтаж-демонтаж а также подготовка персонала), но сводит к минимуму получение дефектов сварных соединений, что на ответственных участках трубопроводов весьма актуально.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Галушкина, В.Н.** Технология производства сварных конструкций: учебник / В.Н. Галушкина. – Москва : Издательский центр «Академия» 2014. – 380 с. – Текст : непосредственный.

2. **Николаев, Г.А.** Сварка в машиностроении. Справочник в 4-х т. / Г.А. Николаев. – Москва : Машиностроение, 2005. Т.2 (Под ред. А.И. Акулова), 2005. – 462 с. – Текст : непосредственный.

3. **Овчинников, В.В.** Расчет и проектирование сварных конструкций: учебник / В.В. Овчинников. – Москва :

Издательский центр «Академия», 2015.– 290 с. – Текст : непосредственный.

4. **Прох, Л.Ц.** Справочник по сварочному оборудованию – 2-е издание, переработанное и дополненное / Л.Ц. Прох. – Киев : Техника, 2007. – 207 с. – Текст : непосредственный.

5. **Неверов, В.В.** Причины возникновения дефектов сварных соединений при изготовлении теплообменников газовых котлов и способы их устранения / В.В. Неверов. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – Москва : Машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 33-38.

Сведения об авторах:

Неверов Виктор Валентинович

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

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: viktor-neverov@mail.ru.

Клевцов Павел Николаевич

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

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: klevtsov_weld@mail.ru

Лебедев Сергей Викторович

доктор технических наук,
профессор кафедры оборудования и
процессов машиностроительных
производств, Липецкий государственный
технический университет.

398055, Россия, г. Липецк,

ул. Московская, д. 30.

e-mail: svarka_lip@mail.ru.

Information about the authors:

Neverov Viktor Valentinovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
professor of the

Departments of Equipment and Processes of
Machine-building Industries,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: viktor-neverov@mail.ru.

Klevtsov Pavel Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences,
Associate professor of the Departments of
Equipment and Processes of Machine-
building Industries,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: klevtsov_weld@mail.ru

Lebedev Sergey Viktorinovich

Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Departments of Equipment
and Processes of Machine-building
Industries,

Lipetsk State Technical University.

398055, Russia, Lipetsk,

Moskovskaya st., 30.

e-mail: svarka_lip@mail.ru

А.В. СУХАНОВ

ПОДБОР СЕЧЕНИЙ ДВУХОПОРНОЙ БАЛКИ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Липецкий государственный технический университет, Липецк

Аннотация: В настоящей работе представлен расчёт на прочность статически определимой двухопорной балки с двутавровым, треугольным и круглым сечениями при косом изгибе. По заданной внешней нагрузке и значениям прочностных характеристик материала строятся эпюры нормальных напряжений в середине пролёта балки и подбираются геометрические параметры соответствующих сечений. Подбор поперечного сечения осуществляется из условия прочности по нормальным напряжениям. Приведённые в статье рекомендации могут быть полезны для инженеров-проектировщиков, связанных с конкретным проектированием и расчётом стержневых конструкций, и направлены на решение задач, возникающих на производственных предприятиях строительной и машиностроительной отраслей.

Ключевые слова: балка на двух опорах, косой изгиб, сложный изгиб, изгибающий момент, критерий прочности.

A.V. SUKHANOV

SELECTION OF SECTIONS FOR A TWO-SUPPORT BEAM UNDER OBLIQUE BENDING CONDITIONS

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Abstract: The paper presents the strength calculation of a statically determinate two-support beam with I-beam, triangular and circular cross-sections under non-symmetrical bending conditions. Specified external load and the values of the material strength characteristics are used to construct normal stress diagrams in the middle of the beam span and to select the geometric parameters of the corresponding sections. The cross-section is selected according to the strength condition for normal stresses. The recommendations given in the article can be useful for engineers designing and calculating specific rod structures and are aimed at solving problems arising at manufacturing enterprises in the construction and machine-building industries.

Keywords: two-support beam, non-symmetrical bending, complex bending, bending moment, strength criterion.

ВВЕДЕНИЕ

В эксплуатационных условиях стержни металлических конструкций могут испытывать одновременное действие различных комбинаций простых напряжённых состояний: растяжения, сжатия, кручения или изгиба [1-5]. В этом случае принято говорить о сложном сопротивлении. В общем случае нагружения стержня в поперечном сечении могут действовать шесть компонентов внутренних сил – N , Q_x , Q_y , M_x , M_y , $M_{кр}$, связанных с четырьмя

простыми деформациями стержня – растяжением (сжатием), сдвигом, кручением и изгибом.

При малых деформациях, подчиняющихся закону Гука, сложное напряжённое состояние можно получить суммированием напряжённых состояний, вызванных каждым видом простого нагружения.

Сложный изгиб вызывается силами и моментами, расположенными в разных плоскостях, проходящих через ось балки (рис. 1, а). Такой изгиб также называют

неплоским, так как изогнутая ось балки не является плоской кривой.

Если все нагрузки, вызывающие изгиб, действуют в одной плоскости, не совпадающей ни с одной из главных плоскостей, то изгиб называется косым (рис. 1, б).

В данной работе рассматривается косой изгиб. Подберём поперечное сечение балки, испытывающей косой изгиб, в виде: 1) двутавра; 2) равнобедренного треугольника ($h = b$); 3) круга (рис. 2). Исходные данные: $q = 5$

кН/м, $a = 4$ м. Для подбора сечения потребуется:

- построить эпюры изгибающих моментов M_x и M_y в главных плоскостях;
- установить опасные сечения и опасные точки в нём.

Подбор поперечного сечения осуществляется из условия прочности по нормальным напряжениям. Примем расчётное сопротивление $R = 210$ МПа. После подбора сечения балки укажем положение нулевой линии в плоскости опасного сечения.

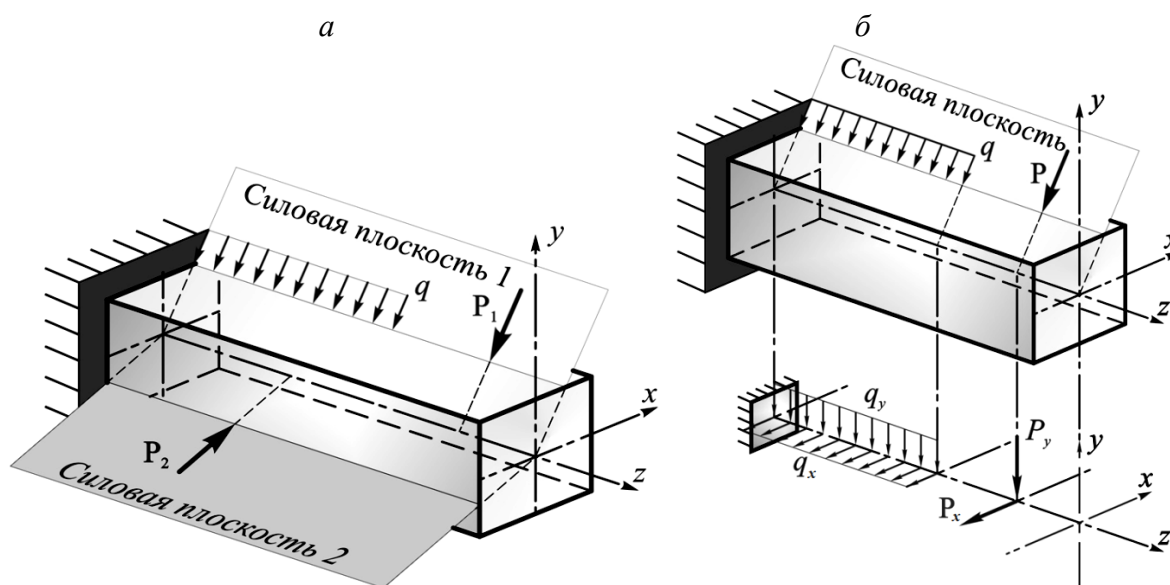


Рис. 1. Сложный изгиб – а; косой изгиб балки – б

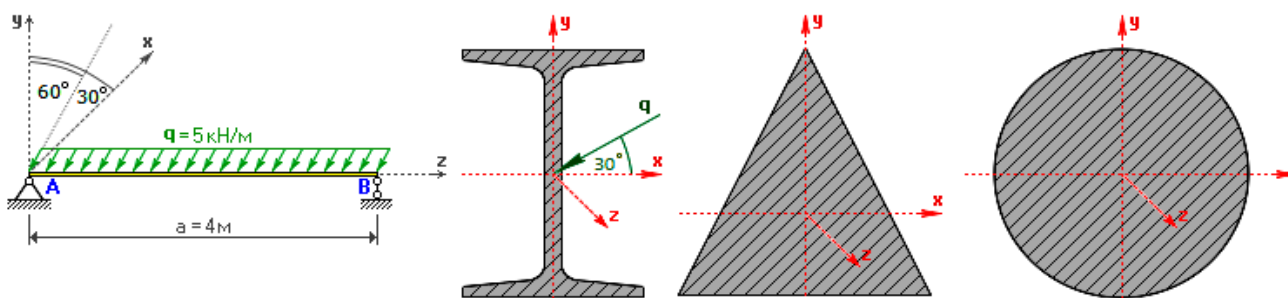


Рис. 2. Схема нагружения балки и варианты поперечных сечений

Для решения задачи принимаем правостороннюю трёхмерную систему координат. Условимся, что момент силы относительно оси считается положительным, если мы смотрим навстречу оси и видим проекцию силы, стремящуюся повернуть плоскость чертежа в направлении против хода часовой стрелки, в противном случае

момент силы будем считать отрицательным.

Равномерно распределённую нагрузку q , приложенную под углом 30° к оси X , раскладываем по главным плоскостям на составляющие q_x, q_y .

$$q_x = q \cdot \cos(30^\circ) = 2,5\sqrt{3} = 4,33 \text{ кН/м};$$

$$q_y = q \cdot \sin(30^\circ) = 2,5 \text{ кН/м}.$$

Построим эпюру изгибающего момента M_x от нагрузки $q_y=2,5$ кН.

Опорные реакции:

$$R_A^y = R_B^y = \frac{q_y a}{2} = 5 \text{ кН.}$$

Уравнение изгибающего момента M_x будет иметь вид:

$$M_x = 0,5q_y a \cdot z - 0,5q_y \cdot z^2.$$

При $z=0$ и при $z=a$ $M_x=0$ кНм.

При $z=0,5a$:

$$M_x = 0,125q_y a^2 = 5 \text{ кНм.}$$

Построим эпюру изгибающего момента M_y от нагрузки $q_x=4,33$ кН.

Опорные реакции:

$$R_A^x = R_B^x = \frac{q_x a}{2} = 8,66 \text{ кН.}$$

Уравнение изгибающего момента M_y будет иметь вид:

$$M_y = 0,5q_x \cdot z^2 - 0,5q_x a \cdot z.$$

При $z=0$ и при $z=a$ $M_y=0$ кНм.

При $z=0,5a$:

$$M_y = -0,125q_x a^2 = -8,66 \text{ кНм.}$$

Эпюры M_x и M_y приведены на рис. 3. Опасное сечение находится посередине пролёта балки. В данном сечении $|M_x| = 5$ кНм, $|M_y| = 8,66$ кНм.

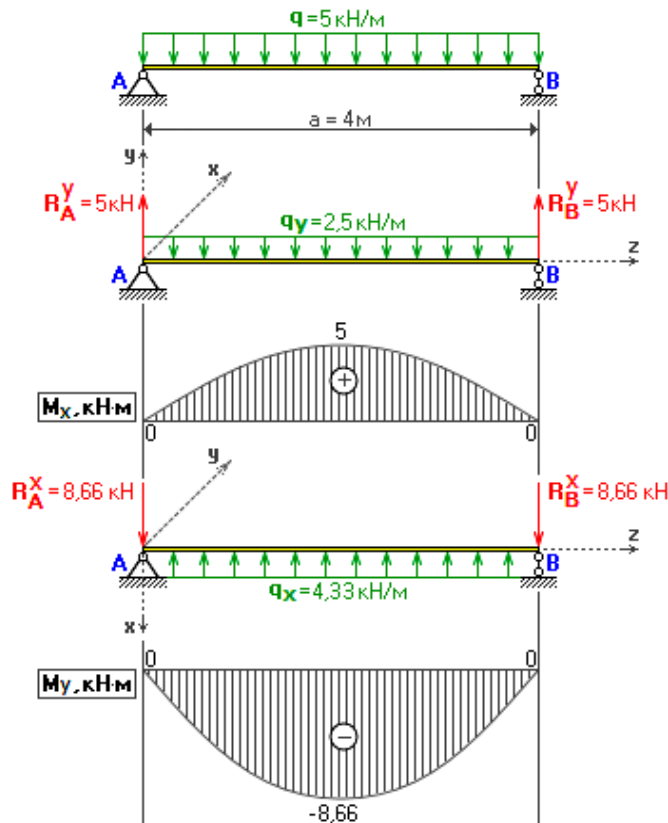


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов M_x и M_y

Выполним подбор двутаврового сечения. Опасные точки сечения – А и В (рис. 4).

В общем случае сложного изгиба условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_x|}{W_x} + \frac{|M_y|}{W_y} \leq R.$$

Определим значения неизвестных W_x и W_y из условия:

$$\frac{W_x}{W_y} = 8, \quad W_y = \frac{W_x}{8}.$$

Тогда

$$\frac{|M_x|}{W_x} + \frac{8|M_y|}{W_x} \leq R,$$

$$W_x = \frac{|M_x| + 8|M_y|}{R} = \frac{(5 + 8 \cdot 8,66)}{210} = 353,71 \text{ см}^3.$$

Из таблицы сортамента для прокатных профилей (ГОСТ 8239-89) подбираем

двутавр №27 с параметрами $W_x = 371 \text{ см}^3$, $W_y = 41,5 \text{ см}^3$, $I_x = 5010 \text{ см}^4$, $I_y = 260 \text{ см}^4$.

Максимальные нормальные напряжения:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_x|}{W_x} + \frac{|M_y|}{W_y} = \frac{5 \cdot 10^2}{371} + \frac{8,66 \cdot 10^2}{41,5} = 13,477 \text{ МПа} + 208,674 \text{ МПа} = 222,151 \text{ МПа}.$$

Положение нулевой линии в сечении определяется углом между осью X и нулевой линией β , тангенс которого вычисляется по формуле

$$\text{tg}(\beta) = \frac{M_y}{M_x} \cdot \frac{I_x}{I_y} = \frac{-8,66}{5} \cdot \frac{5010}{260} = -33,374.$$

Отсюда угол $\beta = -88,3^\circ$. Нулевая линия проходит через четверти с разными знаками (рис. 4). Максимальные значения нормальных напряжений от изгибающих моментов M_x и M_y будут равны

$$\sigma_{M_x} = \frac{|M_x|}{W_x} = 13,477 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_y} = \frac{|M_y|}{W_y} = 208,674 \text{ МПа}.$$

Значения нормальных напряжений в точках А и В двутаврового сечения будут равны

$$\sigma_A = \frac{|M_x|}{W_x} + \frac{|M_y|}{W_y} = 13,477 \text{ МПа} + 208,674 \text{ МПа} = 222,151 \text{ МПа};$$

$$\sigma_B = -\frac{|M_x|}{W_x} - \frac{|M_y|}{W_y} = -13,477 \text{ МПа} - 208,674 \text{ МПа} = -222,151 \text{ МПа}.$$

На рис. 4 показана суммарная эпюра нормальных напряжений σ_Σ , что допустимо.

Заметим, что для выбранного двутаврового сечения суммарные нормальные напряжения превышают предельное значение расчётного сопротивления $R = 210 \text{ МПа}$. Вычислим перенапряжение:

$$\eta = \frac{\sigma_{\max} - R}{R} \cdot 100\% = \frac{222,151 - 210}{210} \cdot 100\% = 5,78\% > 5\%.$$

Такое перенапряжение недопустимо. Следовательно, рациональнее выбрать двутавр № 30.

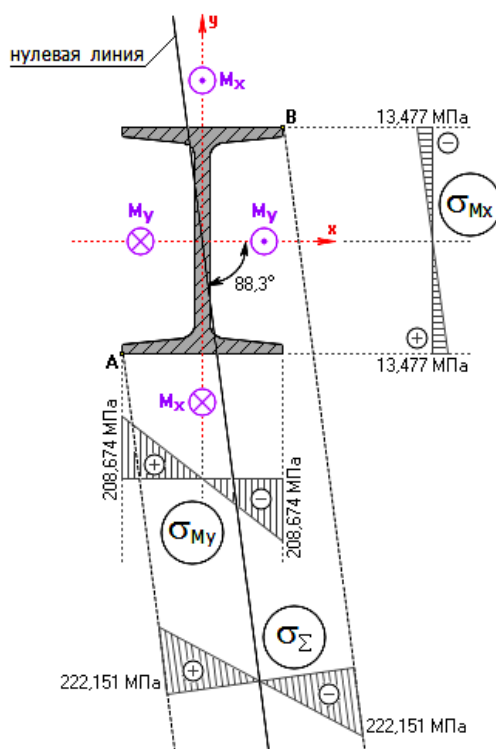


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений в двутавровом сечении балки (в середине пролёта балки)

Выполним подбор сечения в виде треугольника, у которого высота равна основанию ($b=h$). Опасную точку сечения найдём, предварительно определив положение нулевой линии.

Моменты инерции равностороннего треугольника с основанием b и высотой h относительно центральных осей X и Y вычисляются по формулам:

$$I_x = \frac{bh^3}{36} = \frac{b^4}{36}; \quad I_y = \frac{hb^3}{48} = \frac{b^4}{48}.$$

$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{M_y}{M_x} \cdot \frac{I_x}{I_y} = \frac{-8,66}{5} \cdot \frac{48}{36} = -2,31.$$

Отсюда угол $\beta = -66,6^\circ$.

Проведя нулевую линию, а затем прямые, параллельные нулевой линии, и касательные к контуру сечения, определяем наиболее опасную точку. Опасная точка находится в удалении на наибольшем расстоянии от нулевой линии. В нашем случае это точка А (рис. 5).

Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{|M_x|}{I_x} \cdot |y_A| + \frac{|M_y|}{I_y} \cdot |x_A| \leq R,$$

$$\frac{36|M_x|}{b^4} \cdot \frac{b}{3} + \frac{48|M_y|}{b^4} \cdot \frac{b}{2} \leq R,$$

$$\frac{12|M_x|}{b^3} + \frac{24|M_y|}{b^3} \leq R,$$

$$b \geq \sqrt[3]{\frac{12|M_x| + 24|M_y|}{R}} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 5 \cdot 10^6 + 24 \cdot 8,66 \cdot 10^6}{210}} = 108 \text{ мм} =$$

$$= 10,8 \text{ см}.$$

Окончательно принимаем $b = 11$ см.

Моменты инерции при таком значении b :

$$I_x = \frac{b^4}{36} = \frac{11^4}{36} = 406,69 \text{ см}^4;$$

$$I_y = \frac{b^4}{48} = \frac{11^4}{48} = 305,02 \text{ см}^4;$$

Для случая, когда трёхмерная система координат левосторонняя,

напряжения в точке сечения с координатами x и y рассчитываются по формуле

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} x + \frac{M_x}{I_x} y.$$

В нашем случае, когда трёхмерная система координат правосторонняя, напряжения в точке сечения с координатами x и y рассчитываются по формуле

$$\sigma = \frac{M_y}{I_y} x - \frac{M_x}{I_x} y.$$

Вычислим нормальные напряжения от изгибающих моментов M_x и M_y и построим суммарную эпюру нормальных напряжений в сечении балки σ_Σ .

$$\sigma_{M_x}^A = -\frac{M_x}{I_x} \cdot y_A = -\frac{5 \cdot 10^3}{406,69} \cdot \left(-\frac{11}{3}\right) =$$

$$= 45,08 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_x}^B = -\frac{M_x}{I_x} \cdot y_B = -\frac{5 \cdot 10^3}{406,69} \cdot \frac{2 \cdot 11}{3} =$$

$$= -90,16 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_x}^C = \sigma_{M_x}^A = 45,08 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_y}^A = \frac{M_y}{I_y} \cdot x_A = \frac{-8,66 \cdot 10^3}{305,02} \cdot \left(-\frac{11}{2}\right) =$$

$$= 156,15 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_y}^B = 0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{M_y}^C = \frac{M_y}{I_y} \cdot x_C = \frac{-8,66 \cdot 10^3}{305,02} \cdot \frac{11}{2} =$$

$$= -156,15 \text{ МПа};$$

$$\sigma_\Sigma^A = \frac{M_y}{I_y} x_A - \frac{M_x}{I_x} y_A =$$

$$= 156,15 + 45,08 = 201,23 \text{ МПа};$$

$$\sigma_\Sigma^C = \frac{M_y}{I_y} x_C - \frac{M_x}{I_x} y_C =$$

$$= -156,15 + 45,08 = -111,07 \text{ МПа}.$$

Эпюры нормальных напряжений в треугольном сечении приведены на рис. 5.

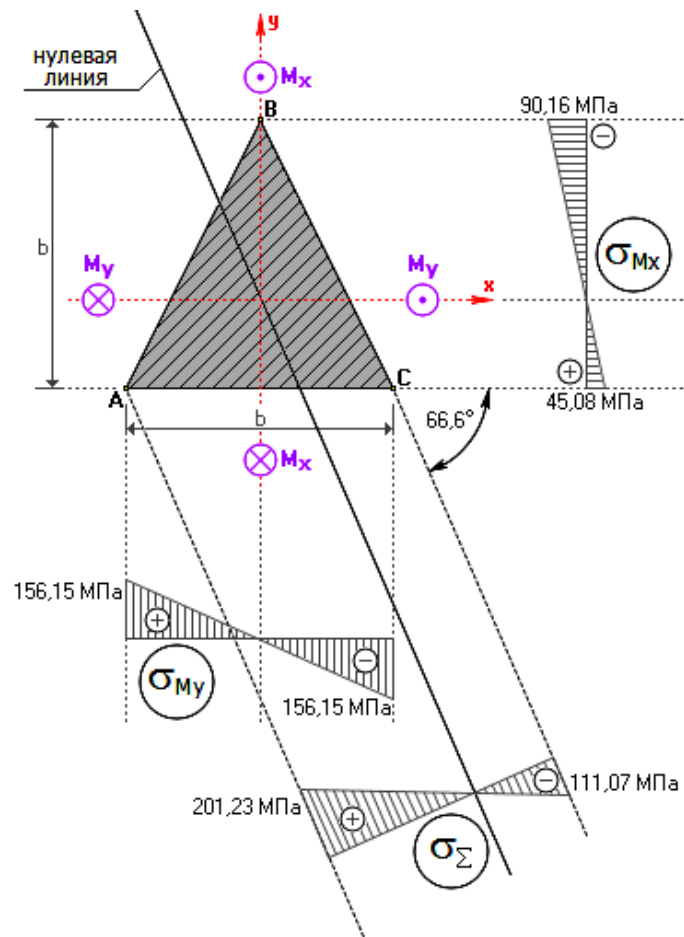


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений в треугольном сечении балки

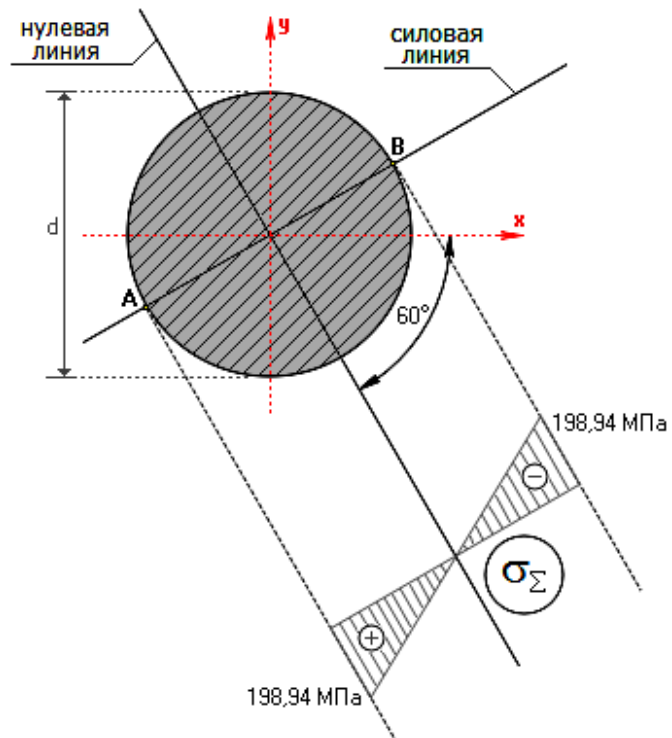


Рис. 6. Эпюры нормальных напряжений в круглом сечении балки

Выполним подбор диаметра d круглого сечения. Условие прочности в этом случае имеет вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} \leq R.$$

Суммарный изгибающий момент:

$$\begin{aligned} M &= \sqrt{M_x^2 + M_y^2} = \sqrt{\left(\frac{q_x l^2}{8}\right)^2 + \left(\frac{q_y l^2}{8}\right)^2} = \\ &= \frac{l^2}{8} \sqrt{q_x^2 + q_y^2} = \frac{4^2}{8} \sqrt{\left(\frac{5\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} = \\ &= 10 \text{ кНм}. \end{aligned}$$

Или

$$M = \frac{ql^2}{8} = \frac{5 \cdot 4^2}{8} = 10 \text{ кНм}.$$

Момент сопротивления круглого сечения

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

Тогда условие прочности примет вид:

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

откуда

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32M}{\pi R}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 10 \cdot 10^6}{\pi \cdot 210}} = 78,57 \text{ мм}.$$

Окончательно принимаем $d = 8$ см.

Для круглого сечения нулевая линия перпендикулярна силовой линии, угол $\beta = -60^\circ$ (рис. 6).

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

Вычислим нормальные напряжения в опасных точках сечения (А и В).

$$\sigma^A = \sigma^B = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot 10 \cdot 10^6}{\pi \cdot 80^3} = 198,94 \text{ МПа}.$$

Эпюры нормальных напряжений в круглом сечении приведены на рис. 6.

Рассмотренный алгоритм подбора двутаврового, треугольного и круглого сечений для двухопорной балки при косом изгибе, позволяет сравнительно быстро оценить работоспособность простой стержневой конструкции с учётом заданных геометрических размеров и механических характеристик материала.

ВЫВОДЫ

Представленный алгоритм подбора сечений двухопорной балки может использоваться на практике для расчёта как стержневых элементов конструкций при косом изгибе, так и для оценки прочности элементов конструкций, испытывающих эксплуатационные нагрузки на изгиб [6, 7].

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

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. 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.

7. 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 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).

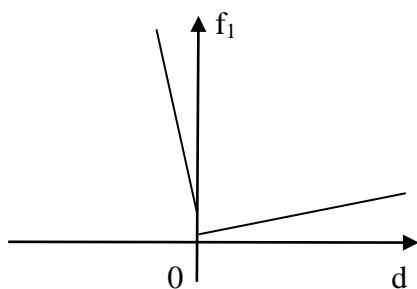


Рис. 1. График функции потерь потребителя

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.

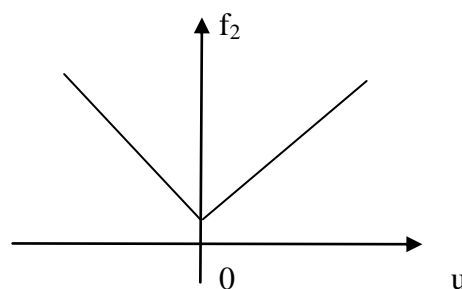


Рис. 2. График функции потерь производителя

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 $a_2 > 0$, $b_2 > 0$ [6, 7].

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

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

чтобы минимизировать суммарные потери потребителя в течение планового периода T .

ВЫВОДЫ

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

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)

№ 3 (60) 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: Е.А. Федюшина

Перевод (англ.) Н.В. Барышев

Дата подписания к использованию 29 октября 2025 года