

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098
от 18 декабря 2015 г.
Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А. А. Леонова»
(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650
Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП1997

Главный редактор
Артюшенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495) 543-34-31 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Вальс В.И.
АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДУЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТАБЛИЦ VISUAL FOXPRO В ФОРМАТ SQL DUMP В СИСТЕМАХ ДОКУМЕНТООБОРОТА.....3

Лукьянов А.А.
АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЙ И ИНСТРУМЕНТО В НЕПРЕРЫВНОЙ ИНТЕГРАЦИИ И ПОСТАВКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРКИ ЗАГРУЗОЧНОЙ СРЕДЫ LINUX ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ УДАЛЁННОГО ДОСТУПА.....15

Филяев Г.А., Релич С.Т.
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ И МОДЕЛИРУЕМАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....26

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Жаров В.Г., Шайтура С.В., Останкова Н.В.
ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФРАСТРУКТУРЫ СЕРВИСА.....39

Семенов А.Б., Артющенко В.М.
ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИСТЕМНОЙ ПРОБЛЕМЫ СЛАБОГО ЗВЕНА В ТЕХНИКЕ СТРУКТУРИРОВАННОГО КАБЛИРОВАНИЯ.....66

Шульженко Н.А., Шульженко С.Н.
КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОДСИСТЕМ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ КОРПОРАТИВНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ОТРАСЛЕВОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ.....77

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аббасова Т.С., Мудрецов А.В.
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ О КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ.....94

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- 1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
- 2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
- 3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
- 4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- 1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
- 2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
- 3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
- 4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
- 5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
- 6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
- 7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
- 8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
- 9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
- 10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
- 11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
- 12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
- 13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
- 14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
- 15. **Самаров Е.К.**, д.т.н., доцент
- 16. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
- 17. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
- 18. **Стреналюк Ю.В.**, д.т.н., профессор
- 19. **Халиулин В.И.**, д.т.н., профессор
- 20. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
- 21. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 08.12.2023

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,8

Тираж 500 экз.

Заказ № 95-04

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Лобанов И.Е.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ НА
ГИДРОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН
В ТРУБАХ С ПОЛУКРУГЛЫМИ
ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....105**

Стрельцова Г.А., Исаева Г.Н.

**ПРИМЕНЕНИЕ MBSE-МЕТОДОЛОГИЙ ПРИ
СОЗДАНИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....123**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Бабкин Д.С.

**РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО
СЛОИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
СИСТЕМЫ ТI-С С ПРИМЕНЕНИЕМ БАРЬЕРНЫХ
СЛОЕВ.....137**

Кашапов Л.Н., Кудрявый А.Д., Чебакова В.Ю.,
Кормушин К.В.

**ВЛИЯНИЕ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА
ПРОЦЕССЫ ОСАЖДЕНИЯ ЦИНКА.....143**

Скрябин М.Л.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА РАСКИСЛИТЕЛЯ
НА НАЛИЧИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В
СТАЛЬНЫХ ОТЛИВКАХ.....163**

Спирин Б.Л., Фролов С.В., Абразумов В.В.
**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ
РАЗРУШЕНИЯ ЛАМИНИРОВАННЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ.....173**

УДК 004.9

Анализ использования модуля преобразования таблиц Visual Foxpro в формат SQL dump в системах документооборота

Владислав Игоревич Вальс, программист,
ФБУЗ Центр гигиены и эпидемиологии, г. Москва

В данной научной статье представлен программный модуль, предназначенный для преобразования баз данных формата XBase, в том числе таблиц FoxPro с мемо файлами, в формат SQL dump. Главной особенностью является отсутствие зависимостей, за исключением стандартных библиотек Unix, что делает его удобным для установки и использования на различных операционных системах. Инструмент основан на коде проекта PgDBF, который был разработан с целью максимального увеличения скорости и эффективности преобразования данных. Результаты использования данного модуля могут оказать существенное влияние на процессы обработки и анализа данных за счет упрощения перевода информации из формата XBase в формат SQL и внести вклад в область управления и анализа баз данных в системах электронного документооборота.

Visual FoxPro, XBase, Unix, Документооборот, разработка.

Analysis of the usage of Visual Foxpro table conversion module to SQL dump format in document management systems

Vladislav Igorevich Vals, programmer,
Federal Budgetary Educational Institution of Health, the Center
for Hygiene and Epidemiology, Moscow

This scientific article introduces a software module designed for converting XBase format databases, including FoxPro tables with memo files, into SQL dump format. Its main feature is the absence of dependencies, except for standard Unix libraries, making it convenient for installation and use on various operating systems. The tool is based on the code of the PgDBF project, developed to maximize the speed and efficiency of data conversion. The results of using this module can significantly impact data processing and analysis processes by simplifying the translation of information from XBase format to SQL format, contributing to the field of database management and analysis in document management systems.

Visual FoxPro, XBase, Unix, Document Management, Development.

Введение. На данный момент при разработке систем электронного документооборота возникает проблема использования разных типов данных. Например использование баз данных SQL, PostgreSQL и подобных которые являются

более новыми технологиями использование которых повышает эффективность и скорость разработанных систем электронного документооборота.

Таким образом, целью данного проекта стала разработка модуля благодаря которому станет возможным преобразование документов Visual FoxPro в формат который может быть прочитан в базах данных SQL.

При разработке модуля преобразования были поставлены следующие критерии которым должен отвечать проект:

- Простота. Код должен быть понятным для любого, кто хочет его изменить.
- Надежность. Каждый вызов системной функции проверяется на успешное выполнение.
- Скорость. Проект задуман для достижения максимальной скорости конвертации среди доступных решений.
- Полнота. Он полностью поддерживает файлы для заметок FoxPro.
- Переносимость. Модуль работает на 32- и 64-битных системах, а также на архитектурах как little-endian (например, x86), так и big-endian (например, PowerPC).

Скорость преобразования, как правило, ограничивается скоростью чтения жестких дисков. Стрипированный массив быстрых дисков может обеспечить хорошее питание для работы модуля на системе с одним процессором. Одной из проблем являются файлы для заметок, которые могут стать внутренне фрагментированными, поскольку создаются, удаляются и обновляются поля для заметок. Для получения наилучших результатов рассмотрите возможность размещения файлов DBF и FPT на RAM-диске, чтобы избежать задержки при поиске, как это бывает с вращающимися жесткими дисками, или используйте файловую систему, такую как ZFS, которая активно кэширует данные [2].

Один особенно фрагментированный таблица размером 160 МБ с полями для заметок ранее занимала более трех минут на файловой системе FreeBSD UFS2. Перемещение файлов на RAM-диск сократило время конвертации до примерно 1.2 секунд.

Одна из тестовых таблиц, используемых во время разработки, состоит из файла DBF размером 280 МБ и файла для заметок размером 660 МБ. PgDBF преобразует их в таблицу PostgreSQL с более чем 1.3 миллиона строк примерно за 11 секунд, что составляет почти 120,000 строк в секунду.

Результаты.

В программном коде, который написан на C используются стандартные библиотеки C, которые предоставляют функциональность для работы с различными типами данных, вводом-выводом, управлением памятью и строками. Конкретно используются следующие библиотеки:

1. <stdint.h>: набор типов данных с фиксированными размерами (например, int8_t, int16_t, int32_t, int64_t), что позволяет точно определить размер данных в байтах, независимо от платформы.
2. <stdio.h>: Функции для работы с вводом и выводом, такие как printf, fprintf, fopen, fclose, и другие.

3. <stdlib.h>: Функции для работы с динамической памятью и управления программой, такие как malloc, free, и exit.

4. <string.h>: Функции для работы со строками, такие как memchr, strchr, strlen, и другие.

Также в проекте определены несколько макроопределений (define), которые устанавливают значения некоторых констант:

- STATICBUFFERSIZE устанавливает размер статического буфера в байтах, который используется для временного хранения данных.
- DBFBATCHTARGET устанавливает целевой размер пакета, который планируется считывать из DBF-файла за один раз.
- NUMERICMEMOSTYLE и PACKEDMEMOSTYLE – это числовые константы, возможно, используемые в другой части программы для определения стиля хранения данных в мемо-полях.

Ниже представлены исходные структуры использованные в проекте.

```
typedef struct {
    int8_t signature;
    int8_t year;
    int8_t month;
    int8_t day;
    uint32_t recordcount;
    uint16_t headerlength;
    uint16_t recordlength;
    int8_t reserved1[2];
    int8_t incomplete;
    int8_t encrypted;
    int8_t reserved2[4];
    int8_t reserved3[8];
    int8_t mdx;
    int8_t language;
    int8_t reserved4[2];
} DBFHEADER;
```

```
typedef struct
{
    char name[11];
    char type;
    int32_t memaddress;
    uint8_t length;
    uint8_t decimals;
    int16_t flags;
    char workareaid;
    char reserved1[2];
    char setfields;
    char reserved2[7];
    char indexfield;
```

```
} DBFFIELD;

typedef struct
{
    char nextblock[4];
    char reserved1[2];
    char blocksize[2];
    char reserved2[504];
} MEMOHEADER;

typedef struct
{
    char *formatstring;
    int memonumbering;
} PGFIELD;
```

Каждая структура имеет свои поля для хранения различных атрибутов и характеристик данных в соответствующих форматах.

1. DBFHEADER – Описание для заголовка DBF-файла. Этот заголовок содержит информацию о файле, такую как дата создания, количество записей, длина заголовка, длина записи и другие параметры.

2. DBFFIELD – Хранение описания полей в DBF-файле. Каждое поле имеет имя, тип данных, длину, количество десятичных знаков и другие атрибуты, такие как флаги.

3. MEMOHEADER – Описывает заголовок мемо-файла. В DBF-файлах могут храниться длинные текстовые данные, и заголовок мемо-файла содержит информацию о способе хранения и доступа к таким данным.

4. PGFIELD – Формат поля данных в PostgreSQL. Она содержит строку формата (formatstring) и число (memonumbering), вероятно, используемое для учета номеров мемо-записей.

Перечисленные структуры являются ключевыми элементами для обработки данных в DBF-файлах и их преобразования в формат PostgreSQL, поскольку они предоставляют информацию о структуре и типах данных, необходимую для правильной интерпретации и обработки данных в этих файлах.

В модуле предусмотрен обработчик ошибок который реализован с помощью функции «exitwitherror»

```
static void exitwitherror(const char *message, const int systemerror)
{
    if(systemerror) {
        perror(message);
    } else {
        fprintf(stderr, "%s\n", message);
    }
    exit(EXIT_FAILURE);
}
```

Данная функция, определенная как `exitwitherror`, является процедурой, предназначенной для обработки ошибок в программе. Она принимает два параметра: указатель на символьный массив `message` и целое число `systemerror`. Название функции, `exitwitherror`, отражает ее назначение – завершение программы с обработкой ошибки.

Функция `exitwitherror` действует следующим образом:

1. В зависимости от значения параметра `systemerror`, она выполняет различные операции:

- Если `systemerror` равно ненулевому значению, то функция вызывает стандартную библиотечную функцию `regor` для вывода дополнительной информации об ошибке, связанной с системой, на стандартный вывод ошибок (`stderr`).

- В противном случае (если `systemerror` равно нулю), функция использует функцию `fprintf` для вывода сообщения об ошибке, хранящегося в `message`, на стандартный вывод ошибок (`stderr`).

2. После вывода сообщения об ошибке на `stderr`, функция вызывает стандартную функцию `exit` с аргументом `EXIT_FAILURE`. Это приводит к завершению выполнения программы и возврату кода завершения, указывающего на ошибочное завершение программы.

Таким образом, функция `exitwitherror` предназначена для обработки ошибок, связанных с выполнением программы, путем вывода информации об ошибке и завершения программы с указанием, что она завершилась с ошибкой (`EXIT_FAILURE`). Это важный механизм обработки и уведомления ошибках, который обеспечивает корректное завершение программы при возникновении исключительных ситуаций.

```
static void safeprintf(const char *buf, const size_t inputsize)
{
    char    *targetbuf;
    const char *s;
    const char *lastchar;
    char      *t;
    int      realsize = 0;

    if(*buf == '\0') {
        printf("");
        return;
    }

    for(s = buf + inputsize - 1; s >= buf; s--) {
        if(*s != ' ' && *s != '\0') {
            break;
        }
    }
}
```

```
    if(s < buf) {
        printf(" ");
        return;
    }

    lastchar = s;
    realsize = s - buf + 1;
    if(realsize * 2 < STATICBUFFERSIZE) {
        targetbuf = staticbuf;
    } else {
        targetbuf = malloc(realsize * 2 + 1);
        if(targetbuf == NULL) {
            exitwitherror("Unable to malloc the escape output buffer", 1);
        }
    }

    t = targetbuf;
    for(s = buf; s <= lastchar; s++) {
        switch(*s) {
            case '\\':
                *t++ = '\\';
                *t++ = '\\';
                break;
            case '\n':
                *t++ = '\\';
                *t++ = 'n';
                break;
            case '\r':
                *t++ = '\\';
                *t++ = 'r';
                break;
            case '\t':
                *t++ = '\\';
                *t++ = 't';
                break;
            default:
                *t++ = *s;
        }
    }
    *t = '\0';
    printf("%s", targetbuf);

    if(targetbuf != staticbuf) {
        free(targetbuf);
    }
}
```

Функция с наименованием «safeprintbuf» представляет собой процедуру, включенную в программный код, имеющую своей целью безопасное формирование и вывод текстовой строки на стандартный вывод информации. Эта функция разработана с учетом необходимости обработки строк, содержащих специальные символы, включая символы управления, такие как обратный слеш и управляющие последовательности, с целью избежания искажения данных или ошибок при последующей интерпретации. Процедура принимает два входных параметра: указатель на символьный массив, представляющий собой исходную строку (buf), и размер данной строки (inputsize).

Основное действие функции safeprintbuf включает следующие этапы:

1. Проверка строки на наличие пустых символов: Если начальный символ исходной строки buf является нуль-терминатором (пустой строкой), функция немедленно выводит двойные одинарные кавычки (") и завершает выполнение.

2. Удаление конечных пробелов и нуль-терминаторов: Функция производит обход строки, начиная с ее конца, с целью выявления последнего непробельного символа и установки указателя lastchar на этот символ. Это позволяет избежать вывода избыточных пробелов.

3. Проверка строки на пустоту после удаления пробелов: Если указатель lastchar оказывается меньше, чем начало строки buf, это свидетельствует о том, что исходная строка была пустой или состояла только из пробелов. В таком случае функция также выводит двойные одинарные кавычки (") и завершает выполнение.

4. Выделение буфера для «очищенной» строки: Функция определяет длину «очищенной» строки и проверяет, может ли она быть размещена в статическом буфере с фиксированным размером (STATICBUFFERSIZE). Если длина «очищенной» строки оказывается меньше или равной половине размера STATICBUFFERSIZE, функция просто настраивает указатель targetbuf на статический буфер staticbuf.

5. Выделение динамической памяти (по необходимости): Если размер «очищенной» строки оказывается больше половины размера STATICBUFFERSIZE, функция выделяет дополнительную динамическую память и настраивает указатель targetbuf на эту дополнительно выделенную область. Если операция выделения памяти завершается неудачей, функция вызывает другую функцию exitwitherror с информацией об ошибке и завершает выполнение программы.

6. Копирование и экранирование символов: Функция копирует символы из исходной строки buf в «очищенную» строку targetbuf, при этом выполняя экранирование специальных символов. Конкретно, символы '\' (обратный слеш), '\n' (перевод строки), '\r' (возврат каретки) и '\t' (горизонтальная табуляция) заменяются на соответствующие управляющие последовательности.

7. Завершение строки и вывод: Функция завершает «очищенную» строку в буфере targetbuf нуль-терминатором и выводит результат, заключая его в одинарные кавычки ("), на стандартный вывод информации.

8. Освобождение динамической памяти (по необходимости): Если для «очищенной» строки была выделена динамическая память, функция освобождает

эту память после ее использования.

```
static int64_t nativeint64_t(const int64_t rightend)
{
    return rightend;
}

static int64_t swappedint64_t(const int64_t wrongend)
{
    return (int64_t) (((wrongend & 0xff00000000000000LL) >> 56) |
        ((wrongend & 0x00ff000000000000LL) >> 40) |
        ((wrongend & 0x0000ff0000000000LL) >> 24) |
        ((wrongend & 0x000000ff00000000LL) >> 8) |
        ((wrongend & 0x00000000ff000000LL) << 8) |
        ((wrongend & 0x0000000000ff0000LL) << 24) |
        ((wrongend & 0x000000000000ff00LL) << 40) |
        ((wrongend & 0x00000000000000ffLL) << 56));
}

static int32_t nativeint32_t(const int32_t rightend)
{
    return rightend;
}
```

Данный фрагмент кода включает в себя три функции, предназначенные для преобразования целочисленных значений между различными порядками байтов (endianness).

1. static int64_t nativeint64_t(const int64_t rightend)

Функция nativeint64_t выполняет преобразование 64-битного целочисленного значения из его нативного (натурального) порядка байтов в тот же самый порядок байтов. Нативный порядок байтов соответствует порядку байтов, используемому на данной архитектуре компьютера.

2. static int64_t swappedint64_t(const int64_t wrongend)

Функция swappedint64_t представляет собой процедуру для преобразования 64-битного целочисленного значения из одного порядка байтов в другой. Она выполняет байт-своп (инверсию порядка байтов) входного значения, переводя его из «неправильного» порядка байтов в «правильный» порядок байтов. Внутренние вычисления в этой функции основаны на битовых операциях для манипуляции байтами и их порядком.

3. static int32_t nativeint32_t(const int32_t rightend)

Функция nativeint32_t служит для преобразования 32-битного целочисленного значения из его нативного порядка байтов в тот же порядок байтов. Она аналогична nativeint64_t, но применяется к 32-битным значениям.

Эти функции имеют важное значение в области манипуляции данными, особенно при пересылке данных между системами с разными форматами хране-

ния чисел. Они позволяют обеспечить правильное представление данных в том порядке байтов, который соответствует требуемым стандартам или архитектуре.

```
static int32_t swappedint32_t(const int32_t wrongend)
{
    return (int32_t) (((wrongend & 0xff000000) >> 24) |
        ((wrongend & 0x00ff0000) >> 8) |
        ((wrongend & 0x0000ff00) << 8) |
        ((wrongend & 0x000000ff) << 24));
}
```

```
static int16_t nativeint16_t(const int16_t rightend)
{
    return rightend;
}
```

```
static int16_t swappedint16_t(const int16_t wrongend)
{
    return (int16_t) (((wrongend & 0xff00) >> 8) |
        ((wrongend & 0x00ff) << 8));
}
```

```
static int64_t snativeint64_t(const char *buf)
{
    int64_t output;
    memcpy(&output, buf, 8);
    return output;
}
```

```
static int64_t sswappedint64_t(const char *buf)
{
    int64_t output;
    memcpy(&output, buf, 8);
    return swappedint64_t(output);
}
```

```
static int32_t snativeint32_t(const char *buf)
{
    int32_t output;
    memcpy(&output, buf, 4);
    return output;
}
```

```
static int32_t sswappedint32_t(const char *buf)
{

```

```
int32_t output;
memcpy(&output, buf, 4);
return swappedint32_t(output);
}

static int16_t snativeint16_t(const char *buf)
{
    int16_t output;
    memcpy(&output, buf, 2);
    return output;
}

static int16_t sswappedint16_t(const char *buf)
{
    int16_t output;
    memcpy(&output, buf, 2);
    return swappedint16_t(output);
}

static double sdouble(const char *buf)
{
    union
    {
        int64_t asint64;
        double asdouble;
    } inttodouble;

    inttodouble.asint64 = slittleint64_t(buf);
    return inttodouble.asdouble;
}
```

Данный фрагмент кода содержит функции, предназначенные для преобразования целочисленных и числовых значений между разными порядками байтов (endianness). Логика была заимствована из проекта с открытым исходным кодом PGDBF [1]. Логика функций:

1. static int32_t swappedint32_t(const int32_t wrongend)

Функция swappedint32_t выполняет преобразование 32-битного целочисленного значения из одного порядка байтов в другой. Она переставляет байты входного значения таким образом, чтобы байты, находившиеся в старших разрядах, перемещались в младшие разряды, и наоборот. Внутренние вычисления в этой функции используют битовые маски и сдвиги для манипуляции байтами и их порядком.

2. static int16_t nativeint16_t(const int16_t rightend)

Функция nativeint16_t выполняет преобразование 16-битного целочисленного значения из его нативного порядка байтов в тот же порядок байтов. На-

тивный порядок байтов соответствует порядку байтов, используемому на данной архитектуре компьютера. Функция возвращает входное значение без изменений.

3. `static int16_t swappedint16_t(const int16_t wrongend)`

Функция `swappedint16_t` выполняет преобразование 16-битного целочисленного значения из одного порядка байтов в другой. Она применяет байт-своп (инверсию порядка байтов) к входному значению, переводя его из «неправильного» порядка байтов в «правильный» порядок байтов. Внутренние вычисления также используют битовые маски и сдвиги для перестановки байтов.

4. `static int64_t snativeint64_t(const char *buf)`

Функция `snativeint64_t` преобразует 64-битное целочисленное значение из массива символов `buf` в его нативный порядок байтов. Функция копирует первые 8 байт из массива символов в целочисленное значение и возвращает его.

5. `static int64_t sswappedint64_t(const char *buf)`

Функция `sswappedint64_t` преобразует 64-битное целочисленное значение из массива символов `buf` из «неправильного» порядка байтов в «правильный». Она использует `swappedint64_t` для выполнения байт-свопа и затем возвращает результат.

6. `static int32_t snativeint32_t(const char *buf)`

Функция `snativeint32_t` преобразует 32-битное целочисленное значение из массива символов `buf` в его нативный порядок байтов. Функция копирует первые 4 байта из массива символов в целочисленное значение и возвращает его.

7. `static int32_t sswappedint32_t(const char *buf)`

Функция `sswappedint32_t` выполняет преобразование 32-битного целочисленного значения из массива символов `buf` из «неправильного» порядка байтов в «правильный». Она использует `swappedint32_t` для выполнения байт-свопа и затем возвращает результат.

8. `static double sdouble(const char *buf)`

Функция `sdouble` преобразует 64-битное числовое значение с плавающей точкой (`double`) из массива символов `buf` из «неправильного» порядка байтов в «правильный». Она использует `slittleint64_t` для преобразования значения, а затем интерпретирует его как число с плавающей точкой. В итоге функция возвращает результат в виде числа с плавающей точкой.

Эти функции играют важную роль при работе с данными, которые требуют корректной интерпретации порядка байтов, и обеспечивают правильное представление данных в требуемом порядке байтов.

Выводы. Таким образом, использование данного модуля имеет ряд преимуществ при разработке систем электронного документооборота с использованием Visual Foxpro.

Модуль имеет интеграцию с различными форматами данных. Данный модуль может быть интегрирован в системы электронного документооборота для обеспечения корректного чтения и записи данных в различных форматах байтового порядка. Это особенно важно при обмене данными между системами, работающими на разных архитектурах.

Преобразование данных. В системах электронного документооборота часто используются данные с различным порядком байтов. Этот код позволяет

системе корректно преобразовывать данные в нужный формат, что гарантирует согласованность данных при обмене между системами.

Обеспечение совместимости. Использование данного кода в системах EDI обеспечивает совместимость и надежность обмена данными между различными организациями и системами, даже если в них используется различный порядок байтов.

Поддержка стандартов. Данный код может быть интегрирован для обеспечения соблюдения стандартов обмена данными в EDI-системах, где правильный порядок байтов может быть обязательным.

В заключение следует отметить, что использование данного кода в системах EDI гарантирует надежность и совместимость обмена данными, особенно в тех случаях, когда данные могут иметь различный порядок следования байтов.

Литература

1. Конвертер типов данных из FoxPro в формат PostgreSQL [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/kstrauser/pgdbf> (Дата обращения: 9.10.2023).
2. This article introduces the C programming language [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://chenweixiang.github.io/2016/07/08/c.html> (Дата обращения: 9.10.2023).

УДК 004.414.2

Анализ методологий и инструментов непрерывной интеграции и поставки для повышения эффективности сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем удалённого доступа

Артем Андреевич Лукьянов, инженер направления
инфраструктурных решений, ООО «Ред Софт», г. Москва

В работе проводится анализ методологий и инструментов непрерывной интеграции и непрерывной поставки для повышения эффективности и автоматизации процессов для создания UNIX-подобного дистрибутива встраиваемых систем. Такой подход даёт возможность автоматизировать все этапы сборки загрузочной среды, проводить необходимое тестирование каждого компонента и наглядно предоставлять результирующую информацию. Полученные результаты позволяют оценить эффективность и потенциал данного подхода при разработке программного обеспечения в современном мире.

Непрерывная интеграция, непрерывная поставка, инструменты автоматизации, сборка дистрибутива.

Analysis of methodologies and tools for continuous integration and continuous delivery to improve the efficiency of building a Linux boot environment for embedded remote access systems

Artem Andreevich Lukyanov, Engineer of Infrastructure solutions,
Red Soft LLC, Moscow

The paper analyzes methodologies and tools for continuous integration and continuous delivery to improve the efficiency and automation of processes for creating a UNIX-like distribution of embedded systems. This approach makes it possible to automate all stages of the boot environment assembly, conduct the necessary testing of each component and visually provide the resulting information. The results obtained allow us to evaluate the effectiveness and potential of this approach in software development in the modern world.

Continuous integration, continuous delivery, automation tools, distribution kit assembly.

Введение

В современном мире информационных технологий и разработки программного обеспечения процессы автоматизации и ускорения развертывания приложений стали ключевыми для организаций, стремящихся оставаться конкурентоспособными. Одной из наиболее значимых практик в этой области является непрерывная интеграция и непрерывная доставка (далее по тексту – CI/CD).

CI/CD представляет собой методологию и набор практик, направленных на автоматизацию и улучшение процесса разработки и развертывания программного обеспечения. В современном мире CI/CD становится неотъемлемой частью цифровой трансформации организаций, обеспечивая им гибкость, скорость и надежность в поставке программных продуктов [2, С. 54].

Суть CI/CD заключается в том, что код разработчиков автоматически интегрируется и проверяется на предмет ошибок (непрерывная интеграция), а затем автоматически развертывается на целевой сервер (непрерывная доставка). Это позволяет командам разработчиков оперативно реагировать на ошибки при сборке, быстро вносить изменения, обеспечивать высокое качество кода и моментально доставлять новую функциональность.

Непрерывная доставка начинается там, где заканчивается непрерывная интеграция. Она автоматизирует развертывание приложений в различные окружения: большинство разработчиков работают как с live/production окружением, так и со средами разработки и тестирования [2, С. 55].

В современном мире CI/CD стало не просто практикой разработчиков, но и стратегической составляющей бизнес-процессов. Организации, применяющие CI/CD, способны быстро реагировать на изменения рынка и потребностей клиентов, а также минимизировать риски, связанные с внесением изменений в производственные среды. Это позволяет им сохранять конкурентное преимущество и обеспечивать непрерывное улучшение своих продуктов и услуг.

Теоретические исследования

Рассмотрим методологию CI/CD более детально (рис. 1).

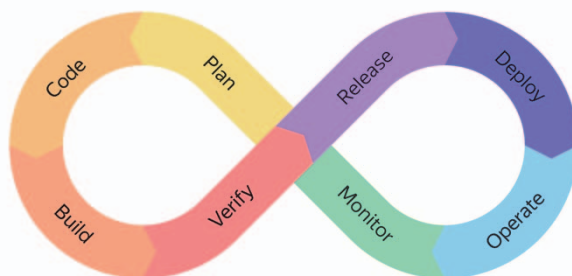


Рисунок 1 – Концепция CI/CD

Фактически, с точки зрения создания сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем, это означает последовательность шагов (конвейер), которые способствуют увеличению скорости внедрения изменений, сохраняя или даже улучшая качество кода, а следовательно, всего итогового образа дистрибутива в целом (рис. 2).

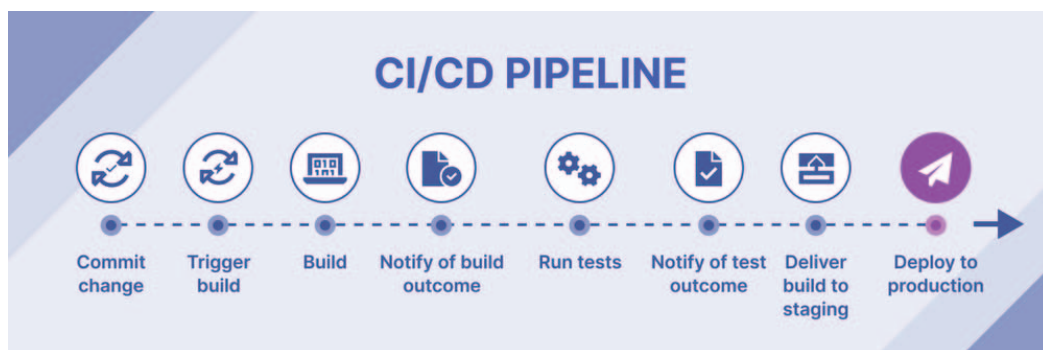


Рисунок 2 – Конвейер CI/CD

Данный подход предполагает, что процесс разработки можно абстрактно разделить на семь этапов [1, С. 124].

Этап 1. Непрерывная интеграция (Continuous Integration, CI). На этом этапе регулярно интегрируется код в общий или частный репозиторий. При каждой интеграции автоматически запускаются тесты, чтобы обнаружить и устранить возможные ошибки как можно раньше.

Этап 2. Автоматическая сборка (Automated Build). После успешной интеграции кода происходит автоматическая компиляция и сборка загрузочной среды. Это создает готовый образ системы с исполняемыми файлами и ресурсами, которые готовы к развертыванию.

Этап 3. Непрерывное тестирование (Continuous Testing). На этом этапе проводится автоматическое тестирование готового образа системы в виртуальной среде, включая модульные, функциональные, и интеграционные тесты. Цель – убедиться в том, что изменения не нарушают работоспособность системы и программного обеспечения внутри.

Этап 4. Непрерывное развертывание (Continuous Deployment). Если тестирование прошло успешно, изменения автоматически развертываются на тестовый физический стенд. Это позволяет быстро и безопасно доставлять новую версию дистрибутива.

Этап 5. Непрерывная доставка (Continuous Delivery). На этом этапе изменения готовы для доставки, но развертывание в боевую (рабочую) среду выполняется вручную. Это предоставляет возможность принять окончательное решение о том, когда выпустить новую версию загрузочной среды.

Этап 6. Мониторинг и обратная связь (Monitoring and Feedback). После развертывания важно отслеживать работу всей системы в реальном времени. Мониторинг позволяет выявить проблемы и собрать обратную связь.

Этап 7. Непрерывное улучшение (Continuous Improvement). Этот этап заключается в анализе данных из мониторинга и обратной связи, а также внесении соответствующих улучшений в процесс разработки и доставки. Цель – постоянно совершенствовать процесс и итоговый продукт [1, С. 126].

Совокупность этих семи этапов позволяет ускорить цикл сборки программного обеспечения, повысить его качество и надежность, а также быстро реагировать на изменения и потребности.

В статье [3] была рассмотрена методология PDCA, также известная как цикл Деминга-Шухарта, которая представляет собой алгоритм действий по управлению процессом и достижению его целей. Рассмотрим данную методологию с методологией CI/CD с точки зрения разработки программного обеспечения и найдем общие точки соприкосновения или различия.

Общие черты:

1. Улучшение процессов: PDCA и CI/CD нацелены на непрерывное улучшение. Они оба предполагают постоянный цикл оценки и оптимизации, чтобы достичь лучших результатов.

2. Цикличность: Обе модели ориентированы на цикличность и повторяемость. В PDCA это цикл планирования, выполнения, проверки и действия. В CI/CD это цикл интеграции, развертывания, тестирования и непрерывной доставки.

3. Ориентированность на качество: PDCA и CI/CD стремятся к повышению качества продукции или процессов. PDCA делает это через анализ данных и корректировку плана, а CI/CD – через автоматизацию тестирования и развертывания для обеспечения стабильности и надежности продукта.

Различия:

1. Область применения: PDCA широко используется в управлении качеством и процессами, не ограничиваясь только областью разработки ПО. CI/CD, с другой стороны, является специфической методологией разработки и доставки программного обеспечения.

2. Сфера ответственности: PDCA может быть применено на разных уровнях организации и в разных функциональных областях, в то время как CI/CD, как правило, применяется командами разработки и DevOps для улучшения процессов разработки и доставки ПО.

3. Автоматизация: CI/CD сильно ориентирована на автоматизацию процессов, включая автоматическое тестирование, интеграцию и развертывание. PDCA, хотя и может включать автоматизацию, более ориентировано на анализ данных и принятие решений на основе этого анализа.

4. Частота циклов: PDCA может иметь менее частые циклы в зависимости от области применения и целей, в то время как CI/CD стремится к максимальной автоматизации и частоте циклов с целью быстрой итеративной разработки и доставки ПО.

Таким образом, обе методологии представляют собой разные модели, но они могут дополнять друг друга, особенно в контексте разработки программного обеспечения, сборки и тестирования дистрибутива для встраиваемых систем, где CI/CD может быть использована для автоматизации и ускорения цикла разработки, а PDCA – для общего улучшения процессов управления проектом и качеством продукта.

Экспериментальное исследование методологий CI/CD в дополнении с PDCA для создания дистрибутива Linux для встраиваемых систем

Для исследования методологий по автоматизации разработки дистрибутива для встраиваемых систем были проведены необходимые экспериментальные исследования. Для этого был собран тестовый стенд, обладающий характе-

ристикami, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики тестового стенда

Характеристика	Описание	
	Сборочная среда	Встраиваемая система
Процессор	Intel Core i7-2620M CPU @ 2.70Ghz	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
ОЗУ	16Gb	2Gb
ПЗУ	SSD 128Gb	microSD 8Gb
Операционная система	РЕД ОС 7.3	-

Первый шаг для перехода на полностью автоматизированный режим согласно методологии CI/CD - подготовка, установка или использование облачного инструмента для обеспечения всего жизненного цикла процесса [4, С. 766]. Из большого количества вариантов, была выбрана система GitLab CI/CD, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с одним из главных конкурентов – Jenkins. GitLab CI/CD позволяет выполнять параллельное тестирование различных веток кода. Результаты испытаний удобно анализировать в интерфейсе системы. Сравнение двух инструментов можно увидеть в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение популярных инструментов для обеспечения жизненного цикла проекта

Характеристика	GitLab CI/CD	Jenkins
Открытый или закрытый код	Открытый	Открытый
Установка	Не требуется. Встроенная возможность платформы	Требуется
Уникальные особенности	Глубокая интеграция в систему управления версиями	Поддержка плагинов
Поддержка	Имеется	Отсутствует
Самостоятельное развёртывание системы	Поддерживается	Единственный вариант использования системы
Создание CI/CD-конвейеров	Поддерживается	Поддерживается
Мониторинг производительности приложений	Имеется	Отсутствует

Характеристика	GitLab CI/CD	Jenkins
Экосистема	Система развивается в рамках всего проекта GitLab	Существует более 1000 плагинов
API	Предлагает API для более глубокой интеграции в проекты	Поддерживает развитую систему API
Интеграция с другими инструментами	Множество средств для интеграции со сторонними системами, в частности с GitHub и Kubernetes	Поддерживается интеграция с другими инструментами и платформами
Контроль качества кода	Поддерживается	Поддерживается с помощью плагинов

Следующим шагом, является использование специального агента (runner), использующего вычислительные ресурсы стенда для запуска заданий CI/CD и отправки результатов обратно в GitLab CI/CD. Таким агентом может выступать как сам GitLab CI/CD предоставляя свои распределённые Shared runners (облачное решение на стороне GitLab CI/CD), так и Specific runners, которые устанавливаются непосредственно на личное оборудование или приватное облако [4, С. 768]. Установка агента на свой стенд, в рамках исследования, целесообразнее по причинам высокой производительности вычислительной среды, неограниченном запуске приватных проектов, и отсутствием дополнительных, в том числе денежных затрат, на Shared runners у GitLab CI/CD.

GitLab CI/CD предоставляет несколько вариантов установки личного агента:

- с использованием в контейнерах (Docker)
- загрузкой исполняемого файла для различных процессорных архитектур
- используя личный репозиторий для популярных дистрибутивов Linux

Наиболее масштабируемым, промышленным вариантом является использование runner в контейнере Docker. Несомненным плюсом данного решения является изолированная от основной операционной системы специально подготовленная среда [5, С. 316]. Но в рамках исследования достаточно будет воспользоваться вариантом агента из репозитория.

Для установки агента из репозитория выполним следующие команды на тестовом стенде:

```
$ su -
# dnf update -y
# curl -O "https://packages.gitlab.com/install/repositories/runner/gitlab-runner/script.rpm.sh"
```

```
# chmod +x script.rmp.sh && os=el dist=7 ./script.rmp.sh  
# dnf install gitlab-runner -y
```

Далее необходимо создать пустой проект с двумя ветками разработки – *main* (ветка рабочего релиза) и *dev* (ветка для разработки) в GitLab CI/CD и через следующие команды инициализировать его:

```
$ git clone git@gitlab.com:project_url/project.git  
$ cd project  
$ git switch --create main && git switch --create dev
```

Для создания и подключения агента на стенд, в созданном проекте GitLab CI/CD перейти в меню Settings – CI/CD – Runners [6]. Указать произвольную метку (tag) и после получить уникальный токен. Для регистрации агента на стенде выполнить следующую команду:

```
$ gitlab-runner register --url https://gitlab.com --token project_token
```

Проверить доступность агента по метке можно на той же странице, CI/CD – Runners.

Для формирования инструкции для автоматической сборки и тестирования встраиваемой системы создадим файл *.gitlab-ci.yml* со следующим содержанием [7].

```
.gitlab-ci.yml

stages:
  - build
  - test
build:
  stage: build
  tags:
    - project_runner
  rules:
    - if: '$CI_COMMIT_REF_NAME == "main"'
      variables:
        BUILD: "prod"
      when: always
    - if: '$CI_COMMIT_REF_NAME == "dev"'
      variables:
        BUILD: "dev"
      when: always
  script:
    - git clone -b 2023.02.5
git://git.buildroot.net/buildroot.git && cd buildroot
    - make raspberrypi4_64_defconfig
    - make -j$(nproc)
  artifacts:
    paths:
      - ./buildroot/build.log
      - ./buildroot/output/images/
test:
  stage: test
  tags:
    - project_runner
  rules:
    - if: '$CI_COMMIT_REF_NAME == "main"'
      variables:
        TEST: "prod"
      when: always
    - if: '$CI_COMMIT_REF_NAME == "dev"'
      variables:
        TEST: "dev"
      when: always
  needs:
    - job: build
      artifacts: true
  script:
    - ./buildroot/support/testing/run-tests -o test-output/ -
d test-dl/ -k --timeout-multiplier 10
  artifacts:
    paths:
      - ./buildroot/test-output/*.log
      - ./buildroot/test-output/*/images/*
```

Для запуска сборки в ветке разработки *dev* необходимо добавить файл в наш проект. Сделать это можно через веб-интерфейс GitLab CI/CD или через следующие команды:

```
$ git add .
$ git commit -m "add .gitlab-ci.yml"
$ git push -u origin dev
```

За процессом выполнения заданий можно наблюдать в меню Build – Jobs (рис. 3).

По окончании успешной/не успешной сборки и проведения тестирования при условии, что дистрибутив собрался в процессе подзадачи *build*, через веб-интерфейс получаем следующие результаты:

- журналы компиляции
- образ собранной встраиваемой системы
- журналы результатов проведенных тестов

В итоге данный подход позволяет прозрачно подходить к работе над программным обеспечением. Что позволяет всей команде разработчиков отслеживать процессы, просматривать необходимые журналы, вносить изменения в проект, заново запускать сборку и тестирования оправдывая методологии CI/CD и PDCA получая новый и надежный продукт.

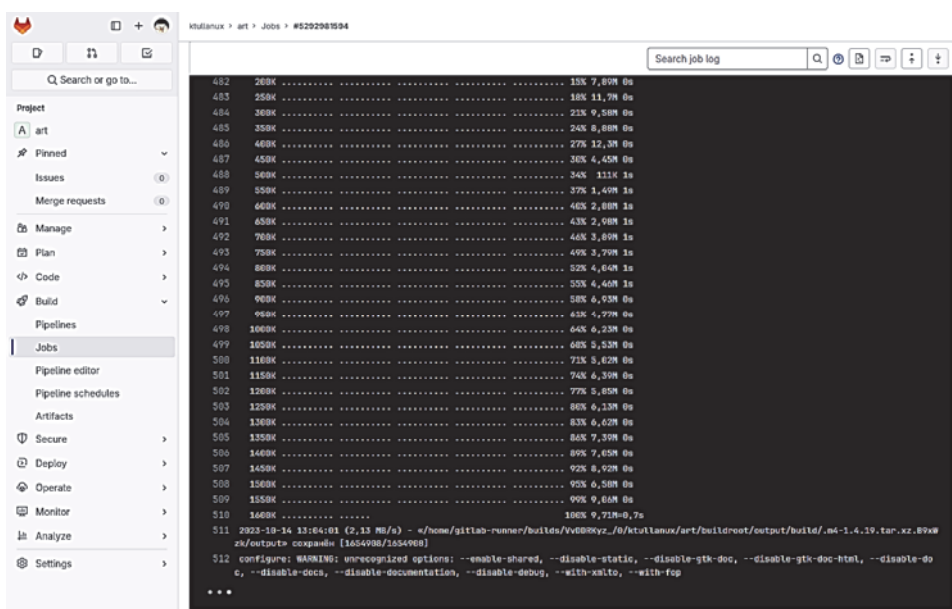


Рисунок 3 – Выполнение задания в GitLab CI/CD

Выводы

Внедрение методологий CI/CD в дополнении с PDCA в процесс сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем является важным шагом в по-

вышении эффективности всей работы над продуктом в целом. Этот подход позволяет автоматизировать и ускорить процесс интеграции, тестирования и доставки обновлений в загрузочную среду (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты анализа методологий для повышения эффективности сборки загрузочной среды

Характеристика	Методология	
	Buildroot (PDCA без CI/CD)	Buildroot (PDCA с CI/CD)
Время, затраченное на подготовку к сборке (включает настройку среды разработки и установку пакетов)	~1 час	~45 минут
Время, затраченное на сборку дистрибутива	~2 часа 30 минут	~2 часа 30 минут
Время, затраченное на тестирование полученного образа	~35 минут	~20 минут
Время, затраченное на исправление ошибок, создание отчёта и запуска пере-сборки проекта	~1 час	~20 минут
Скорость интеграции образа системы на встраиваемую платформу и проведение запуска	15 минут	5 минут

В результате можно значительно сократить время всего процесса разработки, снизить риски и обеспечить более стабильные и надежные выпуски дистрибутива для встраиваемых систем.

Литература

1. Брикман Е. Terraform. Инфраструктура на уровне кода 2-е издание. 2020. 368 с.
2. Джин К., Дебуа П., Уиллис Д., Хамбл Д. Руководство по DevOps. Как добиться гибкости, надежности и безопасности мирового уровня в технологических компаниях. 2018. 512 с.
3. Лукьянов А.А. Анализ методологий сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем удалённого доступа в условиях импортозамещения // Информационно-технологический вестник. 2023. № 3(37). С. 3-13.
4. Негус К. Библия Linux 10 изд. 2022. 928 с.

5. Freeman J., Keating J. Mastering Ansible – Third Edition. Effectively automate configuration management and deployment challenges with Ansible 2.7. 2019. 412 с.
6. Документация к GitLab [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.gitlab.com> (дата обращения: 10.10.2023).
7. Документация к Buildroot [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://buildroot.org/downloads/manual/manual.html> (дата обращения: 10.10.2023).

УДК 629.7.017.1

**Непараметрическая и моделируемая надежность
космических летательных аппаратов**

Григорий Алексеевич Филяев, аспирант третьего года обучения
кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Стефан Тривунович Релич, аспирант третьего года обучения
кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В этой статье расширяется статистический анализ надежности спутников, исследуется надежность подсистем космических летательных аппаратов. Также проводятся параметрические соответствия с распределениями Вейбулла с использованием подхода оценки максимального правдоподобия.

Надежность, распределение Вейбулла, сбои, аномалии, оценка максимального правдоподобия, спутники, космические аппараты.

Nonparametric and simulated reliability of spacecraft

Grigory Alekseevich Filyaev, third-year postgraduate student of the Department of
Information Technologies and Control Systems,
Stefan Trivunovich Relich, third-year postgraduate student of the Department of In-
formation Technologies and Control Systems,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

This article expands the statistical analysis of the reliability of satellites, examines the reliability of subsystems of spacecraft. Parametric correspondences with Weibull distributions are also carried out using the maximum likelihood estimation approach.

Reliability, Weibull distribution, failures, anomalies, maximum likelihood estimation, satellites, spacecraft.

Надежность – одно из главных качеств космических систем при проектировании космических летательных аппаратов. К сожалению, несмотря на признание важности надежности, в технической литературе отсутствуют подробные данные о сбоях на орбите и статистическом анализе надежности спутников. В итоге, в литературе отсутствует эмпирическая основа для решения таких вопросов, как, например, проблемы, возникающие на ранних этапах эксплуатации

спутников.

Хотя предыдущие исследования неоднозначны в определении области применимости, важный вопрос относительно поведения частоты аварий у летательных аппаратов вызывает явное расхождение мнений. Тем не менее, исследователи, занимающиеся надежностью космических аппаратов, сходятся во мнении о том, что экспоненциальное распределение для времени существования не совпадает с данными, полученными из практического опыта полетов, и выводят, что прогнозы надежности с постоянной частотой аварий являются нереалистичными [1, С. 8].

Основная часть

Для решения данной проблемы связанной с надежностью и выходом из строя космических спутников на начальных стадиях их эксплуатации, а также с целью заполнить имеющийся пробел в технической литературе по этому вопросу, нами была собрана информация о выходе из строя 1584 аппаратов, успешно запущенных на низкую околоземную орбиту с января 1990 года по октябрь 2020 года. После этого мы провели непараметрический анализ надежности и обнаружили, что поведение спутников при выходе из строя на орбите можно адекватно описать распределением Вейбулла с коэффициентом формы меньше единицы. Напомним, что функция плотности вероятности Вейбулла может быть выражена как:

$$f(t; \beta, \theta) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \right], \text{ где } t \geq 0 \quad (1)$$

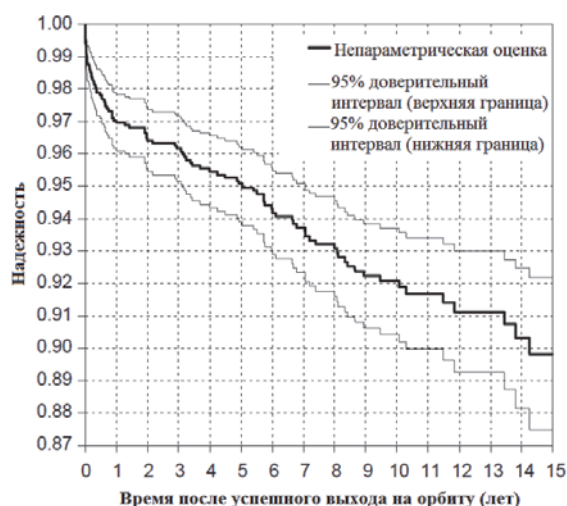
где β – параметр формы и θ – параметр масштаба, оба неотрицательные. Связанной функцией надежности Вейбулла является:

$$R(t; \beta, \theta) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

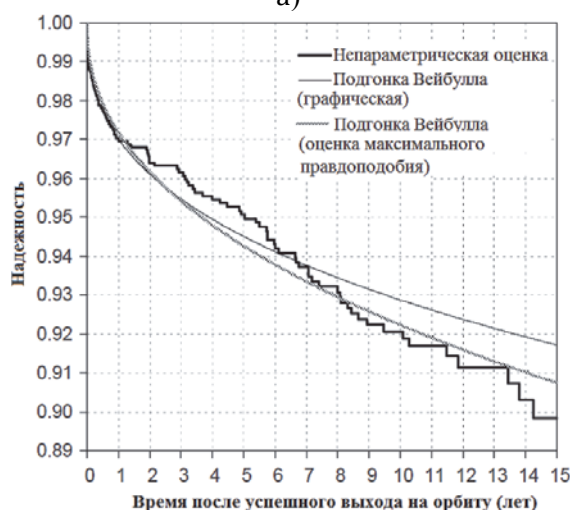
На Рисунке 1а показаны результаты вычислений, отображающие непараметрическую надежность космического аппарата с 95-процентными доверительными интервалами. Рисунок 1б, в свою очередь, иллюстрирует распределение Вейбулла, являющееся эмпирическим представлением непараметрической надежности и полученное при помощи двух различных методов.

– графический метод: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta = 0,3875$, а параметр масштаба $\theta = 8316$ лет;

– процедура оценки максимального правдоподобия: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta = 0,4521$, а его параметр масштаба $\theta = 2607$ лет.



а)



б)

Рисунок 1 – Надежность спутника с 95% доверительными интервалами (а) и непараметрическая надежность спутника и подгонка Вейбулла (б)

В данной работе мы расширяем статистический анализ надежности спутников, анализируем надежность данных подсистем, а именно: проводим анализ от системного уровня до отказов на уровне подсистем. Целью нашей работы является внесение дополнительного вклада в полное выявление механизмов отказа космических аппаратов. Помимо надежности подсистем, мы также проводим сравнительный анализ отказов подсистем и определяем влияние каждой подсистемы на отказ данных летательных аппаратов. При этом мы выявляем «подсистемы-виновники», которые управляют ненадежностью спутников. Результаты и итоги, показанные в данной работе, будут полезны для применения в космической промышленности, например, в процессе пересмотра программ испытаний

либо обеспечения эмпирической основы с целью распределения избыточности подсистем, а также планов улучшения повышения надежности и для разработки новых подсистем для новых космических аппаратов.

Описание базы данных. В данной работе используется база данных Space-Track [2].

В указанной базе данных распознается несколько спутниковых подсистем. В данной работе используются следующие 11 подсистем:

1. Гироскоп / солнечный датчик.
2. Двигатель / Топливная система двигателя.
3. Функционирования антенны.
4. Центральная вычислительная машина.
5. Механизмы.
6. Полезная нагрузка.
7. Аккумуляторная батарея.
8. Распределения электроэнергии.
9. Развертывание солнечных батарей.
10. Работа солнечной батареи.
11. Телеметрии, слежения и управления.

Так, например, привод солнечной батареи, если его выход из строя приводит к тому что, происходит неразвертывание солнечных батарей, согласно предыдущему списку, данный случай будет отнесен к подсистеме № 9.

Если невозможно определить конкретную подсистему, которая вызвала отказ спутника, то в базе данных отказов космических аппаратов он классифицируется как «неизвестный».

Проведя статистический анализ «коллективного» поведения недавно запущенных аппаратов, мы пришли к выводу, что ни один из них не является идентичным, и каждый работает в своей уникальной среде.

Вследствие этого, возникает сложность в выборе между вычислением точной «средней» надежности или получением неопределенной «специфической» надежности данных аппаратов в связи с отсутствием «массового производства».

В данной статье мы проведем анализ поведения спутников и подсистем околоземной орбиты с учетом их «коллективных» отказов. Кроме того, мы рассматриваем второй подход, предлагаем анализ надежности космических аппаратов на основе типа полета, орбиты и массовых категорий (также будут представлены данные по конкретным космическим платформам и их производителю). Однако, независимо от выбранной выборки, представленный в данном документе статистический подход и анализ остаются достоверными.

Для проведения непараметрического анализа надежности собранных данных по всем подсистемам спутников, которые были ранее идентифицированы, была использована таблица 1.

Для достижения целей этой работы мы использовали оценку максимального правдоподобия для вычисления параметров распределений Вейбулла.

Оценка максимального правдоподобия. Оценка максимального правдоподобия учитывает все ограничения вероятностных графиков и обеспечивает

более точные параметрические соответствия, чем графическая оценка. Хотя метод оценки максимального правдоподобия аналитически задействован и требует определения правильной формулировки функции (известной как функция правдоподобия) в зависимости от нескольких параметров (например, тип цензуры, выбранное параметрическое распределение), то поиск оптимума этой функции, который может оказаться аналитически утомительным для вычисления набора частных производных логарифма функции правдоподобия и/или численно интенсивным с помощью нелинейных методов оптимизации.

Ниже приводится краткий обзор этого метода.

Концептуально оценка максимального правдоподобия основывается на следующем: учитывая набор наблюдаемых данных, и предполагая параметрическое распределение жизни с неизвестными параметрами (например, двумя параметрами для распределения Вейбулла), функция правдоподобия определяется как вероятность получения или генерации наблюдаемых данных из выбранного параметрического распределения. Когда проводится исчерпывающий поиск по неизвестным параметрам распределения, значения этих параметров, которые максимизируют функцию правдоподобия, называются оценками максимального правдоподобия, и способы известны как оценка максимального правдоподобия. Аналитическая деривация оценки максимального правдоподобия представлена далее.

Получение оценок максимального правдоподобия. Предположим, что потенциально наблюдаемые данные в исследовании распределены согласно распределению вероятностей, определенному вектором параметров Θ . Затем, вызывая Data фактически наблюдаемых данных, функция правдоподобия для Θ на основе этих данных будет выглядеть следующим образом:

$$L(\Theta) = Pr(Data; \Theta) \quad (3),$$

где Pr представляет плотность вероятности или функцию массы, из которой предположительно возникают наблюдаемые данные. Когда функция плотности вероятности имеет параметрическую форму $f(t; \Theta)$, и наблюдаются независимые и одинаково распределенные времена жизни $t_1, \dots, t_n$ для случайной выборки n , выражение (3) может быть переписано как:

$$L(\Theta) = \prod_{t=1}^n f(t_i; \Theta) \quad (4)$$

Эта функция может быть максимизирована для получения оценки $\hat{\Theta}$ и оценки функции надежности $R(t; \hat{\Theta})$ в соответствии с распределением вероятностей.

Трудность возникает, когда данные подвергаются цензуре: выражение (4) больше не может использоваться и необходима вероятностная модель для механизма цензуры. Как и прежде, давайте рассмотрим n лиц, имеющих следующие времена жизни $t_1, \dots, t_n$. Введем переменную δ_i , учитывающую цензуру в дан-

ных: если t_i – наблюдаемое время жизни, $\delta_i = 1$; если t_i – время цензуры, $\delta_i = 0$. Для большинства механизмов цензуры и для типа цензуры, с которым я сталкиваюсь в данном исследовании, функция правдоподобия в непрерывном случае может быть написана, когда все времена жизни и времена цензуры независимы как:

$$L(\Theta) = \prod_{t=1}^n f(t_i; \Theta)^{\delta_i} R(t_i; \Theta)^{1-\delta_i} \quad (5)$$

где $f(t; \Theta)$ и $R(t; \Theta)$ – соответственно функция плотности вероятности и функция надежности распределения вероятности, из которого предположительно возникают данные.

Одна из трудностей, связанных с оценкой максимального правдоподобия, как выражено в предыдущем подразделе, связана с тем фактом, что функция правдоподобия должна быть выведена специально для каждого параметрического распределения. Мы заинтересованы в этой статье в распределении Вейбулла, выраженном в Выражении. (1) и (2). Вместо работы непосредственно с Выражениями (1) и (2), может быть более удобным работать с эквивалентным распределением экстремальных значений для $Y = \log T$, со следующей функцией надежности:

$$f(y; u, b) = \frac{1}{b} e^{(y-u)/b} \exp[-e^{(y-u)/b}], \text{ где } -\infty < y < \infty \quad (6)$$

$$R(y; u, b) = \exp[-e^{(y-u)/b}], \text{ где } -\infty < y < \infty \quad (7)$$

$$\text{где } y = \log t, u = \log \Theta \text{ и } b = \beta^{-1}$$

Поскольку процесс максимизации не изменяется монотонным преобразованием, обычно более удобно использовать функцию логарифмирования $l(\Theta) = \log L(\Theta)$. Используя изменение переменных $z = (y - u)/b$ и, вводя $r = \sum \delta_i$, логарифмическая функция правдоподобия выражается как:

$$l(u, b) = -r \log b + \sum_{i=1}^n (\delta_i z_i - e^{z_i}) \quad (8)$$

Теперь мы можем максимизировать логарифмическую функцию правдоподобия $l(u, b)$ или минимизировать $-l(u, b)$, что является случаем, использованным в этом исследовании [3, С. 40]. Чтобы сделать задачу минимизации более эффективной, можно также вычислить градиент $-l(u, b)$, которые имеют аналитическую и довольно простую форму:

$$-\nabla l(u, b) = \begin{pmatrix} -\frac{\partial l}{\partial u} \\ \frac{\partial l}{\partial t} \\ -\frac{\partial l}{\partial b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n (\delta_i z_i - e^{z_i}) \\ \frac{r}{b} + \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n z_i (\delta_i - e^{z_i}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$H(u, b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 l}{\partial u^2} & -\frac{\partial^2 l}{\partial u \partial b} \\ \frac{\partial^2 l}{\partial u \partial b} & \frac{\partial^2 l}{\partial b^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

где:

$$-\frac{\partial^2 l}{\partial u^2} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^n z_i \quad (11)$$

$$-\frac{\partial^2 l}{\partial u \partial b} = \frac{1}{b^2} \sum_{i=1}^n [e^{z_i} - \delta_i + z_i e^{z_i}] \quad (12)$$

$$-\frac{\partial^2 l}{\partial b^2} = \frac{1}{b^2} \left[-r + \sum_{i=1}^n [2z_i (e^{z_i} - \delta_i) + z_i^2 e^{z_i}] \right] \quad (13)$$

Таблица 1 – Оценка максимального правдоподобия параметров Вейбулла для надежности подсистемы космического аппарата

Подсистема	β	$\theta/\text{лет}$
1. Гироскоп / солнечный датчик	0.7182	3831
2. Двигатель / Топливная система двигателя	0.3375	6,206,945
3. Центральная вычислительная машина	1.4560	408
4. Механизмы	0.3560	2,308,746
5. Полезная нагрузка	0.8874	7983
6. Аккумуляторная батарея	0.7460	7733
7. Распределение электроэнергии	0.5021	169,272
8. Развертывание солнечных батарей	–	–
9. Работа солнечной батареи	0.4035	1,965,868
10. Телеметрии, слежения и управления	0.3939	400,982

Таблица 2 – Ошибка между непараметрической и Вейбулловской надежностью для каждой подсистемы

Подсистема	Максимальная ошибка (%)	Средняя ошибка (%)
1. Гироскоп / солнечный датчик	0.37	0.14
2. Двигатель / Топливная система двигателя	0.18	0.08
3. Центральная вычислительная машина	0.22	0.06
4. Механизмы	0.21	0.07
5. Полезная нагрузка	0.36	0.27
6. Аккумуляторная батарея	0.62	0.15
7. Распределения электроэнергии	0.19	0.07
8. Развертывание солнечных батарей	–	–
9. Работа солнечной батареи	0.31	0.13
10. Телеметрии, слежения и управления	0.23	0.10

Оценки максимального правдоподобия параметров надежности спутниковых подсистем. Показав, что распределение Вейбулла действительно хорошо подходит для надежности подсистем спутников, мы применили оценку максимального правдоподобия с методом на основе градиента второго порядка, чтобы определить оценки параметров Вейбулла для каждой подсистемы. Таблица 2 содержит результаты вычислений.

По таблице 2 можно сделать следующие выводы. Давайте рассмотрим подсистему Гироскопа как пример. Важным показателем является непараметрическая надежность этой подсистемы, которая наилучшим образом описывается распределением Вейбулла.

$$R_{\text{Гироскоп}}(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{3831} \right)^{0.7182} \right] \quad (14)$$

Значения параметра формы ($\beta = 0,7182$) и параметра шкалы ($\Theta = 3831$) являются оценками максимального правдоподобия.

Следует отметить, что для подсистемы развертывания солнечной батареи не предусмотрены значения параметров Вейбулла. Развертывание солнечной батареи является подсистемой с одним запуском или, точнее, фаза с одним запуском подсистемы солнечной батареи и подгонка Вейбулла в данном случае не имеет смысла. Подгонка Вейбулла также может проводиться по данным, присвоенным «неизвестной» категории, упомянутой во втором разделе. Полученные параметры Вейбулла составляют $\beta = 0,4011$ и $\Theta = 5836474$ лет.

Важным результатом в таблице 2 является то, что все подсистемы спутника, за исключением центральной вычислительной машины, страдают от выхода из строя на ранних этапах эксплуатации (параметр формы $\beta < 1$). Этот вывод имеет важные последствия для космической промышленности и должен побу-

дять серьезно рассмотреть вопрос о совершенствовании процедур разработки и испытаний подсистем космического аппарата.

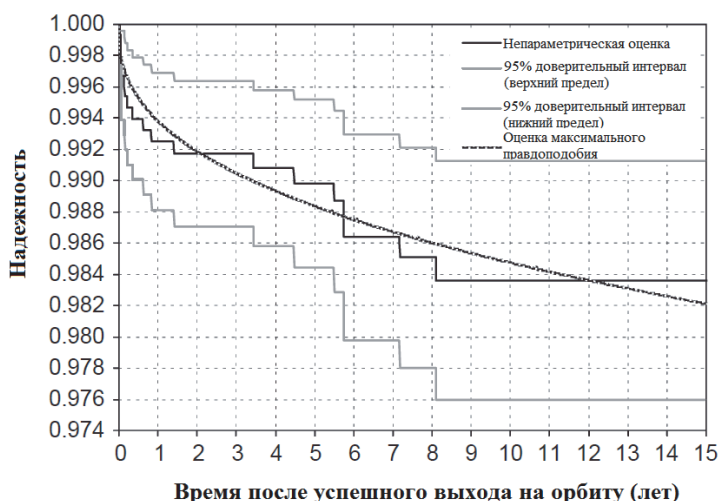


Рисунок 2 – Непараметрическая надежность и оценка максимального правдоподобия для подсистемы телеметрии, слежения и управления

На рисунке 2 указана показана непараметрическая кривая надежности (с 95% доверительным интервалом) для подсистемы телеметрии, слежения и управления, а также наилучшая подгонка Вейбулла (т.е. с параметрами оценки максимального правдоподобия).

На рисунке 2 представлена визуальная проверка того, что распределение Вейбулла с параметрами оценки максимального правдоподобия, приведенными в таблице 2, хорошо подходит для непараметрической надежности телеметрии, слежения и управления. Аналогичные результаты получены для других подсистем. Безупречность распределения Вейбулла отражается в этой работе максимальными и средними ошибками за 15 лет между непараметрической кривой надежности и фитингом Вейбулла. Например, для подсистемы телеметрии, слежения и управления максимальная погрешность (или расстояние) между непараметрической кривой надежности и посадкой Вейбулла составляет 0,23%, а средняя погрешность – 0,10%.

Это представляет собой замечательную точность для двухпараметрового распределения Вейбулла.

Следует отметить, что более точные модели надежности непараметрических подсистем могут быть разработаны (при необходимости большей точности) путем принятия либо сплайновых функций, либо смешанного распределения модели с большим количеством параметров (следовательно, с большей степенью свободы), чем двухпараметрическое распределение Вейбулла или другие традиционные параметрические распределения. В ходе будущей работы будут изучены более сложные модели надежности спутниковой подсистемы.

В таблице 3 даны значения максимальных и средних отклонений между

непараметрической надежностью и соответствующей пригодностью Вейбулла для всех компонентов системы. Максимальная погрешность для всех подсистем остается меньше одного процента (наихудшее соответствие – для аккумуляторной батареи 0,62%).

Эти результаты указывают на то, что распределение Вейбулла является достаточно точной моделью надежности всех подсистем (за исключением развертывания солнечной батареи).

Проверка результатов оценки максимального правдоподобия. Мы смоделировали параметрическую надежность всех подсистем и сравнил ее с непараметрической надежностью. Напомню, что наши расчеты надежности подсистемы основаны на определении отказа I класса в SpaceTrack, то есть отказа подсистемы, который приводит к выходу из строя спутника. С учетом того, что база данных относит причину отказа космических аппаратов к одной подсистеме (или к категории «неизвестных»), подсистемы поэтому рассматриваются последовательно в отношении отказа I класса. Иными словами, отказ любой подсистемы приводит к отказу (по определению отказа I класса) [4, С. 82]. Поэтому мы запустили моделирование Монте-Карло всех подсистем последовательно с их соответствующими распределениями Вейбулла. Полученная «смоделированная» надежность спутника сравнивалась с фактической непараметрической надежностью данных аппаратов. Результат показан на рисунке 3.

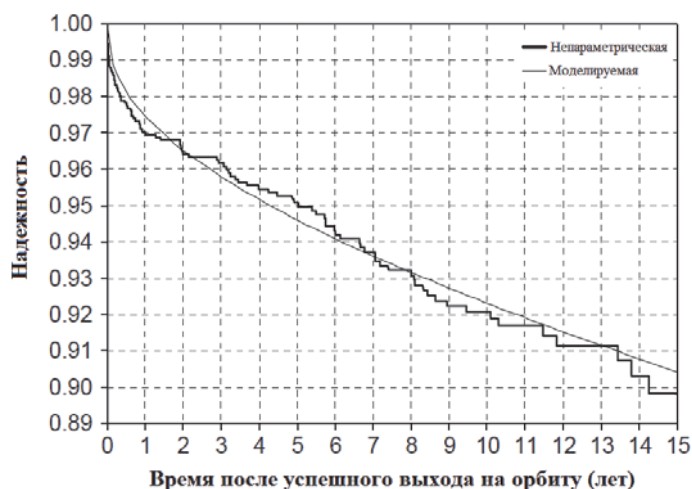


Рисунок 3 – Сравнение непараметрической и моделируемой надежности

Смоделированная надежность, основанная на совокупной надежности подсистем Вейбулла, полученной в этой работе, удивительно хорошо следует непараметрической надежности. Погрешность между двумя кривыми остается в пределах менее одного процента. Это хороший признак того, что надежность подсистем, полученная в этой работе с использованием метода оценки максимального правдоподобия, действительно подходит для необходимых целей.

Относительное влияние каждой подсистемы на отказ спутника. В

этом разделе представлен сравнительный анализ отказов подсистем и выявление подсистем-виновников, приводящих к ненадежности данных космических аппаратов. Более конкретно, Мы количественно оцениваем относительный вклад каждой подсистемы в отказ спутников в нашей выборке. Кроме того, мы добавляем измерение времени к этому анализу, анализируя эволюцию во времени относительного влияния каждой подсистемы на отказ спутника.

Для каждой подсистемы j , определенной в базе данных, мы рассчитываем ее вероятность, приводящую к отказу аппарата, $\hat{P}_{\text{подсистема } j}$, основываясь на оценочной надежности подсистемы, полученной оценщиком Каплана-Мейера в разделе 2:

$$\hat{P}_{\text{подсистема } j} = 1 - \hat{R}_{\text{подсистема } j} \quad (15)$$

Затем мы вычисляем вероятность отказа спутника следующим образом:

$$\hat{P}_{\text{с.б.}} = 1 - \hat{R}_{\text{с.б.}} \quad (16)$$

где $\hat{R}_{\text{с.б.}}$ – оценочная непараметрическая надежность спутника, полученная с помощью оценщика Каплана-Мейера (см. рисунок 1).

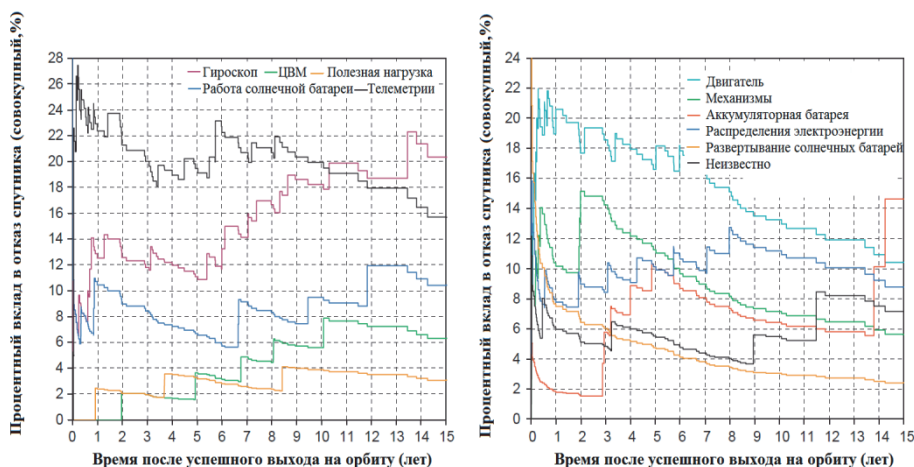


Рисунок 4 – Относительный вклад различных подсистем в отказ спутника

Процентный вклад подсистемы j в отказ спутника определяется, как:

$$r_j = \frac{\hat{P}_{\text{подсистема } j}}{\hat{P}_{\text{с.б.}}} \quad (17)$$

Результаты данного анализа можно представить на одном рисунке, показывая все r_j для $j=1-11$ как функцию времени. Однако в целях удобочитаемости я разделил результаты на два рисунка: рисунки 4а, 4б.

На рисунках 4а и 4б показана эволюция во времени распределения отказов подсистем, приводящих к потере спутника. Например, на рисунке 4а видно, что центральная вычислительная машина вносит приблизительно 6% в общее количество отказов аппаратов за 15 лет.

Аналогичным образом мы наблюдаем, что гироскоп и подсистема телеметрии, слежения и управления являются основными причинами отказов спутников; в 20% и в 16% происходит отказ данных космических аппаратов из-за этих подсистем в течение 15 лет.

Интересно отметить переключение в «лидерстве отказа» между подсистемами гироскопа и подсистемой телеметрии, слежения и управления в течение 10 лет на рисунке 4а подсистема телеметрии, слежения и управления является основной причиной отказа в течение первых 10 лет на орбите с относительным вкладом около 20%. Отказы из-за гироскопа происходят в 12% в период между 1 годом и 6 годом на орбите, а затем они явно нарастают, начиная примерно с 6 лет и обгоняют относительный вклад подсистемы телеметрии, слежения и управления во влиянии на отказы. Это называется переключением в «лидерстве отказа» между подсистемами гироскопа и телеметрии, слежения и управления.

Например, на рисунке 4б показано, что неизвестные причины составляют 5-8% отказов. Одна интересная тенденция на рисунке 4б, показывающая эволюцию вклада аккумуляторной батареи в отказ спутника. Наблюдаются два явных увеличения в ритме: первый после 3 лет на орбите, когда отказы из-за аккумуляторных батарей увеличиваются с 2% до 10% к 5 году; и второй – после 14 лет на орбите, когда отказы космических аппаратов из-за аккумуляторных батарей увеличиваются с 6% до 14% к 15 году. Эти наблюдения, вероятно, свидетельствуют о двух различных режимах отказа и, как таковые, они должны быть полезны инженерам-электрикам, работающим над накоплением энергии космического аппарата и соответствующей программой проверки надежности.

Анализ в этом разделе должен оказаться полезным для космической промышленности в целом, а также для конструкторов космических аппаратов и руководителей программ, в частности, в том, чтобы помочь им сосредоточить свое внимание и ресурсы на подсистемах с высокой склонностью к отказу спутников и вкладом в него, тем самым улучшив разработку, моделирование, а также программы испытаний таких космических аппаратов.

Выводы. Мы рассчитали параметры Вейбулла, используя метод оценки максимального правдоподобия. Одним из важных результатов параметрического анализа является то, что все подсистемы спутников, за исключением центральной вычислительной машины, демонстрируют выход из строя на ранних этапах эксплуатации. Этот вывод имеет важные последствия для космической промышленности и должен побудить серьезно рассмотреть вопрос о совершенствовании процедур разработки, моделирования и испытаний подсистем.

Также, мы количественно оценили относительный вклад каждой подсистемы в отказ спутников и определили подсистемы, которые приводят к ненадежности данных космических аппаратов. Например, мы обнаружили, что подсистемы гироскопа и телеметрии, слежения и управления имеют основное влияние на сбои спутников, а подсистема телеметрии, слежения и управления и развертыва-

ние солнечной батареи приводят к выходу из строя на ранних этапах эксплуатации спутников.

Литература

1. Krasich M. Reliability prediction using flight experience: Weibull adjusted probability of survival method. NASA technical report, Jet Propulsion Laboratory, Document ID: 20060041898, April 1995.
2. Space-Track.org предоставляет услуги и информацию по информированию о космической ситуации американским и международным владельцам/операторам спутников, научным кругам и другим организациям [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.space-track.org> (Дата обращения 20.07.2023).
3. Анализ отказов различных систем космического аппарата // «Информационно-технологический вестник». № 4(26). 2020. С. 34-46. ISSN 2409-1650.
4. Брусков А.А. Распространение отказов во взаимозависимых многоуровневых сетях // «Информационно-технологический вестник». № 2(28). 2021. С. 76-90. ISSN 2409-1650.

УДК 519.6

Экономико-математическая модель инфраструктуры сервиса

Василий Геннадьевич Жаров, кандидат технических наук, доцент, доцент,
Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), г. Москва,

Сергей Владимирович Шайтура, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

Наталья Викторовна Останкова, доктор экономических наук, профессор,
Московский экономический институт, г. Москва

В данной статье рассмотрены вопросы создания экономико-математических моделей инфраструктуры сервиса. Экономико-математические модели служат ведущим инструментом в разработке естественных и экономических задач. Они позволяют проводить анализ и прогноз развития экономических систем. В статье на основе графо-структурного метода проведен анализ факторов развития инфраструктуры сервиса. Проведена типологизация проблем, ограничивающих инновационное развитие инфраструктуры сервиса. Приведена укрупненная и детализированная схема, проведен анализ связей. Предложены различные подходы к оценке эффективности управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса, в том числе эффективность сервиса описана с позиции теории игр. Предложена модель, в которой выигрывают все стороны взаимодействия, как заказчик, так и поставщик сферы услуг. Разработан пример матрицы теоретико-игровой модели взаимодействия заказчика и поставщика в инфраструктуре сервиса. Приведены примеры использования этой стратегии в сфере услуг реальной экономики. В заключении предложены пути дальнейшего развития экономико-математических моделей: детализация графо-структурной модели, поиск балансов заказчик-исполнитель, покупатель-продавец и т.д.

Цифровая экосистема, инфраструктура сервиса, экономико-математическая модель, цифровая экономика, цифровые технологии.

Economic and mathematical model of service infrastructure

Vasily Genadyevich Zharov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Russian State University. A.N. Kosygina
(Technology. Design. Art), Moscow,

Sergey Vladimirovich Shaitura, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
Natalya Viktorovna Ostankova, Doctor of Economics,
Professor of the Moscow Economic Institute, Moscow

This article discusses the issues of creating economic and mathematical models of service infrastructure. Economic-mathematical models serve as a leading tool in the development of natural and economic problems. They allow analysis and forecasting of the development of economic systems. The article, based on the graph-structural method, analyzes the factors of service infrastructure development. A typology of problems limiting the innovative development of service infrastructure has been carried out. An enlarged and detailed diagram is presented, and an analysis of connections is carried out. Various approaches to assessing the effectiveness of managing the innovative activities of service infrastructure enterprises have been proposed, including the effectiveness of the service described from the perspective of game theory. A model is proposed in which all parties to the interaction, both the customer and the service provider, benefit. An example of a matrix of a game-theoretic model of interaction between a customer and a supplier in the service infrastructure has been developed. Examples of the use of this strategy in the service sector of the real economy are given. In conclusion, ways for further development of economic and mathematical models are proposed: detailing the graph-structural model, searching for balances between customer and contractor, buyer and seller, etc.

Digital ecosystem, service infrastructure, economic and mathematical model, digital economy, digital technologies.

Введение

Инфраструктура сервиса разнообразна и охватывает большинство отраслей народного хозяйства, за счет необходимости сервисного сопровождения продуктов и сервисов на протяжении всего их жизненного цикла [4, 12, 15, 16, 17]. Накопленный объем знаний по использованию результатов применения продуктовых инноваций не раскрывает в полной мере глубинную основу принципов управления инновациями в сфере услуг и наоборот.

Нами установлены основные особенности конкуренции сервисных компаний от классической конкуренции производителей. Продукты могут производиться для будущего спроса; услуги предоставляются только по требованию. Сначала производится продукция, а затем устанавливается цена. Но сначала устанавливается тариф на услуги, затем на них возникает спрос. На рынке существует единая цена на этот товар, но однородные услуги дифференцированы по качеству, соответствующие тарифы на них различны, а спрос зависит не только от этого тарифа, но и от тарифов конкурентов.

Математические методы и модели, не отрицая традиционных методов, помогают объективно проанализировать переменные показатели результатов с

помощью других показателей [1, 3, 6, 9, 13]. Одним из преимуществ математических методов и электронных технологий в управления народным хозяйством состоит в том, что они могут показать влияние факторов на моделируемый объект, связь между результатом и ресурсом. Это обеспечивает научное прогнозирование и управление производственными результатами и приоритетами предприятий народного хозяйства в десятках отраслей и тысячах предприятий [7, 8, 21].

Материалы и методы

Теоретическая и практическая значимость математических методов и моделей может заключаться в следующем:

1. Математические методы и модели служат ведущим инструментом в разработке экономики и естественных наук.

2. В ходе реализации прогнозов можно будет внести некоторые коррективы в соответствии с использованием математических методов и моделей.

3. С помощью экономико-математических моделей можно не только анализировать экономические процессы в глубину, но и открыть их новые, неизвестные законы. Они могут также использоваться для прогнозирования будущего развития экономики.

4. Экономико-математические методы и модели наряду с упрощением компьютеризацией и автоматизацией вычислительной работы, облегчают умственный труд, помогают организовывать и руководить работой управленческих и хозяйственных кадров на научной основе.

Экономико-математические методы и модели включают в себя понятия и правила, состоящие из системы специальных наук, к которым относятся:

а) изучение влияния объективных и субъективных факторов на экономические процессы и их взаимосвязь;

б) научное обоснование бизнес-планов и объективная оценка их выполнения;

в) выявление положительных и отрицательных факторов, влияющих на экономику и количественная оценка их воздействия;

ж) выявление и раскрытие тенденций и закономерностей развития производства, неиспользованные потенциальные ресурсы;

г) обобщение лучшего опыта, принятие оптимальных управленческих решений.

При анализе экономики с использованием математических методов и моделей производственные процессы изучаются взаимодополняюще, взаимосвязанно. При этом любые факторы, причины, основания, события, процессы связываются друг с другом и оцениваются.

Предметом экономико-математических методов и моделей является описание социально-экономической эффективности и финансовые результаты деятельности под влиянием объективных и субъективных факторов на основе системы экономико-математических моделей производственных процессов у потребителей, производителей, объединений.

Широкое использование экономико-математических методов и моделей улучшает направление экономического анализа, повышает эффективность эко-

номического анализа, создавая возможности для взаимодействия между различными процессами, производя количественную оценку их изменений и выявление тенденций.

Использование экономико-математических методов при анализе деятельности предприятий требует системного подхода к изучению экономики сервисных предприятий, принимая во внимание все существующие взаимосвязи между различными видами его деятельности.

Результаты

Анализ факторов развития инфраструктуры сервиса

Типологию проблем, ограничивающих инновационное развитие инфраструктуры сервиса, можно представить в виде схемы на рисунке 1, которая демонстрирует тесную взаимосвязь составляющих её элементов и подтверждает тезис – возникновение проблем, входящих только лишь в одну из укрупненных групп, повлечет за собой изменение связей во всех остальных группах, поскольку инновационное развитие инфраструктуры сервиса проявляется в комплексном взаимодействии [10, 18, 19, 20].

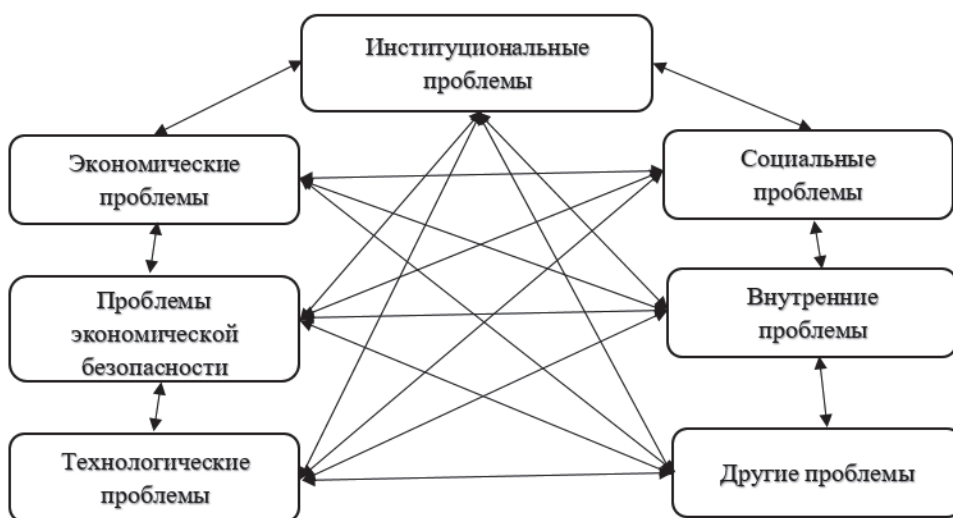


Рисунок 1 – Типология проблем, ограничивающих инновационное развитие инфраструктуры сервиса – вариант (составлен авторами)

Таким образом, необходимым и достаточным условием для обеспечения инновационного развития инфраструктуры сервиса, является недопущение возникновения проблем во всех группах.

Управленческая деятельность в инфраструктуре сервиса во многом схожа с процессами управления в промышленном секторе поскольку построена на общих с ним принципах и объединяется общими связями [22-25]. Но есть и специфические особенности, которые необходимо учитывать при выборе подходов именно для инфраструктуры сервиса, – это более широкий охват сети внутриот-

раслевого взаимодействия и развитые межотраслевые связи [26-27].

Графическое изображение инфраструктуры сервиса содержит элементы (проблемы), соединенные стрелками (связи), что может быть представлено в виде графа, где вершины графа – это проблемы, а стрелки между вершинами – это ребра графа (связи). В этом случае, для решения проблем инновационного развития инфраструктуры сервиса можно использовать подход, основанный на теории графов.

Применительно к проблемам, изображение графа, эквивалентное типологии, представленной на рисунке 1, показано на рисунке 2.

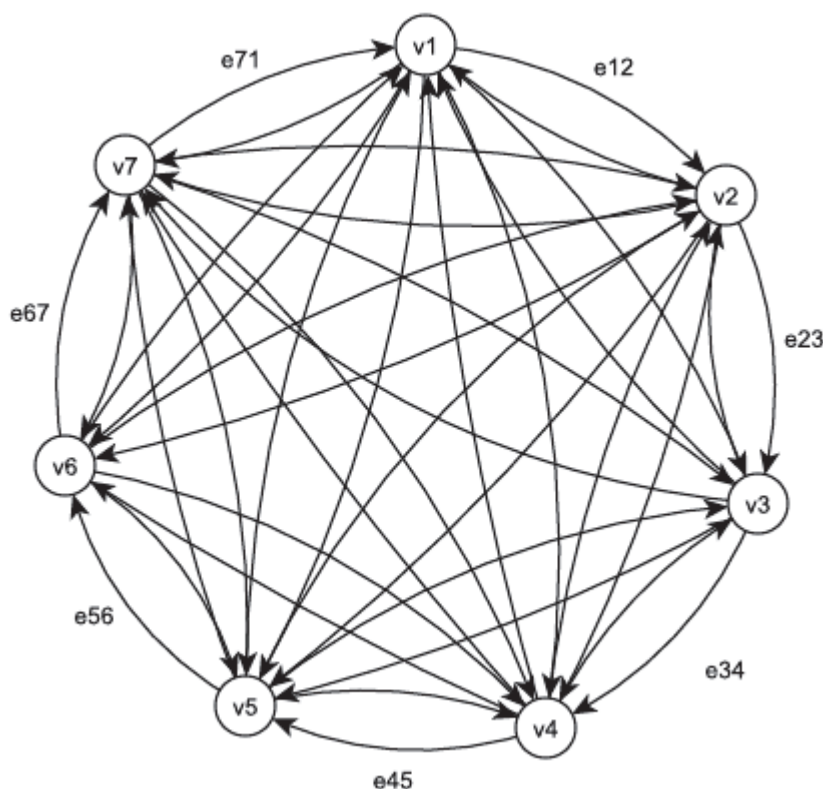


Рисунок 2 – Граф типологии проблем, ограничивающих инновационное развитие инфраструктуры сервиса – вариант (составлен авторами).

(Примечание к рисунку: показано обозначение только внешних ребер, остальные обозначаются аналогично e12,...,e76)

В соответствии с теорией графов, множество вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, связанных между собой множеством ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ обозначается как $G = (V, E)$.

По определению [14] показанный на рисунке 2 граф представляет собой полный ориентированный граф без петель ($c_{ij} = \infty$ для всех $i=j$) на семи вершинах $V = 7$ с количеством граней $E = 42$, который можно записать в виде $G = (7, 42)$. В

нашем случае число возможных маршрутов движения между вершинами составляет $(V-1)! = (7-1)! = 720$ вариантов. В ориентированных графах движение допускается только в направлениях, обозначенных стрелками, при этом, в случае отсутствия одного из ребер граф перестает быть полным, что отражается на его свойствах (в нашем случае – на свойствах системы). Следовательно, подходы, используемые для анализа подобных графов применимы и для анализа систем, имеющих аналогичное строение.

Таким образом, система проблем, ограничивающих инновационное развитие инфраструктуры сервиса, представленная на рисунке 2, обладает всеми свойствами, характерными для графов аналогичного типа. Подход на основе теории графов позволяет фрагментировать описание системы за счет разбиения на подграфы, что бывает полезно при поиске источников проблем. Представление в виде матриц позволяет использовать математический аппарат и вычислительную технику при решении прикладных задач и задач с большей степенью неопределённости.

Представим граф, изображенный на рисунке 2 в виде следующей матрицы 1:

$$\begin{array}{c|cccccc}
 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\
 \hline
 1 & & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \\
 2 & 21 & & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 \\
 3 & 31 & 32 & & 34 & 35 & 36 & 37 \\
 = & 4 & 41 & 42 & 43 & & 45 & 46 & 47 \\
 5 & 51 & 52 & 53 & 54 & & 56 & 57 \\
 6 & 61 & 62 & 63 & 64 & 65 & & 67 \\
 7 & 71 & 72 & 73 & 74 & 75 & 76 &
 \end{array} \quad (1)$$

Матричная форма записи графа позволяет оценить представленную в таком виде систему и характер взаимодействия в ней при условии задания стоимости связей (граней), соединяющих вершины. В контексте темы настоящего исследования это могут быть временные интервалы, финансовые затраты и т.п. Недостатком данного подхода является необходимость использования больших вычислительных мощностей.

Опираясь на вышеизложенный материал и проведенные преобразования, взятых за основу рисунков 1 и 2 получим блок-схему, отражающую детализацию проблем инновационного развития инфраструктуры сервиса (рис. 3).

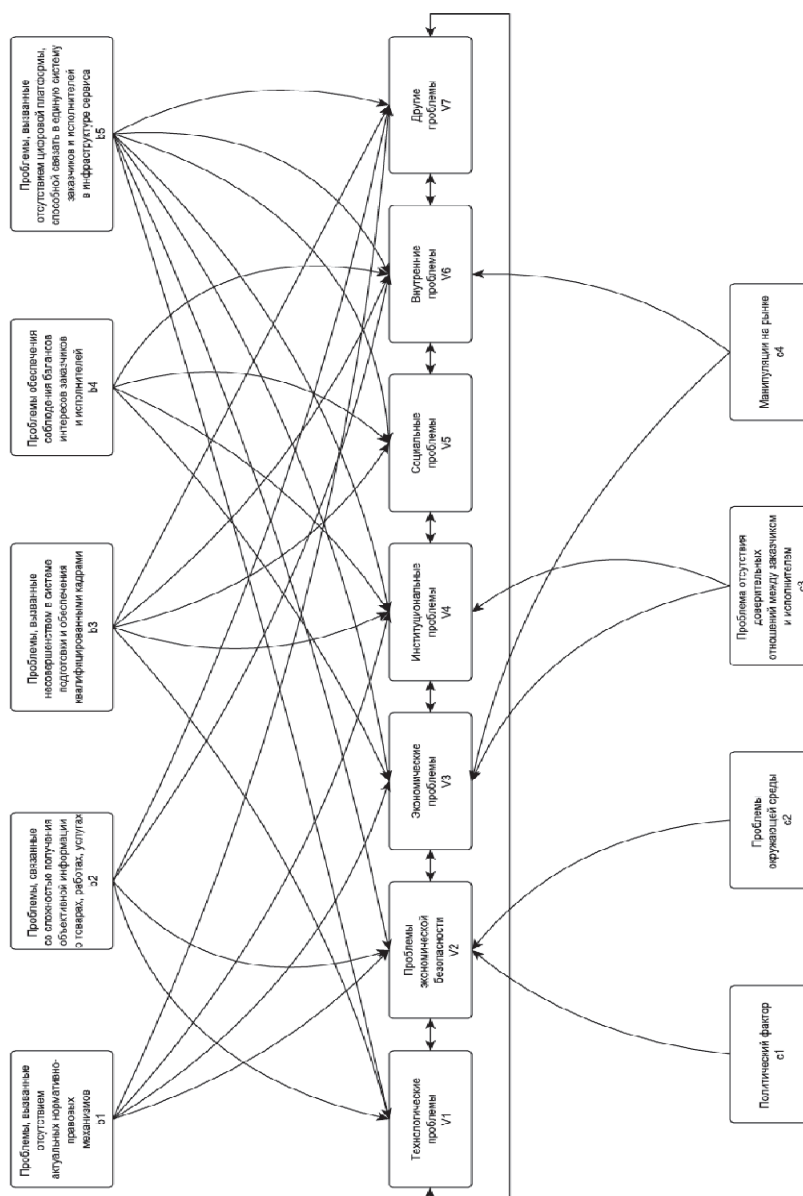


Рисунок 3 – Детализация проблем инновационного развития инфраструктуры сервиса (предложено авторами)

Анализ связей элементов, составляющих данную блок-схему (рис. 3) выявил ряд сочетаний, которые удобно выразить в виде матрицы. Для уникальных проблем составим таблицу 1, для балластных – таблицу 2. Здесь под цифровым обозначением «1» подразумевается наличие связи, «0» – ее отсутствие.

**Таблица 1 – Матрица сочетаний, учитывающих уникальные проблемы
инновационного развития инфраструктуры сервиса**

	b1	b2	b3	b4	b5	итого a1...a7
V1	0	1	1	0	1	3
V2	1	1	0	0	1	3
V3	1	0	0	1	1	3
V4	1	0	1	1	1	4
V5	0	0	1	1	1	3
V6	0	1	1	1	1	4
V7	1	1	1	0	1	4
итого b1...b5	4	4	5	4	7	

**Таблица 2 – Матрица сочетаний, учитывающих балластные проблемы
инновационного развития инфраструктуры сервиса**

	c1	c2	c3	c4	итого a1...a7
V1	0	0	0	0	0
V2	1	1	0	0	2
V3	0	0	1	1	2
V4	0	0	1	0	1
V5	0	0	0	0	0
V6	0	0	0	1	1
V7	0	0	0	0	0
итого c1...c4	1	1	2	2	

Анализ детализации проблем инновационного развития инфраструктуры сервиса (рис. 3) и данных таблиц 1 и 2 показал, наличие зависимостей количества наибольшего числа исходящих связей, выделил характерные узкие места, от которых зависит инновационное развитие инфраструктуры сервиса, которые являются ключевыми.

*Подходы к оценке эффективности управления инновационной деятельностью
предприятий инфраструктуры сервиса*

Задача формирования методики, отражающей ключевые аспекты при оценке эффективности процессов управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса является сложной вдвойне, поскольку должна учитывать специфику самых разнообразных сфер и предприятий.

В общем случае определение экономического эффекта инновационной деятельности хозяйствующего субъекта можно определить, как повышение экономической эффективности работы предприятия и/или увеличение его капитализации при сопоставлении результата и затрат, потраченных для его достижения, который можно представить в формализованном виде как следующее отношение:

$$\text{Эффективность} = \frac{\text{Результат}}{\text{Затраты}} \quad (2)$$

Данное выражение можно рассматривать и как целевую функцию $\mathcal{E}(t) = \frac{P}{3} \rightarrow \max$. То есть, достижение максимального результата при минимальных затратах, необходимых для его достижения.

В литературе по экономике упоминается также методика определения эффективной реализации инноваций, которая предполагает превышение результата от внедрения инноваций над затратами, вызванными реализацией инноваций, определяемая интегральным экономическим эффектом ($\mathcal{E}_u$) от инвестиций и инноваций, который представляет собой разность между результатом и затратами за расчетный период с учетом дисконтирования результатов и затрат и находится из выражения:

$$\mathcal{E}_u = \sum_{t=0}^{T_p} (P_t - 3t) \alpha_t \quad (3)$$

где T_p – расчетный год; 3_t – инновационные затраты в t -й год; P_t – результат в t -й год; α_t – коэффициент дисконтирования.

Оценка экономического эффекта инновационной деятельности является одним из важных этапов в процессе развития и внедрения новых технологий и продуктов, так как дает возможность предприятию определить, насколько успешным оказалось внедрение инноваций и какие меры еще необходимо принять для достижения больших результатов. Представленный подход позволяет оценить исследуемую область в целом, а для более детальной оценки нуждается в подробной проработке, учитывающей специфику инфраструктуры сервиса.

В работах, посвященных рассматриваемой тематике на первоначальном этапе за основу чаще всего принимаются результаты исследований в области управления услугами и маркетинга. Таким образом, исследователи инноваций в сфере услуг выходят за рамки, ограничивающие достижения только в области продуктовых инноваций, что способствует появлению инновационных моделей взаимодействия, ориентированных на конкретные услуги, например, сервисные платформы и экосистемы. Однако, в ряде случаев организации не ограничиваются предложением только сервисов, услуг или продуктов, сочетание которых способствует инновационному развитию во всех задействованных направлениях.

Так, например, развитие шеринга городского электротранспорта аккумулирует в себе сочетание продуктов, услуг и сервисов, способствует улучшению экологической обстановки, расширяет возможности мобильности индивидуумов, способствует развитию сервисов доставки товаров, задает векторы развития и создания новых инновационных продуктов, услуг, сервисов в транспортной сфере [20-22]. В то же время, оказывает влияние на социум, путем зарождения новых представлений к оценке доступности городской среды, популяризации экологически чистых видов транспорта и т.д.

При всем имеющемся многообразии работ исследователей, посвященных вопросам управления инновационной деятельностью, на данный момент отсутствует действенная методика измерения и оценки ее эффективности для инфраструктуры сервиса, учитывающая нарастающие темпы цифровизации экономики

и происходящих в этой связи революционных изменений в рамках концепции «Индустрии 4.0».

Большинство имеющихся моделей, применяемых для описания процессов инновационной деятельности предприятий в условиях развития цифровой экономики не позволяют охватить в полном объеме и корректно оценить их эффективность ввиду сложности последних. Это связано с возникновением новых и перестроением уже существующих цепочек в системах связей взаимодействия между субъектами хозяйственной деятельности. При описании такой ситуации исследователи сходятся во мнении, что для определения и четкого понимания, объясняющего суть процессов управления инновациями в сфере услуг целесообразно использовать новые парадигмы, что, на наш взгляд следует делать и для инфраструктуры сервиса.

Таким образом, применение новых подходов с учетом существующих точек зрения, включающих элементы, относящиеся к продуктовым инновациям и сфере услуг, будут способствовать накоплению знаний и формированию наиболее полной, целостной картины в данной области при изучении вопросов управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса.

Уровень удовлетворенности клиентов продуктами, услугами, сервисами во многом определяется эффективностью процессов управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса. Наиболее полную оценку которых можно провести, на наш взгляд, при использовании методов, в основе которых лежит принцип баланса интересов взаимодействия заинтересованных сторон – заказчиков и поставщиков, что находит свое подтверждение, и в ряде научных работ [23, 24, 25].

Данный подход предполагает учет интересов всех заинтересованных сторон в процессе оценки эффективности реализованных инновационных продуктов, услуг, сервисов. Что позволяет учитывать не только экономическую целесообразность, но и социальные и экологические аспекты.

Однако по мнению ряда исследователей, к настоящему времени пока не выработан актуальный инструментарий, достоверно описывающий взаимодействие элементов сложной системы во всем многообразии сочетаний факторов при обеспечении баланса интересов. Такая точка зрения объясняется излишне формализованным описанием методик, когда теряются ключевые индикаторы, отражающие суть взаимодействия субъектов. В то же время, большинство экономистов придерживается точки зрения о необходимости использования адекватных математических моделей при описании экономических процессов в теоретических исследованиях и при составлении прогнозов.

К числу методов, наиболее полно отражающих влияние факторов различного характера на поиск оптимальных решений, способствующих повышению эффективности процессов управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса, относится математическое программирование. Оно включает в себя следующие методы [5, 19]:

- линейное программирование, которое заключается в поиске экстремального значения линейной функции многих переменных при наличии линейных ограничений, связывающих эти переменные;
- нелинейное программирование, при котором целевая функция и связывающие ее ограничения могут быть нелинейными функциями;
- целочисленное программирование является частным случаем задач линейного и нелинейного программирования, при условии ограничений на целочисленных переменных;
- динамическое программирование, при котором нахождение оптимальных решений осуществляется при разбиении основной задачи на этапы и последующем последовательном их решении [11];
- теоретико-игровые модели, описывающие ситуации конфликтов при отстаивании интересов взаимодействующих сторон с использованием математического аппарата [2, 28].

В формализованном виде в теоретико-игровой модели применительно к рассматриваемой сфере деятельности присутствуют «игроки» – заказчик и поставщик продукта, услуги, сервиса; «стратегии» – возможные действия каждого игрока; «выигрыши» – результат взаимодействия между заказчиком и поставщиком продукта, услуги, сервиса, зависящий от выбранных стратегий. Комбинации стратегий и выигрыши игроков записываются в матричной форме.

Игроки принимают решения в условиях неопределенности и конкуренции. Они стремятся максимизировать свою выгоду, однако при этом учитывают и интересы другой стороны. В рамках модели разрабатываются стратегии, которые позволяют достичь равновесия между выгодой для поставщика и удовлетворенностью заказчика, что помогает снизить риски конфликтов и повысить эффективность сотрудничества между сторонами.

Помимо деления на кооперативные и некооперативные, теория игр имеет множество других классификаций и моделей, перечисление и описание которых не является целью данной работы. Инновационная деятельность предприятий инфраструктуры сервиса не является коалиционной, поэтому, может быть описана инструментами некооперативной теории игр.

С точки зрения оценки уровня развития процессов управления инновационной деятельностью, их эффективность определяется последствиями принятых решений в отношении вывода на рынок новых продуктов, услуг, сервисов. Поэтому, насколько правильно и обоснованно будут выбраны необходимые решения менеджментом компании, настолько и выигрышной будет ее положение среди конкурентов.

Помочь в выборе оптимальных стратегий, способствующих повышению эффективности инновационного развития и призвано применение различных подходов теории игр. Особенно актуально их использование в условиях неопределенности. Создание соответствующей экономико-математической модели позволяет провести критический анализ ситуации, на основании которых выбрать оптимальную для данных условий стратегию для предприятия с учетом максимизации конечного результата – выигрыша. Используя возможности аппарата

теории игр можно решать управленческие задачи в условиях рынка несовершенной конкуренции.

Например, модель «win-win», предполагает, что обе стороны выигрывают. В этом случае необходимо найти баланс между качеством услуг, соответствием требованиям заказчика и ценой, которую он готов заплатить. Если этот баланс найден, то обе стороны получают выгоду и удовлетворены результатами сотрудничества.

Как один из возможных вариантов моделей – это игра на двух уровнях, где на первом уровне заказчик выбирает поставщика услуг, а на втором уровне поставщик выбирает цену и качество услуг. При этом используются различные сценарии взаимодействия между заказчиком и поставщиком услуг. Например, в условиях конкуренции заказчик может снизить цену услуги, чтобы выбрать более выгодного поставщика. В свою очередь, поставщик может улучшить качество услуги, чтобы привлечь больше клиентов.

Подобное взаимодействие встречается не только в бизнесе, но и в законодательной деятельности, например, в Федеральном законе от 18.07.2011 N 223-ФЗ (ред. от 05.12.2022) «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.04.2023), целью которого является обеспечение единства экономического пространства, создание условий для своевременного и полного удовлетворения потребностей юридических лиц, упоминаемых в документе, в товарах, работах, услугах, в том числе для целей коммерческого использования, с необходимыми показателями цены, качества и надежности, эффективное использование денежных средств, расширение возможностей участия юридических и физических лиц в закупке товаров, работ, услуг для нужд заказчиков и стимулирование такого участия, развитие добросовестной конкуренции, обеспечение гласности и прозрачности закупки, предотвращение коррупции и других злоупотреблений.

Однако, изучение правоприменительной практики по данному направлению показало, что здесь не учитываются риски и степень непредсказуемости рыночных условий, поскольку предусматривается «выигрыш» для поставщика продукта, услуги, сервиса с наименьшей ценой, где учитываются интересы заказчика, при этом по факту, данная ситуация не оказывается выигрышной для поставщика. Поскольку, если стоимость необходимого для оказания услуг компонента быстро растет, то поставщик может оказаться в вынужденном положении, когда он не может снизить цену услуги без убытков. Жесткие условия финансирования и требования по закрытию контрактов в соответствии с данным ФЗ нередко приводят к вынужденной ситуации, когда заказчик получает продукт, услугу, сервис по цене и качеству, не соответствующей рыночной, а поставщик терпит убытки, что нарушает теоретико-игровую модель в целом и становится отрицательным эффектом для развития инновационной деятельности, чего, безусловно, необходимо избегать.

Рассмотренный пример показывает, что для предприятий, перечисленных в части 2 Федерального закона от 18.07.2011 N 223-ФЗ (ред. от 05.12.2022) «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц» (с изм. и

доп., вступ. в силу с 01.04.2023) применение теоретико-игровых моделей является целесообразным при выявлении несовершенств в механизмах, регулируемых в рамках данного ФЗ. В то же время, для организаций, не подпадающих под подобные ограничения, предложенный инструментарий имеет большое практическое значение.

Поэтому, наиболее эффективной, на наш взгляд, в этом случае будет другая модель – «partnership», которая предполагает сотрудничество между заказчиком и поставщиком на долгосрочной основе. В этой модели обе стороны работают вместе для достижения общих целей и максимизации выгод.

Она позволяет определить оптимальный баланс между ценой и качеством услуг, учитывая требования и ожидания заказчика. Это позволяет обеспечить выгоду и удовлетворенность как для поставщика, так и для заказчика. Здесь стороны рассматриваются как партнеры, которые работают вместе для достижения общей цели. Они делят риски и прибыль, обмениваются информацией и ресурсами, и стремятся к постоянному улучшению своих отношений. Это позволяет снизить конфликты и повысить эффективность сотрудничества, что в свою очередь способствует увеличению удовлетворенности клиентов и повышению конкурентоспособности компании.

Также важно использовать правила и стандарты, которые защищают интересы обеих сторон. Например, можно использовать долгосрочные контракты, которые определяют условия выполнения работ на различных этапах жизненного цикла и возможности компенсации в случае наступления противоречий.

Прикладное использование теоретико-игровых моделей предполагает определение стратегии для каждой стороны и выявление равновесия Нэша, которое будет оптимальным для обеих сторон с учетом факторов, влияющих на взаимодействие заказчика и поставщика продукта, услуги, сервиса, такие как цена, качество, сроки выполнения и т.д.

Теоретико-игровая модель взаимодействия заказчика и поставщика в инфраструктуре сервиса с равновесием по Нэшу может быть представлена в виде матрицы (табл. 3).

Здесь определяются игроки, например, являющиеся заказчиками или поставщиками продуктов, услуг, сервисов; которые могут выбрать i -ю стратегию из своих m возможных стратегий ($i=1, \dots, m$), а второй, не зная выбора первого – j -ю стратегию из своих n возможных стратегий ($j=1, \dots, n$), соответственно. Выигрышем первого игрока и проигрышем второго будет являться величина a_{ij} .

Матрица игры в этом случае будет иметь вид:

$$A = a_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{matrix} & \end{matrix} \quad (4)$$

Строки матрицы обозначают чистые стратегии первого игрока, а столбцы – чистые стратегии второго.

Если игроки используют смешанные стратегии, то смешанную стратегию первого игрока обозначают как вектор $U=(u_1, u_2, \dots, u_m)$, а второго игрока – как вектор $Z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$, где $u_i \geq 0$ ($i=1, \dots, m$); $z_j \geq 0$ ($j=1, \dots, n$); $\sum_{i=1}^m u_i = 1$; $\sum_{j=1}^n z_j = 1$.

В случае U^* – оптимальная стратегия первого игрока, а Z^* – второго, то цена игры v будет иметь вид:

$$v = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij} u_i^* z_j^* \quad (5)$$

при выполнении условий:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} u_i^* \geq v \quad (j=1, \dots, n) \text{ и } \sum_{j=1}^n a_{ij} z_j^* \leq v \quad (i=1, \dots, m). \quad (6)$$

При решении прикладных задач для заполнения матрицы игры необходимо ввести критериальный аппарат – состояния системы, отвечающие за наличие и отсутствие искомого результата для каждого игрока.

Обозначим за «0» исход с минимальным результатом, а «1» максимальный результат. В данной модели заказчик и поставщик могут совершать только одно действие за один период времени. Заказчик выбирает, оставаться у текущего поставщика услуг или искать нового, а поставщик выбирает, как ответить на выбор заказчика.

Таблица 3 – Пример матрицы теоретико-игровой модели взаимодействия заказчика и поставщика в инфраструктуре сервиса (предложена авторами)

Возможные стратегии		Заказчик	
Поставщик		Заказать продукт, услугу, сервис у текущего поставщика	Искать нового поставщика продукта, услуги, сервиса
	Предложить продукт, услугу, сервис текущему заказчику по текущим условиям	(1;1)	(0;0)
	Снизить цену на продукт, услугу, сервис	(1;1)	(0;0)
	Предложить более высокое качество продукта, услуги, сервиса	(1;0)	(0;1)
	Не снижать цену или улучшать качество продукта, услуги, сервиса и допустить, что текущий заказчик найдет другого поставщика	(1;0)	(0;1)

У этой модели есть несколько равновесий по Нэшу, одно из возможных

может быть таким:

- заказчик оставляет текущего поставщика продукта, услуги, сервиса;
- поставщик не изменяет цену или качество продукта, услуги, сервиса.

В данном случае заказчик получает только текущее качество услуги по текущей цене, но не готов платить больше или искать нового поставщика услуг. Поставщик получает меньше прибыли, чем если бы он снизил цену или улучшил качество услуги, но при этом избегает потери заказчика.

Другое равновесие по Нэшу может состоять в следующем:

- заказчик остается у текущего поставщика продукта, услуги, сервиса;
- поставщик снижает цену продукта, услуги, сервиса.

В этих условиях заказчик получает качество продукта, услуги, сервиса по более низкой цене, чем ранее, и не имеет мотивации искать нового поставщика. Поставщик получает меньшую прибыль, но при этом удерживает заказчика и избегает потерь из-за его ухода в другое место.

Также, возможны и другие равновесия по Нэшу, в которых поставщик предлагает более высокое качество продукта, услуги, сервиса или заказчик ищет нового поставщика. Однако, выбор конкретного равновесия зависит от начальных условий и мотиваций сторон в данном взаимодействии.

Другая возможная модель – это игра с неполной информацией, где каждая сторона имеет ограниченную информацию о стратегиях другой стороны. В этом случае необходимо определить вероятностные распределения стратегий каждой стороны и выявить равновесие Байеса, которое будет оптимальным для обеих сторон.

В игре с неполной информацией, каждая сторона имеет ограниченную информацию о стратегиях другой стороны. В этом случае необходимо определить вероятностные распределения стратегий каждой стороны и выявить равновесие Байеса, которое будет оптимальным для обеих сторон. В этом случае, каждая сторона принимает решение на основе своих вероятностных ожиданий о стратегиях другой стороны, учитывая возможные действия другой стороны и вероятность их выбора. Для создания такой модели необходимо определить вероятностные распределения стратегий каждой стороны и выявить равновесие Байеса, которое будет оптимальным для обеих сторон. Также необходимо учитывать факторы, влияющие на взаимодействие заказчика и поставщика услуг, такие как цена, качество услуг, сроки выполнения и т.д.

В инфраструктуре сервиса, когда основной объем предложений по основному набору продуктов, услуг, сервисов ограничен несколькими компаниями, создаются предпосылки для формирования олигополистического рынка.

Данная ситуация может быть описана с использованием модели Курно. В этом случае для олигополистического рынка в инфраструктуре сервиса при формировании ценовой политики, у поставщиков, когда на рынок выводится новый продукт, услуга, сервис обычно применяется теоретико-игровая стратегия «зуб за зуб» или «око за око», основанная на том, что, сотрудничая на первом шаге, игрок в дальнейшем повторяет действия своего оппонента (табл. 4).

Таблица 4 – Пример матрицы игры стратегии «зуб за зуб» или «око за око» для двух поставщиков продуктов, услуг, сервисов инфраструктуры сервиса (предложен автором)

Возможные стратегии		Игрок А	
Игрок В		Повышает цены	Не повышает цены
	Повышает цены	(0;0)	(0;1)
	Не повышает цены	(1;0)	(1;1)

Анализируя данные матрицы, мы видим, что у обоих игроков в арсенале имеются по две одинаковые стратегии: повысить цены и не повышать цены.

При моделировании ситуации, когда один из участников повышает цены, другой может последовать его примеру, либо не повышать цену. Однако, выигрышной является стратегия со снижением цены, поскольку при этом увеличивается доля рынка за счет перехода заказчиков к поставщику с более низкой ценой. Из-за нежелания потерять клиентов, второй игрок также понижает цену.

Подобная ситуация была рассмотрена на примере «поведения американских авиакомпаний «Northwest Airlines» и «Continental Airlines», когда последняя снизила все свои тарифы вслед за введением льгот на ночные тарифы конкурентом, так как восприняла его действия как попытку захватить большую долю рынка.

Помимо применения различных игровых стратегий, участники олигополистического рынка склонны к совместному скоординированному поведению – формированию коалиций для создания более выгодных (читай завышенных) цен на рынке или к изменению условий предоставления услуг, приводящих к росту отрицательных отзывов на продукты, услуги, сервисы в инфраструктуре сервиса со стороны заказчиков.

Здесь мы видим потенциальную готовность участников рынка к отказу от инновационной модели сервиса в пользу традиционного «ретро» механизма получения заявок, чтобы сохранить имеющийся уровень доходов. Таким образом, поиск оптимального соотношения – баланса в хозяйственных отношениях заказчиков и поставщиков с использованием стратегий теории игр является обоснованным.

Как было отмечено ранее, инновационная деятельность предприятий инфраструктуры сервиса не является коалиционной, поэтому, может быть описана инструментами некооперативной теории игр. Приведенные примеры демонстрируют обратное – наличие коалиций. В этой связи, в ситуации олигополий без использования координирующих механизмов со стороны государства, предотвращающих возникновение подобных действий со стороны поставщиков продуктов, услуг, сервисов, принятие заказчиком инфраструктуры с высокой потребительской стоимостью будет тормозиться, что приведет к обесцениванию инноваций.

Таким образом, возрастает актуальность определения оптимальных стратегий, которые предполагают получение заказчиком качественных продуктов, услуг, сервисов по доступной цене, а поставщик получает прибыль и удовлетворенность от выполненной работы. Искомые сочетания стратегий могут быть

представлены в виде соответствующих матриц, решением которых буде выигрыш игроков – уникальный результат, воспринимаемый заказчиком – инфраструктура сервиса с высокой потребительской стоимостью.

Однако, создание исключительно теоретико-игровой модели для оценки эффективности процессов управления инновационной деятельностью предприятий инфраструктуры сервиса в данном случае не является исчерпывающей. Поскольку, помимо глубокого анализа игровых стратегий и факторов, влияющих на взаимодействие сторон необходимо учитывать показатели эффективности таблицы 4, характеризующие состояние основных ресурсов предприятия инфраструктуры сервиса.

В этой связи, для формирования сбалансированной модели оценки эффективности инновационной деятельности предприятий в инфраструктуре сервиса целесообразно использовать методический инструментарий, отражающий взаимодействие хозяйствующих субъектов при условии учета массива факторов, влияющих на успешность продукта, услуги, сервиса и основанный на математических моделях, включающих не только теоретико-игровые, но и модели математического программирования.

В рассматриваемой ситуации поиска показателя эффективности процессов, приводящих к желаемому результату, является задача нахождения оптимальных значений целевой функции, при наличии ограничивающих условий, выраженных в виде линейных уравнений или линейных неравенств, относятся к задачам линейного программирования.

По сути, необходимо найти экстремумы некоторых функций F (значений $\min$ или $\max$ предложенных показателей), характеризующих эффективность использования основных ресурсов для инновационного развития предприятия инфраструктуры сервиса при определенном наборе ограничений, налагаемых на аргументы и образующих систему ограничений, которая имеет, как правило, бесконечное множество решений. При этом, каждая имеющаяся совокупность значений переменных (аргументов функции F), удовлетворяющая системе ограничений, является допустимым планом задачи линейного программирования, а функция F , значения $\max$ или $\min$ которой определяется, называется целевой функцией задачи. Оптимальным планом задачи называется допустимый план, на котором достигается $\max$ или $\min$ функции F .

Система ограничений является индивидуальной и диктуется условиями, в которых происходят процессы взаимодействия хозяйствующих субъектов-заказчиков и поставщиков продуктов, услуг, сервисов в инфраструктуре сервиса.

В общей постановке задача математического программирования выглядит следующим образом:

Имеются какие-то переменные $x_1, x_2, \dots, x_n$ и функция этих переменных $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая носит название целевой функции. Ставится задача: найти экстремум ($\max$ или $\min$) целевой функции $f(x)$ при условии, что переменные x принадлежат некоторой области G :

$$\begin{cases} f(x) \rightarrow \text{ext} \\ x \in G \end{cases} \quad (6)$$

В зависимости от вида функции $f(x)$ и области G и различают разделы математического программирования. Для линейного программирования функция $f(x)$ является линейной функцией переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ и область G определяется системой линейных равенств или неравенств.

В общем случае математическая модель любой задачи линейного программирования включает в себя:

- $\max$ или $\min$ целевой функции (критерий оптимальности);
- систему ограничений в форме линейных уравнений и неравенств;
- требование неотрицательности переменных.

Тогда задача линейного программирования для определения показателей эффективности, характеризующих состояние основных ресурсов предприятия инфраструктуры сервиса сводится к рассмотрению частных случаев для каждого из них.

Задача оценки эффективности успешно реализованных продуктов, услуг, сервисов предприятием инфраструктуры сервиса, воспринимаемых заказчиком может быть представлена в виде таблицы 5.

Таблица 5 – Пример задачи оценки эффективности успешно реализованных продуктов, услуг, сервисов предприятием инфраструктуры сервиса, воспринимаемых заказчиком (предложена авторами)

Продукт, услуга, сервис, предоставляемый предприятием инфраструктуры сервиса и воспринимаемый заказчиком	Количество единиц положительных отзывов на продукты, услуги, сервисы, предоставляемые предприятием инфраструктуры сервиса и воспринимаемых заказчиком				Количество успешно реализованных продуктов, услуг, сервисов предприятием инфраструктуры сервиса, воспринимаемых заказчиком
	B1	B2	...	Bn	
N1	a11	a12	...	a1n	b1
N2	a21	a22	...	a2n	b2
...	...	...	...	...	...
Nn	am1	am2	...	amn	bn
Стоимость единицы продукта, услуги, сервиса	C1	C2	...	Cn	

Здесь a_{ij} – количество единиц положительных отзывов вида N_i на продукты, услуги, сервисы, предоставляемые предприятием инфраструктуры сервиса и

воспринимаемые заказчиком, оставленных на одну единицу продукта вида B_j .

$$\begin{aligned} x_1 \text{ ед.} &\rightarrow B_1; \\ x_2 \text{ ед.} &\rightarrow B_2; \\ &\dots; \\ x_n \text{ ед.} &\rightarrow B_n. \end{aligned}$$

Конечная цель решаемой задачи – получение максимального положительного эффекта предприятием инфраструктуры сервиса – лояльности клиентов при реализации продуктов, услуг, сервисов, воспринимаемых заказчиком, выраженная в виде целевой функции:

$$F(x) = c_1x_1 + \dots + c_nx_n \rightarrow \max \quad (7)$$

При ограничениях:

$$\left\{ \begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\ &\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \end{aligned} \right.$$

Задача оценки эффективности реализации по новым продуктам, услугам, сервисам предприятия инфраструктуры сервиса может быть представлена в виде таблицы 6.

Таблица 6 – Пример задачи оценки эффективности реализации по новым продуктам, услугам, сервисам предприятия инфраструктуры сервиса (предложена авторами)

Продукт, услуга, сервис, реализуемый предприятием инфраструктуры сервиса и воспринимаемый заказчиком	Количество единиц, реализованных предприятием инфраструктуры сервиса инновационных продуктов, услуг, сервисов, имеющих положительные эффекты в экономической, научно-технической, социальной, экологической сферах				Количество реализованных предприятием инфраструктуры сервиса инновационных продуктов, услуг, сервисов
	D1	D2	...	Dn	
K1	e11	e12	...	e1n	d1
K2	e21	e22	...	e2n	d2
...	...	...	...	...	...
Kn	em1	em2	...	emn	dn
Стоимость единицы продукта, услуги, сервиса	C1	C2	...	Cn	

Здесь e_{ij} – количество единиц, реализованных предприятием инфраструк-

Здесь o_{ij} – количество единиц, реализованных предприятием инфраструктуры сервиса инновационных продуктов, услуг, сервисов в денежном выражении вида L_i на продукты, услуги, сервисы, предоставляемых предприятием инфраструктуры сервиса и воспринимаемых заказчиком, оставленных на одну единицу продукта вида E_j .

$$\begin{aligned} z_1 \text{ ед.} &\rightarrow E_1; \\ z_2 \text{ ед.} &\rightarrow E_2; \\ &\dots; \\ z_n \text{ ед.} &\rightarrow E_n. \end{aligned}$$

Конечная цель решаемой задачи – максимизация эффективности оборота предприятия от реализации новых продуктов, услуг, сервисов, которая выражается в виде целевой функции:

$$F(z) = c_1 z_1 + \dots + c_n z_n \rightarrow \max \quad (9)$$

При ограничениях:

$$\left\{ \begin{aligned} o_{11}z_1 + o_{12}z_2 + \dots + o_{1n}z_n &\leq k_1 \\ o_{21}z_1 + o_{22}z_2 + \dots + o_{2n}z_n &\leq k_2 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ o_{m1}z_1 + o_{m2}z_2 + \dots + o_{mn}z_n &\leq k_m \end{aligned} \right.$$

Задача оценки эффективности инвестиций в создание новых продуктов, услуг, сервисов предприятиями инфраструктуры сервиса, может быть представлена в виде таблицы 8.

Таблица 8 – Пример задачи оценки эффективности инвестиций в создание новых продуктов, услуг, сервисов предприятиями инфраструктуры сервиса (предложена авторами)

Созданный предприятием инфраструктуры сервиса новый продукт, услуга, сервис	Количество единиц новых продуктов, услуг, сервисов, созданных предприятием инфраструктуры сервиса				Затраты предприятия инфраструктуры сервиса, связанные с производством и реализацией новых продуктов, услуг, сервисов
	Q1	Q2	...	Qn	
S1	u11	u12	...	u1n	q1
S2	u21	u22	...	u2n	q2
...	...	...	...	...	...

Показатели	Определение показателя	Целевая функция
Эффективность проведения предприятия инфраструктурой сервиса экспансии при реализации новых инновационных продуктов, услуг, сервисов	Определяется из соотношения величины прибыли, полученной предприятием инфраструктурой сервиса от реализации новых инновационных продуктов, услуг, сервисов и вложенных в них инвестиций	$F(z) = c_1 z_1 + \dots + c_n z_n \rightarrow \max$ При ограничениях: $\begin{aligned} o_{11} z_1 + o_{12} z_2 + \dots + o_{1n} z_n &\leq g_1 \\ o_{21} z_1 + o_{22} z_2 + \dots + o_{2n} z_n &\leq g_2 \\ &\dots\dots\dots \\ o_{m1} z_1 + o_{m2} z_2 + \dots + o_{mn} z_n &\leq g_m \end{aligned}$

Анализируя представленный инструментарий и методику оценки эффективности процессов инновационного развития подсистем инфраструктуры сервиса, отметим, что она ориентирована на комплексный анализ факторов, влияющих на развитие социально ответственных услуг в долгосрочной перспективе. Данный подход способствует формированию и развитию сбалансированной системы связей заказчик-поставщик услуг в инфраструктуре сервиса в условиях развития цифровой экономики.

Заключение

Развитием экономико-математической теории инфраструктуры сервиса может быть детализация графо-структурной модели проблем сервиса, разбиение на отдельные деревья или сетевые графики этой модели, для решения проблем по-отдельности, чтобы в итоге прийти к обобщающим закономерностям.

К методам экономико-математического моделирования инфраструктуры сервиса так же относится задача поиска балансов заказчик-исполнитель, покупатель-продавец и т.п. Эта задача решается методом оптимизации на $\min \max$ с применением методов линейной алгебры или методами из теории игр.

Сложность описания экономико-математических моделей также усугубляется отсутствием общепринятого описания математического аппарата.

Литература

1. Беляев С.А., Бушина Н.С., Быстрицкая А.Ю., Власова О.В., Головин А.А., Головин А.А., Жилин В.В., Зюкин Д.А., Колтышева Е.В., Конопля А.А., Наджафова М.Н., Овод А.И., Овчинникова О.А., Олейникова Т.А., Перькова Е.Ю., Пожидаева Н.А., Пыжова Е.В., Репринцева Е.В., Сергеева Н.М., Святова О.В. и др. Методы статистики и возможности их применения в социально-экономических исследованиях. Курск, 2021. 168 с.
2. Вартанов С.А., Ивин Е.А. Прикладная теория игр для экономистов: учеб. пособие для вузов. Вологда: ВолНЦ РАН, 2020. 285 с.
3. Васютинский И.Ю., Шайтура А.С. Информационно-аналитические системы в управлении стоимостью предприятия // Славянский форум. 2012. № 1(1). С. 159-164.
4. Гаврилова В.В., Шайтура С.В., Сумзина Л.В. Геоинформационные сервисы в пространственной экономике // Славянский форум. 2018. № 1(19). С. 118-129.

5. Глухов В.В. Медников М.Д., Коробко С.Б. Математические методы и модели для менеджмента. СПб.: «Лань», 2000.
6. Кожаев Ю.П., Веревкин Л.П. Методы моделирования и прогнозирования развития малых предприятий // Славянский форум. 2013. № 2(4). С. 118-134.
7. Кожаев Ю.П., Шайтура С.В. Управление ресурсами предприятий – Учебное пособие. Бургас, 2016. 107 с.
8. Кожаев Ю.П., Шаньгин А.Е., Шайтура С.В. Анализ туристических Интернет-ресурсов Крымского полуострова / В сборнике: Организационно-экономический механизм управления опережающим развитием регионов. 2016. С. 39-46.
9. Коробочкин М.И., Калинова Е.В. Математические модели и информационные технологии ранжирования социальных услуг // Славянский форум. 2013. № 1(3) С. 47-55.
10. Майлс Й. Сервисные инновации в XXI веке // Форсайт. 2011. Т. 5. № 2. С. 4-15.
11. Математическое программирование в примерах и задачах: Учебное пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2011. 352 с.: ил.
12. Прудкий А.С., Шайтура Н.С. Геоинформационный сервис в точном земледелии // Славянский форум. 2023. № 1(39). С. 341-349.
13. Розенберг И.Н., Шайтура С.В., Цветков В.Я. Методы и программные средства информационного сервиса в информационных и пространственных полях. Сборник научных трудов. Бургас, 2020. 177 с.
14. Советов В.М., Артюшенко В.М. Основы функционирования систем сервиса: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 100101 «Сервис». М.: Издательский Дом «Альфа-М», 2010. 624 с.
15. Сумзина Л.В., Шайтура С.В. Геоинформационные сервисы инфраструктуры пространственных данных. Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2018. № 9. С. 90-97.
16. Сумзина Л.В., Шайтура С.В. Геоинформационный сервис как составная часть обучения конструкторов // Конструкторское бюро. 2018. № 1(132). С. 64-74.
17. Сумзина Л.В., Шайтура С.В. Подготовка кадров по геоинформационному сервису // Отходы и ресурсы. 2017. Т. 4. № 3. С. 9.
18. Федюлин А.А. О геоинформационном сервисе // Славянский форум 2017. № 3(17). С. 7-13.
19. Филиппченко А.М. Математические методы решения задач формирования баланса интересов хозяйствующих субъектов // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. 2011. № 6. С. 90-95.
20. Цуцурин В.Д., Шайтура С.В. Муниципальная ГИС города Бургас // Славянский форум. 2013. № 1(3). С. 107-114.
21. Шайтура А.С. Гибкое управление предприятиями // Славянский форум. 2021. № 2(32). С. 262-271.

22. Шайтура С.В., Жаров В.Г., Феоктистова В.М., Ордов К.В., Тараненко Е.А., Илларионова Е.А. Сфера услуг в экономике Китая // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3. С. 100-110.
23. Шайтура С.В., Кожаев Ю.П. Геоинформатика автомобильного транспорта // Славянский форум. 2019. № 3(25). С. 379-386.
24. Шайтура С.В., Кожаев Ю.П. Транспортные экосистемы // Славянский форум. 2023. № 2(40). С. 226-233.
25. Шайтура С.В., Минитаева А.М., Жаров В.Г., Иванова В.В. Критерии эффективности сервиса // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 1. С. 137-143.
26. Шайтура С.В., Ордов К.В., Жаров В.Г., Малицкая Ю.О., Коломейцев А.В., Мадьяров А.А. Вопросы управления в отраслях сферы услуг // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3. С. 131-137.
27. Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Букаева И.Н. Управление сельскохозяйственными предприятиями на основе их стоимости // Отходы и ресурсы. 2023. Т 10. № 3.
28. Шестоперов С.А. Сравнительный анализ использования теории массового обслуживания и теории игр в процессе проектирования предприятия сферы сервиса // Известия Международной академии аграрного образования. 2021. № 54. С. 190-192.

УДК 004.05

Особенности проявления системной проблемы слабого звена в технике структурированного каблирования

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет
Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва,

Владимир Михайлович Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В рамках системного подхода осуществлен анализ горизонтальной подсистемы структурированной проводки как сложной технической системы. С привлечением типовых параметров действующих стандартов построена модель горизонтального кабельного тракта, реализованного на витопарной элементной базе. Определена шенноновская пропускная способность типовых конфигураций кабельных трактов максимальной протяженности с категорией вплоть до 7а. Сделан вывод о разъемном соединителе как слабом звене и необходимости реализации сетевого интерфейса совместно с кабельным трактом как единого комплекса для гарантированного обеспечения скорости передачи 10 Гбит/с.

Структурированные кабельные системы, системный подход, слабое звено, шенноновская пропускная способность, кабельный тракт, верхняя граничная частота.

Features of the manifestation of the systemic problem of the weak link in the structured cabling technique

Andrey Borisovich Semenov, Doctor of Technical Sciences, professor,
National Research University Moscow State University of Civil Engineering
(NRU MGSU), Moscow,

Vladimir Mikhailovich Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor, Head
of the Department of Information Technologies and Control Systems,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Within the framework of the system approach, the horizontal subsystem of structured wiring as a complex technical system is analyzed. Using the standard parameters of the current standards, a model of a horizontal cable channel implemented

on a twisted pairs element base is constructed. The Shannon capacity of typical configurations of cable channel of maximum length with a category up to 7a is determined. The conclusion is made about a detachable connector as a weak link and the need to implement a network interface together with a cable channel as a single complex to ensure a guaranteed transmission rate of 10 Gbit/s.

Structured cabling systems, system approach, weak link, Shannon capacity, cable channel, upper boundary frequency.

Введение. На объектах недвижимости различного назначения с постоянным или длительным пребыванием людей в обязательном порядке создаются различные инженерные системы, наличие которых делает пребывание на этом объекте максимально комфортным в широком смысле этого термина. В реалиях сегодняшнего дня к «классическим» системам водо- и электроснабжения, канализации, вентиляции, противопожарной защиты и иным добавляется развитая информационно-телекоммуникационная система (ИТС). Последняя предоставляет пользователям разнообразные виды сервисы в части хранения, обработки и передачи информации.

Сама ИТС создается в соответствии с проверенной временем моделью взаимодействия открытых систем OSI, а ее нижний физический уровень может быть реализован на различных принципах. В силу целого комплекса причин, обсуждение которых выходит за рамки излагаемого материала, доминирующее положение в этой области занимают кабельные решения, а средства беспроводного доступа по открытым каналам применяются в отдельных нишевых областях. Решение об обращении к таковым принимается там, где прокладка кабелей физически невозможна или нецелесообразна по тем или иным причинам.

В реалиях сегодняшнего дня информационная проводка реализуется в виде структурированной кабельной системы (СКС), основные постулаты построения которой задаются профильными стандартами. Особенности конкретных объектов недвижимости определенных классов, на которых разворачивается ИТС, учитываются введением соответствующих расширений или ужесточением базовых положений как на компонентном, так и на системном уровнях. В основу любой СКС положены однотипные подходы, что выгодно всем участникам процесса ее создания и последующей эксплуатации. Одновременно данная особенность позволяет вести ее анализ с общих позиций.

Истоки появления проблемы слабого звена в технике СКС. СКС даже среднего масштаба является полноценной сложной технической системой. Приведем только некоторые соображения, обосновывающие справедливость этого утверждения. Они заключаются в следующем:

- законченная строительством структурированная проводка даже среднего масштаба насчитывает в своем составе несколько тысяч отдельных компонентов, плотно взаимодействующих между собой на сигнальном и механическом уровнях;

- любая СКС является индивидуальным проектом, технико-экономическая эффективность которого наращивается максимально полным учетом архитектурных особенностей здания как объекта установки, структурных особенностей организации-заказчика проекта и основной области ее деятельности;

- производитель кабельной системы в абсолютном большинстве случаев не выполняет полный цикл работ по созданию СКС, а непосредственное взаимодействие с заказчиком проекта всегда осуществляет подрядная организация, что автоматически расширяет перечень участников.

В соответствии с постулатами системного подхода любая сложная техническая система имеет слабое звено. Отсюда немедленно вытекает одно из базовых положений теории системного анализа, которое утверждает, что достижение высокой потребительской ценности подобной системы невозможно без ее устойчивости относительно слабого звена [5].

Наличие слабого звена в явном виде признается нормативными документами СКС: согласно стандарту ISO/IEC 11801:2017 класс кабельного тракта в общем случае определяется наименьшей категорией одного из тех компонентов, из которых он сформирован.

Де-факто СКС создавалась из компонентов, уже известных к моменту формирования ее концепции. Таким образом, в системном смысле этого термина их углубленная целенаправленная адаптация друг к другу не проводилась. В таких условиях появление в системе слабого звена становится просто неизбежным фактом.

СКС как система представляет собой совокупность отдельных стационарных линий, которые в процессе формирования трактов передачи информации от разъема до разъема активного сетевого оборудования соединяются друг с другом и подключаются к портам индивидуальных и групповых устройств коммутационными шнурами. Таким образом, сигнал-переносчик проходит через ряд последовательно включенных компонентов. При этом:

- стандарты декларируют открытый характер любого кабельного тракта: последний может быть составлен из элементов различных производителей;
- сами нормативные документы задают только минимальный уровень передаточных характеристик отдельных компонентов,
- при разработке норм принимается во внимание некоторый усредненный уровень техники и не учитывают технологические возможности конкретного изготовителя в части наращивания качества поставляемой продукции.
- ориентация стандартов на параметры полного тракта передачи или стационарной линии как его главной составной части приводит к тому, что передаточные параметры любого отдельно взятого элемента всегда превышают параметры собираемого из них полного кабельного тракта.

Совокупность этих факторов означает, что в любом тракте можно выделить слабое звено.

В качестве иллюстрации первого утверждения формально можно сослаться на технику категории 6, верхняя граничная частота тракта на основе ко-

торой установлена равной 200 МГц. При этом характеристики образующих его отдельных компонентов нормируются в частотном диапазоне уже до 250 МГц.

Расчетная модель и шенноновская пропускная способность горизонтального кабельного тракта. В передатчике и приемнике современного высокоскоростного (1 Гбит/с и выше) сетевого интерфейса применяется сложная подготовка/обработка передаваемого и принимаемого сигнала, соответственно. Цель проводимых процедур – максимально полно использовать потенциальную пропускную способность витопарного горизонтального кабельного тракта СКС. В качестве численной меры этого параметра используем полную шенноновскую пропускную способность W , которая применительно к кабельным трактам с электрической длиной L находится как

$$W(L) = 4 \cdot \int_1^{f_b} \log_2 [1 + ACR(f, L)] df,$$

где $ACR(f, L)$ – отношение сигнал/шум, а f_b – верхняя граничная частота тракта, задаваемая в МГц.

Коэффициент перед интегралом учитывают принятую в высокоскоростных сетевых интерфейсах схему дуплексной параллельной передачи по четырем витым парам одновременно. Рекомендуются IEEE эксплуатационные запасы в данном случае во внимание не принимаем.

Величину f_b определим как решение уравнения

$$PS - GNX(f, L) - IL(f, L) = 0 \text{ dB},$$

где $GNX(f, L)$ – уровень помехи, а $IL(f, L)$ – вносимое затухание.

Дальнейшие расчеты выполняются для наиболее сложного случая в смысле обеспечения заданных спецификациями качественных показателей функционирования сетевого интерфейса. Принимается, что последний использует для передачи данных 4-коннекторный горизонтальный тракт со следующей конфигурацией:

- длина инсталляционного (линейного) кабеля 90 м;
- суммарная длина шнуровых изделий для подключения оборудования и выполнения отображения его портов в коммутационное поле 10 м;
- схема коммутации кроссконнекта;
- наличие консолидационной точки.

Рассматривается только техника категории не выше 7а, т.к. кабельные тракты класса G (категории 8) в обоих вариантах их исполнения имеют предельную протяженность не выше 28-32 м в зависимости от конфигурации [2] с возможностью увеличения до 50 м в случае снижения скорости до 25 Гбит/с [3].

Схема модельного тракта показана на Рисунок 1, а его электрическая длина

L с учетом нормируемого ISO/IEC 11801:1-2017 повышенного в 1,5 раза погонного затухания шнуровых кабелей с гибкой 7-проволочной жилой витых пар находится как

$$L = L_{cable} + 1,5 \cdot L_{cord},$$

где: L_{cable} – физическая длина линейного кабеля ($L_{cable} < 90$ м); L_{cord} – физическая суммарная длина шнуровых кабелей ($L_{cord} < 10$ м).

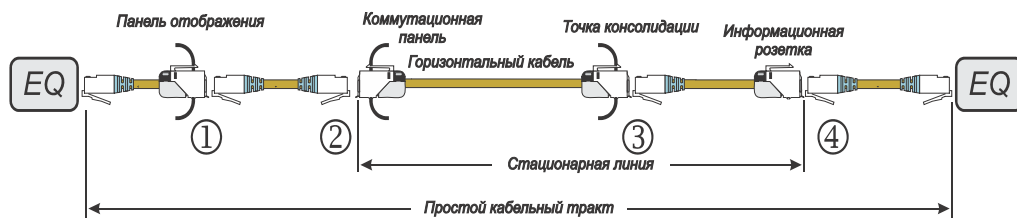


Рисунок 1 – Схема 4-коннекторного горизонтального тракта СКС, обеспечивающего передачу сигнала от разъема до разъема активного сетевого оборудования EQ. Цифрами обозначены разъемные соединители, учитываемых при определении отношения сигнала к шуму на входе решающего устройства интерфейса сетевого оборудования EQ

«Сигнальная» составляющая отношения сигнала к шуму задается вносимыми потерями IL в кабелях и разъемах и, соответственно, определена в стандартах СКС для 4-коннекторного ($n = 4$) горизонтального тракта как

$$IL(f, L) = 1,05 \cdot \frac{L}{100} \left(a\sqrt{f} + b \cdot f + c/\sqrt{f} \right) + n \cdot \sqrt{f}.$$

При этом предполагается, что возможный эффект абсорбции, который в некоторых случаях наблюдается в верхней части рабочего частотного диапазона, Рисунок 2 подавлен технологическими приемами и не оказывает влияния на частотную характеристику затухания.

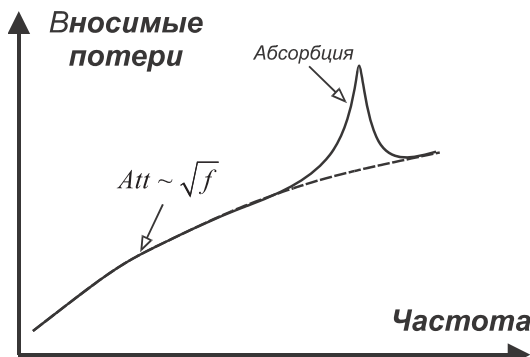


Рисунок 2 – Эффект абсорбции симметричного кабельного тракта

«Шумовая» составляющая отношения сигнала к шуму определяется переходной помехой ближнего и дальнего конца (на ближний и дальний конец). Источники сигнала, создающие соответствующие им токи наводок, функционируют независимо друг от друга, Рисунок 3.

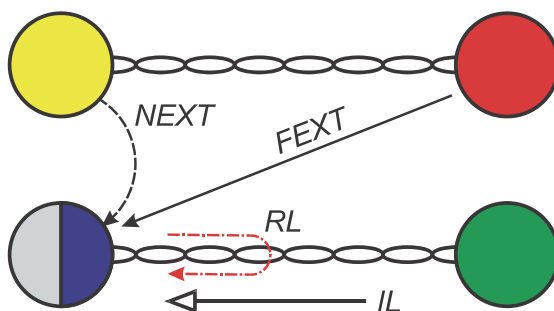


Рисунок 3 – Разновидности помеховых составляющих симметричного тракта и потери в линии

В результате угол сдвига фаз между токами этих помеховых составляющих носит случайный характер, испытывает значительные изменения даже при небольших вариациях частоты, а также протяженности тракта. Это обстоятельство позволяет в процессе дальнейших рассуждений исходить из гипотезы равномерного распределения этого угла на отрезке $[0; 180^\circ]$.

Равномерность распределения фазы на отрезке $[0; 180^\circ]$, в свою очередь является основанием для того, чтобы заложить в выполняемые расчеты закон суммирования токов помех по их мощности. Это утверждение непосредственно вытекает из следующей простой выкладки, при записи которой использована система обозначений, Рисунок 4.

$$| \overline{A, C} | = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi [(a + b \cdot \cos \xi)^2 + (b \cdot \sin \xi)^2] d\xi} = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

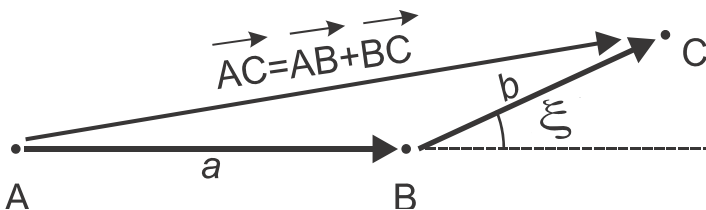


Рисунок 4 – Модели суммирования отдельных частотных составляющих переходной помехи ближнего и дальнего концов симметричного тракта

Для описания частотной зависимости суммарного переходного затухания на ближнем *PS-NEXT* и дальнем *PS-FEXT* концах (переходного затухания суммарной мощности влияния по терминологии ГОСТ Р 54429-2001) целесообразно воспользоваться расчетными соотношениями базовых стандартов СКС. Для *PS-NEXT* оно записывается непосредственно как

$$PS - NEXT(f) = -20 \lg \left(10^{\frac{PS-NEXT0 - 15 \lg(f)}{-20}} + NN \cdot 2 \times 10^{\frac{PS-NEXT1 - k \cdot \lg(f)}{-20}} \right),$$

где *PS-NEXT0* – суммарное переходное затухание на ближнем конце для кабеля на частоте 1 МГц; *PS-NEXT1* – суммарное переходное затухание на ближнем конце для разъема на частоте 1 МГц; $k = 20$ для техники всех категорий за исключением 7, для которой в соответствии с требованиями стандартов принимается $k = 15$; *NN* – дискретный параметр, равный 1 для полного кабельного тракта и 0 для кабеля.

Фактические значения параметров *PS-NEXT0* и *PS-NEXT1* в процессе расчетов заимствуются из нормативной части стандартов.

Отдельно укажем на то, что переходная помеха на заданной частоте, определяемая кабелем и разъемами, согласно идеологии стандартов суммируется по напряжению. Де-факто суммирование происходит скорее по мощности, что несколько снижает влияние помехи на качество передачи. Имеющуюся разницу не оцениваем и рассматриваем как запас расчета.

Расчетные выражения для определения частотной зависимости переходного затухания на дальнем конце в стандартах не приводятся из-за сильного влияния на эту характеристику физической протяженности тракта. Тем не менее, соответствующее расчетное соотношение легко находится из определения защищенности как

$$PS - FEXT(f) = PS - ACRF(f) + IL(f, L).$$

В данном случае

$$PS - ACRF(f) = -20 \lg \left(10^{\frac{PS-FCAB-15 \lg(f)}{-20}} + NN \cdot 4 \times 10^{\frac{PS-FCON-k \cdot \lg(f)}{-20}} \right),$$

где: $PS-FCAB$, $PS-CON$ – значение суммарной защищенности на дальнем конце на частоте 1 МГц, определяемое кабелями (линейным и шнуровым) и соединителями, присутствующими в составе тракта, соответственно; $k = 20$ для техники всех категорий за исключением 7, для которой аналогично предыдущему случаю принимается $k = 15$.

Фактические значения параметров $PS-NEXT0$ и $PS-FCAB$ в процессе расчетов заимствуются из нормативной части стандартов.

В соответствии с квадратичным законом суммирования переходной помехи ближнего и дальнего концов кабельного тракта уровень общей переходной помехи при единичном входном воздействии находим как

$$PS - GNX(f) = -20 \lg \sqrt{\left(10^{\frac{PS-NEXT(f)}{-20}} \right)^2 + \left(10^{\frac{PS-FEXT(f)}{-20}} \right)^2}.$$

В качестве $ACR(f)$ принимается величина

$$ACR(f) = 10^{\frac{PS-GNX(f,L)-IL(f,L)}{20}}.$$

Отдельно укажем на то, что в реальном кабельном тракте существует также помеха, создаваемая структурными неоднородностями витых пар линейного и шнуровых кабелей, а также отражениями от сосредоточенных неоднородностей, образуемых неизбежными нарушениями фабричной скрутки витых пар в местах подключения элементов разъемного соединителя к кабелям. Мешающее воздействие данной разновидности эффективно подавляется сетевым интерфейсом в процессе предварительной обработки смеси сигнала с шумом перед подачей на решающее устройство.

Расчеты показывают, что с учетом достигнутого уровня техники после обработки смеси сигнала с шумом помеха, создаваемая неоднородностями, носит второстепенный характер на фоне помех от наводок и по крайней мере в первом приближении не оказывает значимого влияния на получаемый результат. По этой причине в дальнейшем эту шумовую составляющую можно не принимать во внимание и не учитывать при разработке модели.

Результаты расчетов и их анализ. Приведенные выше соотношения достаточно сложны и по этой причине плохо поддаются качественному анализу в аналитической форме. Поэтому конкретные расчеты выполнялись в дальнейшем

в среде MathCad. Их результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Теоретическая шенноновская пропускная способность,
Гбит/с для 100-метровых симметричных кабельных трактов СКС
с различной конфигурацией**

Категория тракта	NN = 1			NN = 0	W(NN=0)/ W(NN=1)
	n = 2	n = 3	n = 4		
5e	1,87	1,64	1,60	2,30	1,44
6	3,33	2,96	2,91	3,96	1,36
6a	3,55	3,14	3,09	4,27	1,38
7	9,45	8,31	8,18	11,72	1,43
7a	10,82	9,42	9,28	14,05	1,51

Данные таблицы позволяют утверждать, что слабым звеном горизонтального кабельного тракта в системном смысле этого термина является разъемный соединитель. Действительно, при общей физической длине соединителя не выше 10 см (фактически любой соединитель по крайней мере в первом приближении вполне может рассматриваться как точечный компонент) создаваемая им помеха примерно в 1,5 раза снижает общую шенноновскую пропускную способность кабельного тракта общей протяженностью 100 м.

Одновременно можем констатировать системную устойчивость СКС относительно слабого звена. Справедливость этого утверждения непосредственно следует из того, что изменение на единицу числа разъемов в составе тракта меняет общую пропускную способность в большинстве случаев не более чем на 15% (переход от случая $n = 3$ к $n = 2$, т.е. популярный на практике отказ от схемы кросс-коннекта в пользу интерконнекта).

Из представленных в таблице результатов прямо вытекает, что скорости выше 1 Гбит/с передача информации по симметричным кабельным трактам максимальной длины в случае их реализации на неэкранированной технике может осуществляться только при условии аппаратного подавления переходных помех. Иначе говоря, линия связи локальной сети должна изначально проектироваться как единый комплекс из пассивного и активного сетевого оборудования.

Обращает на себя внимание относительно небольшое преимущество по параметру W шенноновской пропускной способности рекомендуемой многими производителями для применения в проектах техники категории 6a над своим предшественником категорией 6. Данный факт объясняется тем, что 6a получена из 6 как прототипа, а усовершенствования во многом свелись фактически к расширению рабочего частотного диапазона и соответствующей пересертификации элементной базы.

О необходимости внедрения новых типов разъемов. Первые редакции стандартов предполагали возможность применения в составе структурированной проводки только модульного разъема. В дальнейшем номенклатура допустимых типов была расширена и в настоящее время включается в себя наряду с модульным разъемом также Tera и GG45.

Отдельно укажем на то, что тип разъема фиксирован в отношении только пользовательской информационной розетки, т.е. ограничение по номенклатуре типов носит относительно мягкий характер. Этим фактом пользуются некоторые производители СКС. Например, немецкая компания Leoni предлагает использование соединителя EC7 со штыревыми контактами, расположенными по квадратной схеме, с улучшенными частотными свойствами и параметрами влияния. Форм-фактор разъема позволяет при необходимости устанавливать его в пользовательской информационной розетке. Из аналогичных соображений был разработан также ARJ45, который допустимо рассматривать как модифицированный вариант GG45, Рисунок 5.

Известны также разработки разъемов «телефонного типа» с характеристиками категории 6. Примерами таких изделий являются S210 компании Siemon и Giga-PUNCH компании Panduit [4]. Целесообразность их внедрения обосновывалась простотой доступа к отдельно взятой паре, что актуально для телефонной сети предприятия.

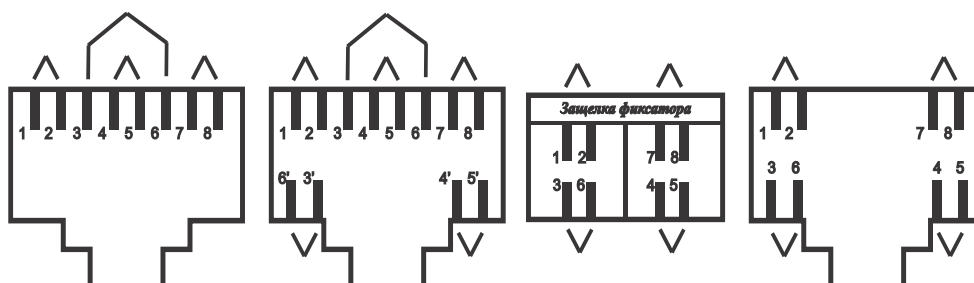


Рисунок 5 – Варианты расположения контактов и раскладки по ним проводов отдельных витых пар стандартных разъемов СКС.
Слева направо: модульный разъем, GG45, Tera, ARJ-45

Слабым звеном кабельного тракта в части обеспечиваемых им передаточных параметров естественным образом становится разъем модульного типа. В случае отказа от него в пользу, например, Tera или GG45, которые изначально создавались для работы в составе кабельных трактов категории не ниже 7, пропускная способность немедленно увеличивается вдвое при сопоставимых верхних граничных частотах (500 МГц у техники категории 6а и 600 МГц у техники категории 7).

Причина такого положения дел состоит в том, что, верхняя граничная частота исходного варианта разъема модульного типа равнялась всего 3 МГц. Однако, высокая дружелюбность к пользователю этого типа соединителя привела к тому, что этот параметр был увеличен почти на три порядка и у техники категории 8.1 достигает 2 ГГц [2]. При этом недостатки рядного расположения контактов и охвата парой 3-6 контактов 1-2 из-за необходимости обратной совместимости со схемой USOC никуда не исчезли, что вынуждает применять при конструировании разъема ряд сложных конструктивных решений.

Заключение

1. При рассмотрении с позиций классического системного анализа разъемные соединители, неизбежно присутствующие в составе кабельных трактов горизонтальной подсистемы СКС и делающие структурированную проводку максимально удобной для текущей эксплуатации, представляют собой типичное слабое звено, снижающее предельную пропускную способность примерно на 40-50%.

2. Все без исключения разъемные соединители, применяемые в СКС, при их рассмотрении под углом зрения слабого звена обеспечивают уровень системной устойчивости структурированной проводки в части гарантируемых параметров передачи и влияния, достаточный для нормальной эксплуатации.

3. В обоснованных случаях редкого выполнения коммутации, например, в информационных системах промышленного назначения, разъем можно целенаправленно исключить из состава кабельного тракта, а полученный в результате этого значимый практически 1,5 кратный выигрыш по пропускной способности направить на компенсацию повышенного уровня помех, характерного для указанной области применения, или на решение иных задач в зависимости от конкретной ситуации.

4. На скоростях свыше 10 Гбит/с неизбежно возрастает значение экранированной техники и обозначается тренд на отказ от модульного разъема в пользу соединителей типов Тера и GG45.

Литература

1. Семенов А. СКС категории 8 // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 5. С. 52-57.
2. Семенов А. 25 Gigabit Ethernet и структурированная проводка // Журнал сетевых решений LAN. 2018. № 2. С. 44.
3. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы / Саратов: Профобразование, 2017. 640 с. ил.
4. Семенов А., Макуев А., Фомичев Б. Структурированные кабельные системы категории 8 // Первая миля. 2016. № 5(58). С. 58-62.
5. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. пособие / Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2006. 848 с.: ил.

УДК 004.942

**Корреляционная зависимость подсистем инновационного развития
предприятий с учетом особенностей их корпоративного
взаимодействия на отраслевом и региональном уровне**

Николай Антонович Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Финансы и менеджмент»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула,
Сергей Николаевич Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляющих систем»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В системе развития территорий функционируют предприятия разного вида по отраслям и предметной специализации; их производственная деятельность различается разными моделями хозяйствования, а реализуемые ими проекты имеют разнообразные формы инвестирования, инженерингово сопровождения, и как следствие разных возможностей инновационного развития.

Инновации, модели и методы развития предприятия, инвестиции, рейтинги, корреляция, виды проектов.

**Correlation dependence of subsystems of innovative development
of enterprises, taking into account the peculiarities of their corporate
interaction at the sectoral and regional level**

Nikolai Antonovich Shulzhenko, doctor of technical sciences, professor of the department of finance and management,
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education
«Tula state university», Tula,
Sergey Nikolaevich Shulzhenko, doctor of technical sciences, professor of the department of information technologies and control systems,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

In the system of territorial development, enterprises of different types by industry and subject specialization function; their production activities are characterized by different business models, and the projects they implement have different forms of investment, engineering support, and as a result of different opportunities for innovative development.

Innovations, models and methods of enterprise development, investments, ratings, correlation, types of projects.

На современном этапе развитие отраслей народного хозяйства РФ наблюдается активный переход предприятий к инновационному развитию. Естественно, на огромной территории РФ, где разнообразие природно-климатических условий резко отличает подходы к реализации сценария внедрения инноваций, затруднительно разработать и внедрить целевую методику реализации программы «интеллектуальная индустриализации». Однако по отдельным ситуациям можно отследить по состоянию оценки эффективности использования регионального инновационного потенциала, который является одним из факторов развития регионов и страны в целом.

Например, состояние регионального инновационного потенциала возможно представить в виде модели инновационного развития региона, на примере Тульской области [4], представленной на рисунке 1.



Рисунок 1 – Модель системы инновационного развития Тульской области

Представленная модель включает четыре основных подсистемы: инвестиционная подсистема, предусматривает возможные источники формирования инвестиционного обеспечения региональных программ и поддержки инновационных проектов; вторая подсистема – развитие предприятий среднего и малого бизнеса, мощности данного сектора в конкурентной основе, предполагают высокий процент освоенных nano технологий; третья подсистема предполагает наличие и реализацию кадрового потенциала подготовки и распределения специалистов соответствующего профиля и подпрограмму ресурсного использования логической схемы и высокотехнологичных композитных материалов. Рассмотрим

алгоритмы отмеченных подсистем подробнее.

В подсистеме инвестиционного обеспечения предприятия регионального уровня получают финансовую и кадровую подпитку на основе бюджетной доли отраслевых и региональных отчислений. В среднем, промышленность области составляет 43% валового регионального продукта. Например, по Тульской области поддержка бизнеса после антироссийских ограничений [1]. За 2022 год сумма финансирования средств ФРП составила 321,7 млн.руб. Капитализация этого фонда на начало 2023 года составила 619,6 млн.руб. Фонд за год получил субсидию из бюджета региона на осуществление финансовой поддержки на 159,3 млн.руб., то есть в 2,8 раза больше, чем в 2021 году. Итоги роста показывают, что это основной инструмент поддержки и развития региональных инициатив, направленных на инновационное развитие промышленных предприятий.

Фонд не единственный инструмент поддержки развития инноваций. В 2023 году область планирует участие в конкурсном отборе на получение единой региональной субсидии из федерального бюджета, в целях докапитализации мероприятий государственной программы «Развитие промышленности в Тульской области». Одним из эффективных средств внедрения элементов инновационного развития является участие в федеральных программах за счет создания образовательно-производственных кластеров. В Тульской области в 2022-2023 гг. было создано несколько таких кластеров химической отрасли в партнерстве с ведущими российскими компаниями «Щекиназот», «Пластик», «Еврохим», а также кластеры в отраслях туризма и сфер услуг, средствах массовой информации и коммуникационных технологиях. По итогам 2022 года одобрены и получили развитие еще 29 проектов инновационных технологий на сумму более 3,7 млрд.руб. Среди основных мероприятий по финансовой поддержке можно выделить те, которые по решающим принятым по их разработке принимают не региональные, а федеральные власти. В выигрышном положении оказываются субъекты РФ, на территории которых есть системообразующие предприятия с большим научно-исследовательским потенциалом. С 2014 г. самые серьезные инвестиции направлялись в отрасли, связанные с обеспечением вопросов безопасности, фармацевтики, пищевой промышленности и машиностроения. Общий объем инвестиций по подпрограмме на реализацию инновационных проектов рассчитывается после согласования портфеля заказов региональных проектов.

Чтобы оценить корреляционную зависимость подсистем инновационного развития, необходимо разработать экономико – математическую модель для оценки инвестиционного проекта. Финансирование предпринимательства может быть одним из эффективных вариантов. Однако, стоит учесть, что такой подход может привести к увеличению муниципальных и государственных расходов и нагрузки на бюджет. Но в тоже время, это может стимулировать банки выдавать больше кредитов, даже если у предприятий могут возникнуть проблемы с их возвратом. Возможно, более эффективно было бы создать специальные фонды, которые могли бы компенсировать потери банкам в случае невозврата кредитов предпринимателями. Такие фонды могли бы формироваться за счет части прибыли банков, страховых взносов или других источников.

Необходимость подобных инвестиций обусловлена тем, что амортизационных отчислений, производимых предприятиями недостаточно для обновления их основных фондов [5]. В тоже время, продукция, производимая данными предприятиями, пользуется определенным спросом. Данная величина является базовой при расчете общего объёма необходимых инвестиций в экономику региона. Расчет ее производится на основе имеющихся статических данных о состоянии основных фондов и капитальных вложений в пределах Тульской области.

Прежде чем приступать к расчетам, необходимо определить несколько ограничений на выделение инвестиций:

1. Вложенные средства должны способствовать нормализации воспроизводственного процесса в пределах региона.
2. Инвестирование должно проводиться на возвратной основе и приносить доход инвестору.
3. Первоочередными получателями инвестируемых средств должны стать наиболее перспективные, а также жизненно важные для области предприятия и отрасли.
4. Первоначально вложением средств должно осуществляться в проекты со средне и краткосрочной окупаемостью.
5. Каждый проект должен подвергаться всесторонней экспертизе со стороны инвестора (прежде всего это касается различного рода бюджетных инвестиций).
6. Целевое использование на законодательно-правовом уровне.

Оценка кредитоспособности предприятия на основе анализа его финансового состояния и рисков, связанна с его деятельностью. Для определения вариации действий необходимо провести выбор наиболее подходящей стратегии для поддержки предприятия.

Это заключается в анализе следующих критериев:

1. Финансовые показатели: оценка прибыли, рентабельности, ликвидности, оборачиваемости и других финансовых индикаторов.
2. Показатели эффективности: измерение производительности труда, использования ресурсов, качества продукции или услуг.
3. Рыночные показатели: анализ доли рынка, уровня конкуренции, лояльности клиентов, узнаваемости бренда и других факторов.
4. Инновационность: оценка уровня внедрения новых технологий, продуктов или процессов.
5. Качество управления: анализ организационной структуры, системы принятия решений, уровня корпоративного управления и других аспектов.
6. Социальная ответственность: оценка воздействия на окружающую среду, социальной поддержки работников и других аспектов корпоративной социальной ответственности.

Рассмотрим подсистему развития предприятий, в частности, определение рейтинга корпоративных предприятий. С общетеоретических позиций рейтинг можно рассматривать как способ оценки и сравнения объектов по определенным критериям. Он позволяет узнать о популярности, успешности или значимости

объекта среди других подобных объектов. Рейтинги могут быть основаны на различных параметрах, таких как качество продукции, уровень сервиса, отзывы клиентов, результаты продаж.

В настоящее время рейтинг широко применяют для оценки эффективности работы компаний, организаций и отдельных сотрудников. Кроме того, рейтинги помогают потребителям выбирать товары и услуги, а также принимать решения о вложениях и инвестициях.

В рассматриваемой методике рейтинг фигурирует как элемент конкуренции. Отсечки малорентабельных предприятий исключаются.

Существует множество факторов, которые делают востребованным создание рейтинговых систем, каковыми являются:

- Конкуренция: В условиях жесткой конкуренции, компании стремятся улучшить свою позицию на рынке, и одним из способов достижения этого является участие в рейтингах.

- Потребители: Потребители все больше обращают внимание на рейтинги, когда принимают решение о покупке товара или услуги.

- Инвестиции: Инвесторы также используют рейтинги для принятия решений о вложении средств.

- Репутация: Участие в рейтингах может улучшить репутацию компании и привлечь новых клиентов.

- Инновации: Рейтинги могут стимулировать компании к внедрению новых технологий и улучшению качества продукции.

Использование рейтинга, кроме того, позволяет оценить компанию на основе объективных критериев, таких как финансовые показатели, качество продукции, удовлетворенность клиентов и т.д. Это помогает избежать субъективных оценок и делает информацию более надежной.

Таким образом, рейтинг предоставляет информацию о надежности того или иного заемщика, но при этом не влияет на методический уровень оценки его состояния. Методический уровень оценки определяется внутренними процедурами и стандартами банков, а также законодательством страны.

Рейтинг может помочь банкам и инвесторам определить степень риска при принятии решений, однако он не является единственным фактором, который учитывается при оценке заемщика.

Предприятие должно иметь возможность получать и анализировать информацию о своем положении на потребительском рынке. Это включает в себя данные о доле рынка, уровне удовлетворенности потребителей, конкурентоспособности продукции, а также эффективности использования ресурсов. Рейтинг предприятия должен регулярно обновляться с учетом этой информации, чтобы отражать текущее состояние дел.

Применив рейтинговую систему показателей, состоящую из трех категорий, отметим, что все фактические показатели находятся в пределах первой категории. Около 50% показателей находятся в первой категории, а остальные – во второй. 90% показателей принадлежат ко второй категории. Большинство показателей относится к третьей категории ($> 70\%$).

Показатели первой категории получают 0,1 балла, второй – 0,05, третьей – 0,025.

Максимальная сумма является критерием высокого рейтинга.

Для более точной оценки качественных характеристик предприятий в рамках рейтингов можно использовать следующие методы:

- Анализ финансовых показателей: Рейтинги могут основываться на анализе финансовых отчетов предприятия, таких как прибыль, рентабельность, ликвидность, платежеспособность и т.д.

- Опросы экспертов: Рейтинговые агентства могут проводить опросы среди экспертов в отрасли, чтобы получить их мнение о качестве управления и перспективах развития предприятия.

- Оценка корпоративного управления: Рейтинги также могут учитывать качество корпоративного управления и уровень прозрачности предприятия.

- Анализ нефинансовых факторов: В рейтинг могут быть включены факторы, не связанные напрямую с финансами, такие как социальная ответственность, экологичность и качество продукции.

- Сравнительный анализ: Рейтинги могут использовать сравнительный анализ предприятий в отрасли для определения их позиций и динамики развития.

- Использование искусственного интеллекта: Современные рейтинговые агентства активно используют искусственный интеллект и машинное обучение для анализа больших объемов данных и определения наиболее точных рейтингов.

- Рейтинги на основе социальных медиа: Некоторые рейтинги учитывают активность предприятия в социальных медиа и его репутацию среди пользователей.

- Рейтинги, основанные на отзывах клиентов: Отзывы и оценки клиентов могут служить важным источником информации для составления рейтингов предприятий.

Отраслевые особенности имеют существенное значение для применения данной методики. Материальное производство подразумевает создание физических товаров, в то время как коммерческая деятельность включает в себя продажу товаров или услуг. Это различие может повлиять на то, как данная методика применяется на практике.

В отраслях материального производства необходимо учитывать специфику производственного процесса и требования к качеству продукции. Это может включать в себя разработку стандартов и процедур для контроля качества, а также обеспечение соответствия продукции установленным стандартам.

С другой стороны, в коммерческих отраслях необходимо учитывать особенности рынка и конкурентной среды. Это может включать анализ поведения потребителей, разработку стратегий маркетинга и рекламы, а также оптимизацию бизнес-процессов для повышения эффективности и снижения затрат.

Важно понимать, что каждая отрасль имеет свои уникальные особенности, которые должны быть учтены при применении данной методики. Это может

потребовать адаптации или модификации стандартных подходов, чтобы обеспечить максимальную эффективность и результативность [6].

Процесс диверсификации может иметь значительное влияние на корпорацию, изменяя ее облик и структуру. Этот процесс предполагает расширение сферы деятельности компании и концентрацию производства на межотраслевом уровне, что может привести к увеличению эффективности, снижению рисков и улучшению конкурентоспособности.

Учет фактора диверсификации при определении рейтинга компании в различных отраслях промышленности, строительства и торговли может помочь выявить наиболее перспективные и устойчивые компании на рынке. Это особенно актуально в условиях постоянно меняющейся экономической ситуации и растущей конкуренции.

Таким образом, понимание роли диверсификации в развитии корпораций и учет этого фактора при оценке их рейтинга может способствовать принятию обоснованных решений инвесторами, кредиторами и другими заинтересованными сторонами.

Повышение деловой активности может указывать на то, что компания становится более эффективной в использовании своих ресурсов и управлении своими процессами. Это может привести к увеличению прибыли, расширению рынка и улучшению конкурентоспособности. Однако слишком высокая деловая активность также может создавать дополнительные риски, такие как увеличение издержек или нехватка ресурсов.

В целом, деловая активность является важным показателем для анализа и мониторинга эффективности деятельности компании.

Особенность подхода к разработке методики заключается в отборе наиболее значимых и информативных показателей для оценки реальной экономической ситуации. Система показателей включает 10 из 35 ключевых индикаторов, что обеспечивает простоту интерпретации и использования модели без ущерба для точности результатов.

Точность рейтинга зависит от множества факторов, включая качество и объем исходных данных, методы их обработки и анализа, а также цели и задачи рейтинга. Чтобы проверить точность рейтинга, можно выполнить следующие шаги:

Анализ исходных данных: проверить качество и полноту исходных данных, используемых для расчета рейтинга.

Оценка методов анализа данных: рассмотреть используемые методы анализа данных и оценить их эффективность и применимость к конкретной задаче.

Расчет корреляционных зависимостей: определить и проанализировать корреляционные зависимости между различными оценочными факторами.

Валидация рейтинга: сравнить результаты рейтинга с независимыми источниками информации или экспертными оценками, чтобы проверить их обоснованность и правильность.

Регулярный мониторинг и обновление рейтинга: проводить регулярный мониторинг изменений в исходных данных и методах анализа, чтобы обеспечить актуальность и точность рейтинга.

В Российской Федерации в соответствии с Федеральным законом «О коммерческой тайне», определенные сведения, в том числе и о результатах финансовой деятельности предприятия, могут быть отнесены к коммерческой тайне. Это означает, что их разглашение без согласия владельца или уполномоченного лица может привести к негативным последствиям для предприятия.

На современном этапе развития экономики большое значение приобретает определение рейтинга предприятий в различных отраслях промышленности. Рейтинг представляет собой комплексную оценку деятельности предприятия, основанную на различных показателях, таких как финансовые результаты, конкурентоспособность, инновации, экологичность и социальная ответственность. Такой рейтинг позволяет определить положение предприятия среди других участников рынка, выявить его сильные и слабые стороны, а также обозначить перспективы развития.

Многоотраслевая промышленность представляет собой сложную систему, в которой функционируют различные отрасли и виды производства. Разработка методики определения рейтинга для такой системы требует учета множества факторов и критериев.

Одним из основных критериев может быть объем производства и доля рынка, занимаемая каждой отраслью. Однако, этот критерий не всегда является достаточным, так как некоторые отрасли могут быть высокорентабельными, но не обеспечивать значительный объем производства.

Представим классификацию промышленных предприятий, по рейтингу, устанавливаемому по сумме баллов (табл. 1).

Таблица 1 – Рейтинговая классификация предприятий

Класс рейтинга	Характеристика предприятия	Метод определения	Сумма баллов
Высокий	Компания демонстрирует сильную финансовую устойчивость и высокий уровень кредитоспособности. Ее финансовое положение стабильно, а поставленные цели в области увеличения объемов продаж, прибыли и производительности успешно достигнуты. Это позволяет предприятию претендовать на приоритетное финансовое содействие со стороны государственных фондов поддержки предпринимательства и программ занятости.	все показатели находятся в норме и соответствуют здоровым значениям – первой зоне	1

Класс рейтинга	Характеристика предприятия	Метод определения	Сумма баллов
Первый	Предприятие обладает высоким уровнем финансовой стабильности и надежности, а также способностью возвращать кредиты и инвестировать в развитие бизнеса. Руководство стремится использовать новейшие подходы и технологии для улучшения эффективности работы и привлечения новых возможностей. Формируются необходимые ресурсы для реализации ключевых проектов и мероприятий, направленных на развитие компании и достижение стратегических целей.	Все показатели находятся в первой зоне, а экономического потенциала во второй	0.7-0.85
Второй	Предприятие имеет средний уровень финансовой стабильности и надежности. Риск банкротства или значительных финансовых трудностей низок, но и потенциал для значительного роста или развития ограничен. Руководство предпринимает шаги для снижения различных видов рисков и обеспечения устойчивости в долгосрочной перспективе. Перспективы предприятия положительные, со стабильным потенциалом для дальнейшего роста и развития в будущем.	Все показатели находятся во второй зоне (классе)	0.7
Третий	Предприятие имеет признаки финансовой нестабильности и ненадежности, существует риск банкротства или значительных финансовых потерь. Кредитоспособность предприятия ограничена, и для получения кредитов, скорее всего, потребуется обеспечение. В таких условиях выдача кредитов может осуществляться только под надежное обеспечение, такое как залог имущества или активов.	Показатели деловой активности находятся во второй зоне, а остальные – в третьей	0.45-0.6

Класс рейтинга	Характеристика предприятия	Метод определения	Сумма баллов
Четвертый	Предприятие повышенного риска - это предприятие, которое в силу различных факторов (финансовых, производственных, рыночных и т.д.) может с высокой вероятностью понести убытки или обанкротиться.	Большинство показателей находятся в третьей зоне, 1-2 показателя – во второй	0.35-0.4

Использование этой методики не требует больших усилий или специализированного обучения. Однако, как и в любом исследовании, важно внимательно следовать процедурам и учитывать возможные ограничения или недостатки метода для обеспечения точности и надежности результатов.

Определение рейтинга предприятий позволяет получить комплексную оценку их деятельности, а также определить их место среди конкурентов в определенной отрасли. Это может быть полезно для различных целей.

При оценке параметров инвестиционного проекта руководители корпорации должны отталкиваться от текущего финансового состояния предприятия. Это поможет объективно оценить возможности и риски, связанные с проектом, а также убедиться в том, что проект соответствует стратегии и целям корпорации. Руководители должны проанализировать такие показатели, как текущая ликвидность, прибыльность, финансовая устойчивость и другие финансовые индикаторы, чтобы получить полную картину состояния предприятия и определить его потенциал для реализации инвестиционного проекта.

При неудовлетворительном состоянии предприятия банкиры не считают целесообразным предоставлять инвестиционный кредит, даже если руководство предприятия обещает улучшить ситуацию в будущем.

Прежде чем обращаться за инвестиционным кредитом, компании следует наладить управление своими финансами. Это покажет кредиторам, что компания имеет стабильный доход и способна возвращать кредиты. Только после этого можно рассматривать возможность предоставления инвестиционного кредита.

Количественная оценка текущей кредитоспособности предприятия может быть дана с использованием различных методов, включая анализ финансовых коэффициентов, анализ денежных потоков, рейтинговые системы и прочие.

При использовании баллов для определения кредитоспособности заемщика, чем выше балл, тем лучше кредитоспособность предприятия. Таким образом, можно преобразовать сумму баллов в оценку, где 1.0 соответствует максимальной сумме баллов и идеальной кредитоспособности предприятия, а 0.0 – минимальной сумме баллов и соответственно наихудшей кредитоспособности.

Оценка в 1 означает отсутствие риска, а оценка в 0 – отсутствие кредитоспособности. Однако, эти оценки являются теоретическими и используются для того, чтобы определить степень кредитоспособности или риска в диапазоне от идеального (1) до наихудшего (0) случая.

Поэтому банковские работники должны проанализировать текущую финансовую ситуацию заемщика и определить, насколько он способен вернуть кредит. На основе этого анализа, а также учитывая прошлый опыт и актуальную информацию, банк должен установить пороговое значение кредитоспособности, ниже которого предоставление инвестиционного кредита может быть слишком рискованным.

Если рейтинг Хрт составляет 0,7, что выше порогового нижнего значения 0,5, то банк может рассмотреть возможность выдачи инвестиционного кредита данному предприятию.

Согласно этой рабочей гипотезе, инвестиционная кредитоспособность заемщика (Хрин) зависит от текущей рыночной стоимости компании (Хрт). Однако, на кредитоспособность могут влиять различные факторы, такие как экономическая ситуация, рынок сбыта, конкуренция, технологические изменения и другие.

Динамика кредитоспособности заемщика за последние два года постоянно повышалась и в целом повысилась более чем на 15% (значение X_1 равно 1,3);

- динамика кредитоспособности колебалась, однако в целом повышалась более чем на 15%, значение X_1 равно 1,1;

- кредитоспособность повышалась менее чем на 15%, X_1 равен 1,0;

- динамика кредитоспособности оставалась практически неизменной, X_1 равен 0,9;

- динамика кредитоспособности колебалась, однако в целом снижалась менее чем на 15%, значение X_1 равно 0,7;

- кредитоспособность снижалась более чем на 15%, X_1 равен 0,5.

Специалисты банка должны анализировать множество факторов при определении шкалы для расчета коэффициента для каждого конкретного случая.

2. Опыт предприятия реализации инвестиционных проектов (X_2):

- успех (X_2 -1,5);

- успех менее сложный проект (X_2 -1,2);

- есть опыт (X_2 -1,0);

- нет опыта (X_2 -0,8);

- есть негативный опыт течения трех лет (X_2 -0,6).

3. Плановый период полной реализации инвестиционного проекта (X_3) до 1 года (X_3 -1,0);

- До 1 года (X_3 -1,0);

- От 1 года до 2 лет (X_3 -0,9);

- От 2 до 3 лет (X_3 -0,8);

- От 3 до 4 лет (X_3 -0,7);

- От 4 до 5 лет (X_3 -0,5).

Срок окупаемости проекта – период от произведения капиталовложений до полного их возвращения за счет прибыли проекта. При этом должно быть соблюдено равенство (1):

$$\sum_{i=1}^n \frac{Pr}{\left(1 - \frac{CD}{100}\right)^P} = KB \quad (1),$$

где:

Pr – прибыль, направляемая на возмещение капиталовложений;

CD – ставка дисконтирования;

KB – капиталовложения;

P – период окупаемости.

4. Опыт первого руководителя X4 может быть оценен следующим образом:

- Успешная реализация ряда подобных проектов: X4-1.5
- Участие в успешной реализации проекта и руководство предприятием:

X4-1.1

- Успешное руководство предприятием более 2 лет: X4-1.0
- Руководство предприятием менее 2 лет: X4-0.9
- Отсутствие опыта руководства предприятиями: X4-0.8 – Отрицательный опыт руководства: X4-0.5.

5. Качество бизнес-плана реализации инвестиционного проекта (X5).

Бизнес-план реализации инвестиционного проекта компании X5 представляет собой тщательно проработанный и структурированный документ, содержащий информацию о стратегии развития компании, ее операционных и финансовых планах, а также анализе рынка и конкурентной среды.

Критерии оценки качества бизнес-плана могут включать следующие аспекты:

- Актуальность и реалистичность идеи: насколько предлагаемый бизнес соответствует текущим рыночным потребностям и возможностям для его реализации.
- Качество маркетинговых исследований: насколько хорошо изучены рынки, конкуренты и потребности потребителей.
- Обоснование возможности достижения необходимого качества продукции: наличие четкого плана по контролю качества и предотвращению возможных проблем.
- Прогнозирование продаж и прибыли: насколько реалистичны прогнозы доходов и расходов, а также сроки окупаемости проекта.
- План производства и закупок: наличие четкой схемы организации производства и снабжения ресурсами.
- Организационный план: наличие квалифицированных кадров, структуры управления и системы мотивации сотрудников.
- Финансовый план и оценка рисков: наличие подробного анализа финансовых потоков, оценка возможных рисков и способов их минимизации.
- Перспективы развития бизнеса: насколько четко определены направления развития и роста компании.
- Юридическая и налоговая стороны: соответствие законодательства и налоговых условий реализации проекта.

- Оформление бизнес-плана: наличие всех необходимых разделов, таблиц и графиков, а также стиль изложения и грамотность текста.

При этом значение X_5 может устанавливаться в интервале 1,0 (при идеальном качестве разработки бизнес-плана до 0,5, когда по нему есть существенные замечания. Это интервалы для начального варианта бизнес-плана.

Основным показателем, рассматриваемым здесь, является внутренняя норма рентабельности.

Внутренняя норма рентабельности – это такая норма прибыльности проекта, при которой текущая стоимость проекта (разница между потоком дисконтированных доходов от проекта и потоком дисконтированных капиталовложений) равна 0 (2).

$$\sum_i^n KB_p * \frac{1}{\left(1 + \frac{IRR}{100}\right)^n} - \sum_i^n Пр * \frac{1}{\left(1 + \frac{IRR}{100}\right)^n} = 0 \quad (2)$$

где:

IRR – внутренняя норма рентабельности;

KB_p – дисконтированный доход от проекта;

Пр – дисконтированные капиталовложения;

n – количество потоков.

6. Результаты обследования предприятия работниками банка составили X_6 . Методика обследования включает оценку различных показателей деятельности предприятия, таких как финансовые результаты, рентабельность, ликвидность, структура баланса и другие. Результаты обследования оцениваются по специальной шкале от 1 до 0,5, где 1 соответствует наилучшему результату, а 0,5 – среднему или удовлетворительному.

7. Оценка реального инвестиционного климата для бизнеса в конкретном регионе (X_7) требует тщательного анализа ряда факторов, которые могут повлиять на успешность реализации инвестиционного проекта. Эти факторы могут включать экономическую стабильность региона, уровень коррупции, доступность ресурсов, состояние инфраструктуры, квалификацию рабочей силы и другие.

После анализа всех этих факторов можно присвоить оценку инвестиционному климату от 1 до 0,5, где 1 означает наиболее благоприятный климат для реализации проекта, а 0,5 – менее благоприятный. Важно отметить, что оценка должна быть адаптирована для конкретного проекта и учитывать его специфические потребности и требования.

Определяем инвестиционную кредитоспособность предприятия, по формуле (3):

$$X_{рин} = X_{рт} * X_1 * X_2 * X_3 * X_4 * X_5 * X_6 * X_7 \quad (3)$$

Предположим, что для данного предприятия получены следующие значения: $X_{рт} = 0,7$; $X_1 = 1,1$; $X_2 = 1,0$; $X_3 = 0,8$; $X_4 = 1,3$; $X_5 = 0,9$; $X_6 = 1,0$; $X_7 = 0,8$. Тогда $X_{рин} = 0,58$. Это соответствует второму классу рейтинга предприятия.

Для того чтобы подтвердить достоверность применимости аргументов X1 – X7 при подсчете Хрт необходимо установить насколько эти аргументы связаны между собой, то есть определить тесноту связи. Для этих целей используем методику корреляционного анализа и установим парные корреляционные зависимости, подтверждающие сходимость [3]. Коэффициент линейной корреляции показывает тесноту связи. При расчете будем опираться на признаки тесноты связи линейной корреляции, представленные в таблице 1.

Таблица 2 – Признаки тесноты связи линейной корреляции

Значение	Теснота
0,15	Связь отсутствует
0,16 до ±0,20	Плохая связь
0,21 до ±0,30	Слабая связь
0,31 до ±0,40	Умеренная связь
0,41 до ±0,60	Средняя связь
0,61 до ±0,80	Высокая связь
0,81 до ±0,90	Очень высокая
0,91 до ± 1,0	Полная связь

Исходные данные для расчета коэффициента корреляции представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчёта парной корреляции

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1,3	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
1,1	1,2	0,9	1,1	0,9	0,9	0,9
1,0	1,0	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8
0,9	0,8	0,7	0,9	0,7	0,7	0,7
0,7	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	0,6
0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

При этом рассматривались пары: X1-X2, X1-X3, X1-X4, X1-X5, X1-X6, X1-X7, X2-X3, X2-X4, X2-X5, X2-X6, X2-X7, X3-X4, X3-X5, X3-X6, X3-X7, X4-X5, X4-X6, X4-X7, X5-X6, X5-X7, X6-X7.

Расчёт ведется по формуле коэффициента корреляции Пирсона [2]:

$$r = \frac{\sum(x-x)(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2(y-\bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где:

r – коэффициент корреляции;

x, $\bar{x}$ – смежные значения исходного показателя,

y, $\bar{y}$ – смежные значения сравниваемого показателя.

Результаты расчета корреляционно зависимости сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты расчета парного корреляционного анализа

x1-x2	x1-x3	x1-x4	x1-x5	x1-x6	x1-x7	x2-x3	x2-x4	x2-x5	x2-x6
0,952	0,971	0,974	0,991	0,991	0,991	0,978	0,944	0,974	0,974
x2-x7	x3-x4	x3-x5	x3-x6	x4-x5	x4-x6	x4-x7	x5-x6	x5-x7	x6-x7
0,974	0,921	0,983	0,983	0,964	0,964	0,964	1	1	1

6. Теперь разберем значение проекта для муниципального образования. Наряду с расчетом рейтинге предприятия и оценкой параметров инвестиционного проекта, третьим важным элементом нашей модели является определение значения результатов реализации проекта для муниципального образования. То есть необходимо определить, что получит регион, а главное люди в результате выполнения какого-либо инвестиционного проекта. Конечно этот эффект оценить достаточно трудно, однако попытаемся для него как и предыдущих случаях предложить математическое измерение.

Во-первых, выделим показатели, которые необходимо учесть при расчете общественного значения проекта. На наш взгляд можно выбрать следующую группу факторов:

1. Отрасль, к которой относится предприятие, предлагающее для реализации инвестиционный проект.

Здесь необходимо определить является отрасль важной для экономики региона, для обороноспособности; является ли отрасль профильной для региона, какую долю отрасли составляет предприятие, а главное – является ли развитие этой отрасли приоритетом в данный момент.

2. Является ли предприятие экспортером.

Валютные поступления в настоящее время очень важны как для федерального бюджета, так и для бюджетов регионов. Поэтому выпуск предприятием экспортной продукции является сильным аргументом в пользу вложения инвестиций именно в это предприятие.

3. Появятся ли в ходе реализации проекта новые рабочие места.

Проблема безработицы – одна из главных проблем экономики в региональной политике в настоящее время. Решение этой проблемы – важнейшая задача. Так что любой проект, направленный на решение этого вопроса заслуживает пристального внимания.

При этом улучшается социальный климат в регионе, повышаются доходы и покупательная способность населения.

4. Развитие инфраструктуры региона и государства.

Для любого государства важна его внутренняя инфраструктура, так как она обеспечивает эффективную работу экономики.

5. Введение новых технологий.

Также очень важный момент, поскольку на сегодняшний день, только обладая высокими технологиями, страна может рассчитывать на какую-либо приземлемую роль в мировом сообществе.

Далее каждому из этих факторов присваивается величина в 0,2 балла, если при реализации проекта он будет реализован 0,1 балла, если частично и 0, если при реализации проекта этот фактор совсем не присутствует. Таким образом, максимально по этому разделу проект может набрать сумму в 1 балл, как и в предыдущих разделах.

3. Подсистема ресурсного обеспечения проектов. Она сводится к реинжиниринговому сопровождению инвестиционно-строительных проектов. Реинжиниринг бизнес-процессов при сопровождении проектов на всех этапах или сферах их развития – фундаментальное переосмысление и радикальное перепроектирование бизнес-процессов для достижения максимального эффекта производственно-хозяйственной и финансово-экономической деятельности, оформленное соответствующими организационно – распределительными и нормативными документами. В рамках реинжиниринга проводится анализ и оптимизация существующих бизнес-процессов, а также разработка новых процессов на основе современных информационных технологий. Это позволяет улучшить эффективность работы компании, сократить затраты и увеличить прибыль. Смысл реинжиниринга бизнес-процессов в четырех его основных этапах:

- определение оптимального бизнес-процесса в сфере развития территории;
- определение наилучшего (посредством времени и ресурсов) способа перевода, существующего бизнес-процесса в оптимальный, в сфере инвестирования;
- вариантное проектирование и оптимизация допусков и нормативных коэффициентов при проектировании и строительстве;
- оптимизация налоговых ставок и нормативов;

Порядок алгоритма реализации следующий [7]:

- разработка корпоративной стратегии;
- определение ключевых действий (относительно нормативов), которые необходимы для внедрения стратегии;
- подробный анализ существующих процессов контроллинга;
- выявление узких мест, требующих корректировки;
- определение ключевых допусков (показателей) эффективности;
- собственно реинжиниринг (введение в действие корректировок);
- контроль и постоянное совершенствование новых процессов на основе ключевых показателей эффективности.

Таким образом изложенные алгоритмы формирования подсистем инновационного развития предприятий разных моделей производственно-хозяйственной деятельности представляют некоторые подходы к развитию общей системы на региональном уровне. Вместе с тем, варианты оценки параметров инвестиционных проектов могут быть использованы для апробации инновационных программ отдельных регионов, областей с целью расчета их рейтинга.

По результатам расчета корреляционной зависимости можно сделать вывод о том, что значения коэффициента корреляции соответствуют полной тесно-

те связи, что подтверждает высокую достоверность применимости этих значений при расчёте общего рейтинга предприятия.

Литература

1. Гвоздикова Н.К. Направления и условия формирования инновационного потенциала Тульской области // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 4. С. 64-67.
2. Евдокимова А.О., Калужских А.П. Анализ эколого-экономической обстановки курской области методами корреляционного анализа // Математика и ее приложения в современной науке и практике. 2014. С. 227-231.
3. Рашитова Н.Х. Анализ эффективности структуры экономики на основе корреляционно-регрессионного анализа // Инновационное развитие Российской экономики. 2017. С. 250-252.
4. Стратегия социально-экономического развития муниципального образования город Тула на период до 2018 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://invest.tula.ru/invest/strategiya-razvitiya> (дата обращения 13.10.2023).
5. Шульженко С.Н., Киевский Л.В., Волков А.А. Инвестиционная политика заказчика – застройщика на этапе организационной подготовки сосредоточенного строительства // Вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 111-121.
6. Шульженко С.Н., Киевский Л.В., Волков А.А. Совершенствование методики уровня организационной подготовки территории сосредоточенного строительства // Вестник МГСУ. 2016. № 3. С. 135-143.
7. Шульженко Н.А., Пушилина Ю.Н., Чубаров Д.И. Оценка организационно-технологической надежности при организации подготовки территории под застройку // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 7. Ч. 2. С. 152-157.

УДК 004.021

**Модели и методы машинного обучения для анализа данных
о космических объектах**

Татьяна Сергеевна Аббасова, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Артём Вадимович Мудрецов, аспирант кафедры информационных технологий
и управляющих систем,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Проанализированы возможности применения моделей и методов машинного обучения при решении задачи минимизации эмпирического риска в исследованиях космических объектов; определены аналитические зависимости, раскрывающие механизм действия алгоритмов оптимизации анализа и обработки больших данных о космических объектах; показаны наиболее частые приемы, используемые для сокращения вычислений и минимизации ошибок при вычислениях.

Машинное обучение, анализ данных, стохастическая оптимизация, градиентный спуск, задача классификации.

**Models and methods of machine learning for the analysis of data on space
objects**

Tatyana Sergeevna Abbasova, Candidate of technical Sciences, Associate Professor,
Artyom Vadimovich Mudretsov, postgraduate student of the Department
of Information Technologies and Control Systems,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The possibilities of using models and methods of machine learning in solving the problem of minimizing empirical risk in the study of space objects are analyzed; analytical dependencies are determined that reveal the mechanism of action of algorithms for optimizing the analysis and processing of big data on space objects; shows the most common tricks used to reduce calculations and minimize errors in calculations.

Machine learning, data analysis, stochastic optimization, gradient descent, classification task.

Введение

С 1994 года для исследования космоса широко применяется машинное обучение, так как необходимо анализировать и обрабатывать большое количество данных о космических объектах, к которым предъявляются требования автономности [2, С. 58; 3, С. 50]. Автономность реализуется посредством интеллектуальных систем управления [7, С. 77], в которые входят роботы-помощники, голосовые помощники [1, С. 85], средства распознавания и улучшения полученных в результате дистанционного зондирования изображений, 3D-принтеры для печати запасных частей космических аппаратов и многие другие интеллектуальные устройства [4, С. 21; 5, С. 20].

В машинном обучении применяется градиентный спуск – это алгоритм оптимизации, используемый для минимизации ошибок в модели машинного обучения. Он работает путем итеративной корректировки параметров модели в направлении отрицательного градиента функции потерь (которая представляет ошибку), чтобы уменьшить ошибку и найти оптимальные параметры, которые дают наилучшие результаты прогнозирования. Алгоритм продолжает этот процесс до тех пор, пока он не достигнет минимума или не будет выполнен заранее определенный критерий остановки. Особую актуальность алгоритм градиентного спуска приобретает для обработки большого объема данных при космических исследованиях.

Результаты исследования

Задача минимизации эмпирического риска

Рассмотрим задачи минимизации эмпирического риска на примере задачи регрессии [6, С. 15]. Затем рассмотрим метод стохастического градиента. Предположим, что существует следующая обучающая выборка в виде конечного множества l штук пар космический объект-ответ:

$$X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l, \quad (1)$$

где $x_i \in R^n$ – означает, что космический объект описывается n числовыми признаками; $y_i \in R$ – числовой ответ.

В обучающей выборке указано, что каждому объекту x_i соответствует правильный ответ y_i . Фиксируем модель, с помощью которой рассчитываем предсказывать y_i по вектору x_i . В общем случае это некоторое параметрическое семейство функций $a(x, w)$

$$a(x, w) = \sum_{j=1}^n w_j f_j(x); \quad w \in R^n. \quad (2)$$

Сделаем предположение, что данная модель – линейная и является взвешенной суммой признаков $f_j(x)$ с некоторыми весовыми коэффициентами w_j . Другими словами, функция a есть скалярное произведение двух векторов: x (признаковое описание объектов x) и w (вектор весовых коэффициентов линейной модели). Следующий шаг – фиксация функции потерь (предположим, что данная функция является квадратичной):

$$L(a, y) = (a - y)^2. \quad (3)$$

Данная функция потерь сравнивает правильный ответ y с ответом a , который выдает модель. Чем меньше квадрат разности – тем меньше потери. Если взять такую функцию потерь и просуммировать все потери на объектах обучающей выборки (при том, что на объекте x_i используется модель, которая зависит от параметра), то будет сконструирован особый функционал. Это числовая функция от вектора w . И теперь появляются критерии качества, по которым возможно найти w минимизируя этот критерий. Другими словами, ставится оптимизационная задача на данном этапе. Далее эту задачу необходимо решать с помощью известных численных методов. В данной статье рассмотрен численный метод оптимизации первого порядка (так называемые градиентный метод) с тем отличием, что используется не типовая оптимизация, а машинное обучение. Это означает, что если мы модель построена по обучающей выборке, то обязательно ее необходимо проверить на отлаженных тестовых данных или сделать «скользящий» контроль или еще что-то сделать, чтобы проверить насколько модель действительно обладает «предсказательной силой». Например, рассчитаем среднюю ошибку $\bar{Q}(w)$ построенной модели на новых объектах

$$X^k = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)_{i=1}^k, \quad (4)$$

$$\bar{Q}(w) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (a(\tilde{x}_i, w) - \tilde{y}_i)^2, \quad (5)$$

где $\tilde{x}_i$ – известные объекты; $\tilde{y}_i$ – известные ответы.

Для того чтобы иметь k таких объектов, необходимо иметь $l+k$ объектов с известными правильными ответами. Для решения задачи берется полная выборка, разделяется на две части. На первой части происходит обучение.

$$Q(w) = \sum_{i=1}^l (a(x_i, w) - y_i)^2 \rightarrow \min_w. \quad (6)$$

На второй части необходимо проверить, насколько модель переобучена. Представляет особый интерес сравнить среднюю ошибку на обучении и среднюю ошибку на контроле. На нем эта ошибка несколько больше: если незначительно больше, то модель не сильно переобучена. Если ошибка во много раз больше, то модель не подходит для решения этой задачи и необходимо менять модель.

Обучение классификации тоже является задачей оптимизации. Рассмотрим задачу классификации на 2 класса. Существует обучающая выборка, объекты (в том числе космические) описываются n числовыми признаками

$$X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l, \quad (7)$$

где $x_i \in R^n$ – означает, что объект описывается n числовыми признаками;

$y_i \in \{-1, +1\}$ – бинарный ответ.

Составим линейную модель. Для этого составим скалярное произведение между вектором признаков описания нашего объекта и вектором параметров

$$a(x, w) = \text{sign}\langle x, w \rangle = \text{sign} \sum_{j=1}^n w_j f_j(x). \quad (8)$$

Однако теперь интерес представляет знак этого скалярного произведения. Это означает, что в пространстве R^n строится разделяющая гиперплоскость. Она имеет направляющий вектор w . Если объект попал в ту самую половину пространства, куда направлен вектор w , то это класс $+1$. Другими словами, угол между вектором x и вектором w острый. В случае если угол тупой, то скалярное произведение отрицательно и объекты соотносятся классу -1 .

Итак, линейные модели для классификации подходят поскольку они определяют разделяющую гиперплоскость пространства R^n .

Следующий шаг – это определить потери. Для задачи классификации функция потерь L определяет ошибку. Правильный ответ y и тот ответ, который дала нам модель a есть либо $+1$, либо -1 . Если они разного знака, то это ошибка. В данном случае функция потерь бинарная (ее аппроксимация $L(\langle x, w \rangle y)$).

$$L(a, y) = [ay < 0] = [\langle x, w \rangle y < 0] \leq L(\langle x, w \rangle y). \quad (9)$$

Для проверки знака возьмем произведение ay (обе величины дискретные и их значения: $+1$ либо -1)

$$[ay < 0], \quad (10)$$

где a это знак $\text{sign}\langle x, w \rangle$. Если убрать данную функцию (sign), то определение ошибки не изменится. Существует особенность: если данной функцией потерь $[\langle x, w \rangle y < 0]$ организовать функционал $Q(w)$, то это функционал будет неподходящим для решения оптимизационной задачи, поскольку он принимает $l + 1$ дискретное значение.

$$Q(w) = \sum_{i=1}^l [\langle x_i, w \rangle y_i < 0] \leq \sum_{i=1}^l L(\langle x_i, w \rangle y_i) \rightarrow \min_w. \quad (11)$$

В (11) представлен дискретный функционал, следовательно, требуется минимизация дискретного функционала. Данная задача комбинаторной оптимизации и достаточно трудная для решения. Для обхода этой проблемы используется следующий метод: подмена пороговой функции потерь непрерывной функцией (для того, чтобы иметь возможность пользоваться градиентными методами и использовать непрерывную оптимизацию, вместо дискретной). Предположим, что существует бинарная функция потерь $[\langle x, w \rangle y < 0]$. В ней значение $\langle x, w \rangle y$ отрицательно, итоговая функция равна 1.

Предлагается замена $[\langle x, w \rangle y < 0]$ некоторой непрерывной оценкой сверху. Обозначим ее как

$$L(\langle x, w \rangle y). \quad (11)$$

Чем больше значение $\langle x, w \rangle y$, тем меньше потери. Отсюда проистекают следующие требования для функции L : непрерывная (лучше гладкая убывающая функция). Если была заменена бинарная функция потерь на непрерывную гладкую, то появилась возможность решать непрерывную гладкую задачу минимизации верхней оценки исходного функционала. Другими словами, произойдет приближенная минимизация числа ошибок. В задаче машинного обучения должна быть тестовая выборка X^k , на которой следует проверять «предсказательную силу» модели.

$$X^k = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)_{i=1}^k, \quad (12)$$

$$\bar{Q}(w) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [\langle \tilde{x}_i, w \rangle \tilde{y}_i < 0]. \quad (13)$$

Понятие допуска для разделяющих классификаторов

Рассмотрим классификатор, основанный на принципе «дискриминации». Происходит построение разделяющей поверхности, графически этот процесс представлен на рисунке 1.

Разделяющий классификатор: $a(x, w) = \text{sign } g(x, w)$.

Если $a(x, w)$ – это скалярное произведение 2-х векторов, то строится гиперплоскость. Если $g(x, w)$ – неизвестная параметрическая функция, то строится нелинейная разделяющая поверхность.

Введем обозначения:

$g(x, w)$ – разделяющая (дискриминантная функция);

$g(x, w) = 0$ – уравнение разделяющей поверхности;

Тогда отступ (допуск) объекта x_i от разделяющей поверхности

$M_i(w) = g(x_i, w) y_i$.

$M_i(w) < 0$ – алгоритм $a(x, w)$ ошибается на x_i .

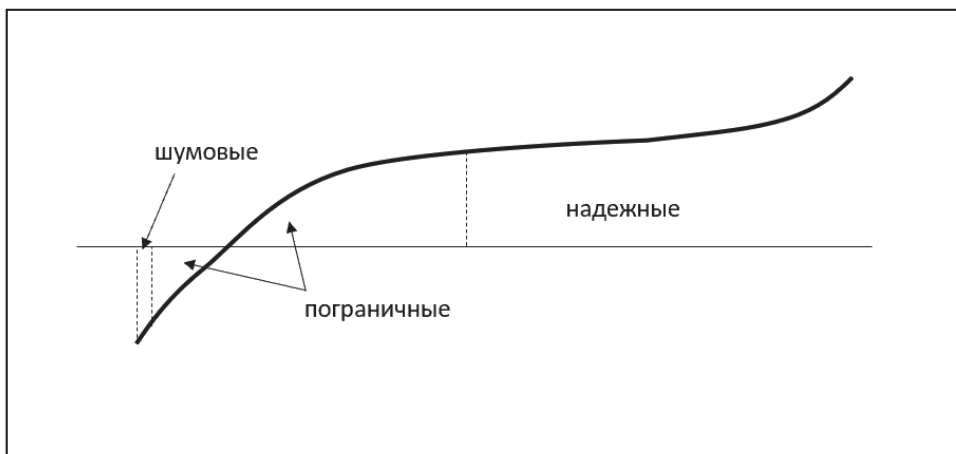


Рисунок 1 – Ранжирование объектов по возрастанию допусков

Геометрический смысл: отступ – это расстояние до разделяющей поверхности, взятое со знаком. Если ошибка, то знак отрицательный (положительный в случае отсутствия ошибки). На практике, когда решаются задачи классификации с помощью подобных дискриминантных моделей, возникает интерес узнать, как распределились отступы на объектах обучающей выборки по своим значениям и интерпретировать эти объекты. Например, если отступ большой величины и отрицательный, то это объект, который улетел в толщу чужого класса (рисунок 1). Данный объект далек от разделяющей поверхности и, возможно, это некий аномальный объект, который был некорректно измерен.

В случаях, когда отступ имеет высокое положительное значение то получается типичный «эталонный» объект своего класса. Пограничные зоны могут охарактеризовать качество построения модели. Особый интерес представляет сравнение кривой на объектах обучающей выборки и контрольной выборки и анализ насколько велика степень переобучения.

Часто используемые функции потерь показаны в таблице 1 (рассмотрены непрерывные функции).

Несмотря на разнообразие методов, все методы, так или иначе, сводятся к минимизации эмпирического риска, где функцию потери взяли аналогичную указанным в таблице (таблица 1). Почти все представленные функции непрерывно монотонно убывающие (за исключением параболы, п. 4).

История машинного обучения – это история полная случаями, когда исследователи придумывали очень разные принципы классификации. Но спустя некоторое время оказалось, что они эквивалентны методам минимизации эмпирического риска лишь за исключением того, что требуется менять функцию потерь в зависимости от задачи.

Таблица 1 – Функции потерь

	Функция	Наименование
1	$V(M) = (1 - M)$	Кусочно-линейная (SVM)
2	$H(M) = (-M)$	Кусочно-линейная (Hebb's rule)
3	$L(M) = \log_2(1 + e^{-M})$	Логарифмическая (LR)
4	$Q(M) = (1 - M)^2$	Квадратичная (FLD)
5	$S(M) = \frac{2}{1 + e^M}$	Сигмоидная (ANN)
6	$E(M) = e^{-M}$	Экспоненциальная (AdaBost)
7	$[M < 0]$	Пороговая функция потерь

Данный метод оказался очень эффективным: изменяя функцию потерь, можно получать те или иные методы классификации.

Модель нейрона

Также применяется математический нейрон Мак-Каллока-Питтса, формальный нейрон (простейшая модель функционирования нервной клетки – нейрона)

$$a(x, w) = \sigma(\langle w, x \rangle) = \sigma(\sum_{j=1}^n w_j f_j(x) - w_0), \quad (14)$$

где $\sigma(z)$ – функция активации (например, sign); w_j – весовые коэффициенты синоптических связей; w_0 – порог активации.

Схема формального нейрона приведена на рисунке 2.

Нервная клетка в первом приближении – это «черный ящик», у которого множество входов и один выход. «Черный ящик» выполняет функцию суммирования своих входов, помноженных на весовые коэффициенты. Эти коэффициенты являются свойствами самой клетки.

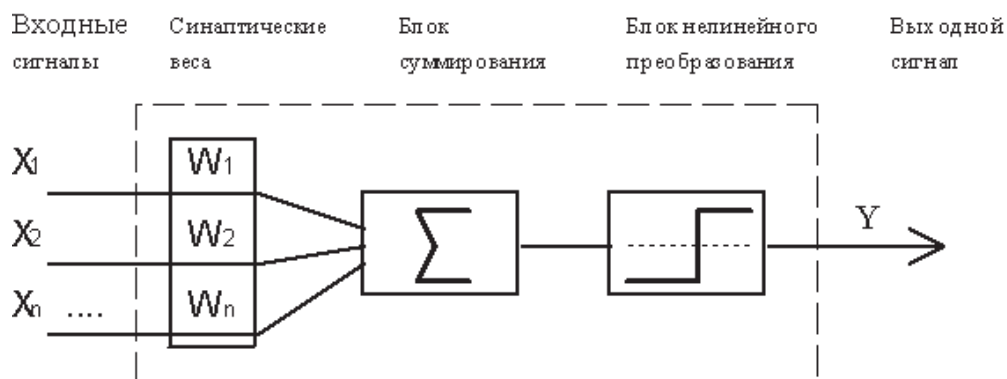


Рисунок 2 – Формальный нейрон

Модель Мак-Каллока-Питтса является первой формальной моделью нейронных сетей (НС) была, затем она была уточнена и развита ученым Клини. В реальной жизни нейроны классифицированы и устроены гораздо сложнее. Однако данная простейшая модель подтолкнула к созданию искусственных нейронных сетей.

Метод стохастического градиента

Это оптимизационный алгоритм, отличающийся от обычного градиентного спуска тем, что градиент оптимизируемой функции считается на каждом шаге не как сумма градиентов от каждого элемента выборки, а как градиент от одного, случайно выбранного элемента.

Минимизация эмпирического риска

$$Q(w) = \sum_{i=1}^l L_i(w) \rightarrow \min_w. \quad (15)$$

Численная минимизация методом стохастического градиентного спуска. Через L_i коротко обозначим функцию потерь на этом объекте. Запись L_i предполагает абстрагирование от того, как устроена модель и функция потерь.

Сущность градиентного метода оптимизации. В каждой точке можем посчитать вектор частных производных (градиент). Он показывает направление наибольшего возрастания функции в данной точке. Требуется минимизация, значит необходимо идти не по градиенту, а в противоположном направлении.

Начнем приближение с $w^{(0)}$. Далее каждое следующее приближение вычисляется как текущее приближение за вычетом градиента: $w^{(t+1)} = w^{(t)} - h \nabla Q(w^{(t)})$ – значение на шаге $t+1$.

Затем следует рассчитать следующую сумму

$$w^{(t+1)} = w^{(t)} - h \sum_{i=1}^l \nabla L_i(w^{(t)}). \quad (16)$$

Градиентный метод требует посчитать сумму по всем объектам обучающей выборки, сложить все эти градиенты и сместится в сторону «антиградиента» и получить новое приближение вектора $w^{(t+1)}$.

Если в этой сумме взять только часть слагаемых, то по закону больших чисел приближение будет достаточно хорошим. У этой идеи есть необычное предложение: использовать только одно слагаемое. Затем получим новое приближение для $w^{(t+1)}$. Следующие слагаемое в градиенте будем вычислять уже по другому случайному параметру $w^{(t)}$. Поскольку объекты берутся в случайном порядке, то смещение будет похоже на Броуновское и движение. При этом движение будет производиться в сторону направления скорейшего убывания функционала.

Геометрически метод стохастического градиентного спуска (SGD) изображен на рисунке 3.

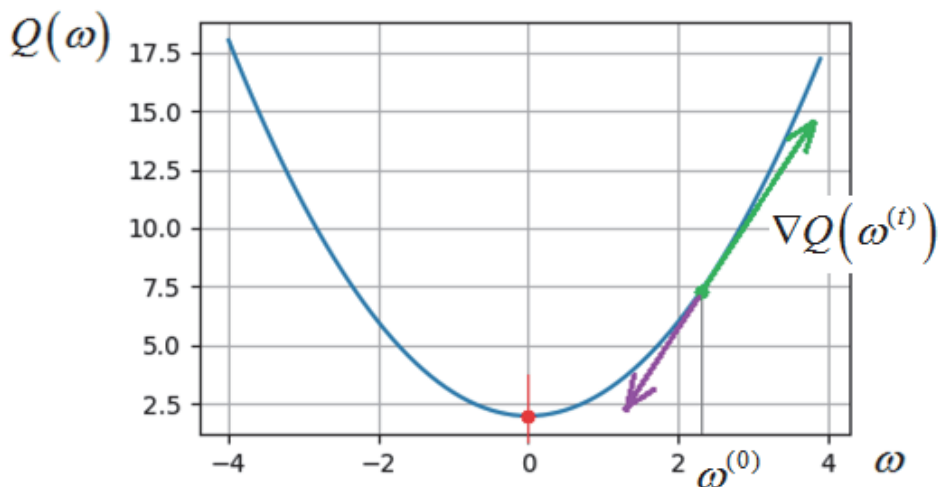


Рисунок 3 – Стохастический градиентный спуск

Данная идея оказалась очень продуктивной, несмотря на то, что она выглядит очень простой и приводит к тому, что сходимость на самом деле ускоряется.

Алгоритм стохастического градиентного спуска (псевдокод)

Пример псевдокода (псевдоградиента) показан на рисунке 4.

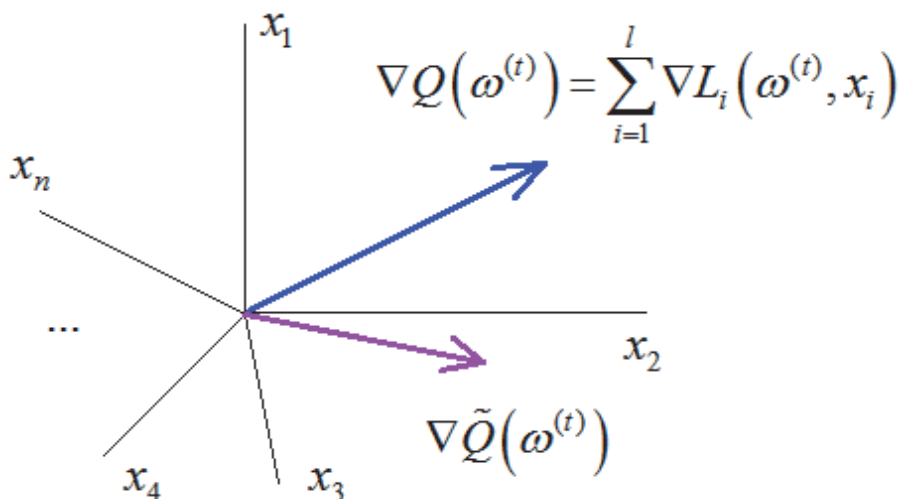


Рисунок 4 – Псевдоградиент

$$\nabla \tilde{Q}(\omega^{(t)})$$

На рисунке 4 через $\nabla \tilde{Q}(\omega^{(t)})$ обозначен псевдоградиент.

Необходимо найти такой псевдоградиент, который позволил бы сократить объем вычислений для истинного градиента и при этом сохранить сходимость алгоритма к точке локального минимума.

Вход: выборка X^l , шаг обучения h , шаг забывания λ ;

Выход: весовые коэффициенты w ;

1. Инициализация $w_j, j=0, \dots, n$;
2. Инициализация: $\bar{Q} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L_i(w)$
3. Повтор
4. Выбрать случайный x_i из X^l
5. Определить погрешность $\varepsilon_i = L_i(w)$
6. Перейти на следующий шаг: $w = w - h \nabla L_i(w)$
7. Оценить $\bar{Q} = \lambda \varepsilon_i + (1 - \lambda) \bar{Q}$
8. Пока значение $\bar{Q}$ и/или веса w не сойдутся.

Примечание к шагу № 7. Происходит модификация оценки функционала. Требуется найти какой-нибудь критерий остановки, поскольку необходимо следить за тем, как меняется функционал в процессе оптимизации. Далее в какой-то момент необходимо понять, что значение функционала перестало существенно меняться и остановить процесса. Для того чтобы возможно было остановить процесс потребуется значение функционала. Здесь возникает проблема: если функционал на каждом шаге вычислять точно, то это потребует суммирование по всем объектам обучающей выборки. Ранее было отмечено достижение увеличения эффективности алгоритма за счет того, что берутся объекты случайно. Те-

перь же предлагается выбрать все объекты и просуммировать их, что отменяет полученную ранее эффективность.

Существует специальный прием: предлагается оценивать экспоненциальное среднее потерь. Потери представляют собой $\varepsilon_i = L_i(w)$. Формула $\bar{Q} = \lambda \varepsilon_i + (1 - \lambda) \bar{Q}$ позволяет посчитать нечто среднее.

Приближенная рекуррентная формула:

Среднее арифметическое

$$\bar{Q}_M = \frac{1}{m} \varepsilon_m + \frac{1}{m} \varepsilon_{m-1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m-2} + \dots \quad (17)$$

$$\bar{Q}_M = \frac{1}{m} \varepsilon_m + \left(1 - \frac{1}{m}\right) \bar{Q}_{m-1}. \quad (18)$$

Экспоненциальное скользящее среднее

$$\bar{Q}_M = \lambda \varepsilon_m + (1 - \lambda) \lambda \varepsilon_{m-1} + (1 - \lambda)^2 \lambda \varepsilon_{m-2} + \dots \quad (19)$$

$$\bar{Q}_M = \lambda \varepsilon_m + (1 - \lambda) \bar{Q}_{m-1}. \quad (20)$$

где λ – темп «стирания» предыстории ряда.

Это достаточно используемый прием для того, чтобы сократить вычисления, когда требуется посчитать некоторую величину подобно среднему (не имеет значения, это среднее арифметическое, усреднение по последним итерациям, усреднит по последним просмотренным элементам обучающей выборки и др.).

Машинное обучение имеет большое значение для управления космическим объектом, так как с помощью него можно решить следующие задачи: предсказать время опасного сближения; построить лучшие траектории уклонения; сформировать рекомендации манёвров космического объекта.

Программные средства реализации: симулятор для расчета положения и скорости космического объекта в любой момент времени по известным элементам орбиты на некоторый начальный момент времени; база данных для хранения информации об элементах орбиты всего рассматриваемого множества космических объектов (несколько тысяч); симулятор для расчета опасных ситуаций и маневров при опасном сближении космических объектов.

Заключение

Определены аналитические зависимости для оценки моделей и методов машинного обучения, используемых при анализе космических объектов и позволяющих сократить вычисления при обработке больших данных.

Литература

1. Аббасова Т.С. Интерактивный мобильный помощник для космического экипажа // Информационно-технологический вестник. 2023. № 1(35). С. 84-91.
2. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический вестник. № 2(04). 2015. С. 55-64.

3. Аббасова Т.С., Петровская З.В. Повышение оперативности обработки цифровой телеметрии в ракетно-технических системах // Информационно-технологический вестник. 2022. № 2(32). С. 49-56.
4. Аббасова Т.С., Погосян А.Т. Анализ структуры наземного комплекса управления космическими летательными аппаратами // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч. 1 / Поволжский гос. ун-т сервиса. Тольятти: Изд-во: ПВГУС, 24-25.03.2016. С. 19-22 (345 с.).
5. Артюшенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании / Сборник – Королев МО: Изд-во «Канцлер», Финансово-технологическая академия, ФТА, 2014. С. 17-22 (426 с.).
6. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: МЦНМО, 2011. 620 с.
7. Теодорович Н.Н., Ковалев И.И., Семенов А.Б. Оптимизация параметров оборудования перспективных многолучевых спутниковых систем // Информационно-технологический вестник. 2020. № 3(25). С. 75-87.

УДК 536.24: 532.517.4

Математическое моделирование влияния неизотермичности на гидросопротивление и теплообмен в трубах с полукруглыми турбулизаторами для теплообменников летательных аппаратов

Игорь Евгеньевич Лобанов, доктор технических наук,
профессор кафедры «Техники и технологий»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Расчётным методом исследована зависимость от температурного фактора в широком диапазоне его изменения ($\theta_c = T_w/T_f = 0,4 \div 4,0$) распределения осреднённого теплообмена и коэффициента гидросопротивления при турбулентном конвективном теплообмене на воздухе в трубе с последовательностью периодических выступов полукруглой геометрии на базах численных решений уравнения Рейнольдса, соединяемого моделями перемещения сдвигового ментеровского сдвига-напряжения, и энерго-уравнения на неравномасштабной пересекающейся структурализованной сеточке. Теорию необходимо применять при инженерном и естественнонаучном основании вычислений интенсифицированного турбулентного теплосъёма, при условиях потоков в каналах с выступами, реализуемых в теплообменниках авиа-, ракетно-, космо- техники.

Моделирование, численный, канал, труба, конвективный.

Mathematical modeling of the effect of non-isothermicity on hydraulic resistance and heat transfer in pipes with semicircular turbulators for aircraft heat exchangers

Igor Evgenievich Lobanov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of «Engineering and Technology»,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The dependence on the temperature factor in a wide range of its variation ($\theta_c = T_w/T_f = 0,4 \div 4,0$) of the distribution of averaged heat transfer and the coefficient of hydrosesistance in turbulent convective heat exchange in air in a pipe with a sequence of periodic projections of semicircular geometry based on the numerical solution of the system of Reynolds equations, closed using the model of shear stress transfer Menter, and energy equations on multi-scale intersecting structured grids. The theory can be used in engineering and natural science foundations of calculations of intensified turbulent heat transfer, for flow conditions in pipes with turbulators used in heat ex-

changers used in aviation, rocket, space technology.

Modeling, numerical, channel, pipe, convective.

1. Вводная часть

Изготовление циклических внутренних рёбер на стенках поверхности омывания теплоносителем представляется в полной мере верифицированным практически средством вихревого интенсифицирования теплосъёма [7, 8, 20].

Углубление знаний в области интенсифицирования теплосъёма для обстоятельств течений носителей теплоты в канале с внутренним оребрением производилось и производится преимущественно эмпирическими способами [7, 8, 20], а теоретическое аналитическое и численное исследование малочисленно, целый ряд его реализует интегральное исследование теплосъёма [3, 12, 29, 28, 34].

Решение гидроаэромеханических и теплофизических задач на современных этапах исследования всё более производится способами многоблочной технологии вычисления, основанной на перекрёстной структурированной сетке [17, 10, 18, 19, 21].

Данная научная статья логически продолжает применение вышеупомянутых способов вычисления методов [1, 4, 5, 2, 6, 9, 33, 12, 11, 13, 14, 15, 16] для анализирования турбулизированных потоков и теплосъёма в каналах с диафрагмами (с полукруглым внутренним оребрением) с разнообразными геометрическими параметрами (высота выступа, шаг выступа) при различном режиме течений теплоносителей для цели углублённого анализирования интенсифицирования неизотермической теплоотдачи, а также гидросопротивления, для воздушных теплоносителей относительной температуры стенки (отношения температур стенок к средним массовым температурам): $\theta_c = 0,4 \div 4,0$.

Существующие подходы к данной проблеме имели место при помощи интегральных моделей интенсифицированного теплообмена [12, 24, 26, 30, 27], поэтому моделирование на базе численных решений системы рейнольдсовых уравнений, смыкаемых посредством ментеровских моделей переносов напряжения сдвига, и уравнений для энергий на неравномасштабной перекрещивающейся структурированной сетке позволит решить эту задачу на более высоком уровне, уточнив полученные ранее теоретические результаты.

Отличительной особенностью данного исследования, которая позволило учесть воздействие неизотермичностей на теплосъём и гидравлические сопротивления в каналах с внутренним оребрением, является совместное численное решение уравнений неразрывности, количества движения и энергии, в то время как в вышеупомянутых предыдущих работах [1, 4, 5, 2, 6, 9, 33, 12, 11, 13, 14, 15, 16] сначала решались уравнения неразрывности и количества движения, а затем уже – уравнение энергии.

2. Математическое и дискретное моделирование

В настоящей статье при помощи целиком неявной конечно-разностной схемы на центрированных неравномерных непрямоугольных сетках решаются

системы уравнения неразрывности, количеств движения и энергий, которые записываются в физических аргументах.

Расчёты полей давлений производятся посредством процедуры «СИМПЛЕК» с использованием принципа расщеплений для физических процессов. Аппроксимирования составляющих для конвекции производились посредством квадратичных противопоточных схем.

Системы разностных уравнений решались посредством высокоэффективных методов неполных матричных факторизаций при ускорении сходимостей при применении методов аддитивных коррекций.

Многоблочные алгоритмы расчёта на перекрещивающейся неравномаштабной сеточке, апробированные решениями задач смерчевых тепломассообмена и аэрогидродинамики [17], реализуются для корректностных решений задач турбулентного теплосъёма.

В статье подвергались исследованию трубы перманентных цилиндрических сечений при расположении на поверхностях двенадцати турбулизаторов в виде периодической диафрагмы с полукруглым поперечным профилем. Численные вычислительные расчёты для квадратных турбулизаторов были реализованы в работе [32].

Вычисления турбулизированных перемещений реализуются употреблением многозональных малореинольдсовых ментер-моделей [21].

Расчётные характеристики варьировались в нижеследующем диапазоне (t – шаги размещений выступов; d – диаметры для диафрагм; D – диаметры для труб): $d/D=0,98\div 0,90$; $t/D=0,25\div 1,00$, $Re=10^4\div 5\cdot 10^5$ – критерий Рейнольдса; $Pr=0,72$ – критерий Прандтля; относительная температура стенки (отношение температур для стенок к среднеобъёмным температурам): $\theta_c = T_w/T_f = 0,4\div 4,0$.

Сокращённо реализованные расчётные модели могут быть охарактеризованы нижеследующим способом. Рассматриваемые 3-х-мерные расчётные области имеют некоторое количество блоков, каждый из блоков содержит один выступ-турбулизатор (рисунок 1).

Для вычислительного процесса предполагаем, что для исследуемого числа выступов турбулентные потоки практически полностью устанавливаются.

Главная часть исследований теплоотдачи заключалась в проведении расчётов при граничных условиях первого рода на поверхности при последовательном изменении относительной температуры стенки θ_c для достижения цели выявления закономерностей изменений интенсифицированного теплосъёма при разнообразных температурных напорах $\theta_c=0,4\div 4,0$.

Предварительный этап научной работы состоит в том, что в нём производится модифицирование многопрофильных расчётных комплексов моделирования пространственного отрывного потока и смерчевого теплосъёма для адаптирования и верифицирования математических моделей течений и смерчевой теплоотдачи в трубе с внутренним оребрением в предположениях о возникновении пространственной вихревой структуры, детерминирующей смерчевое интенсифицирование процесса теплосъёма в поверхностной зоне трубы с выступами.

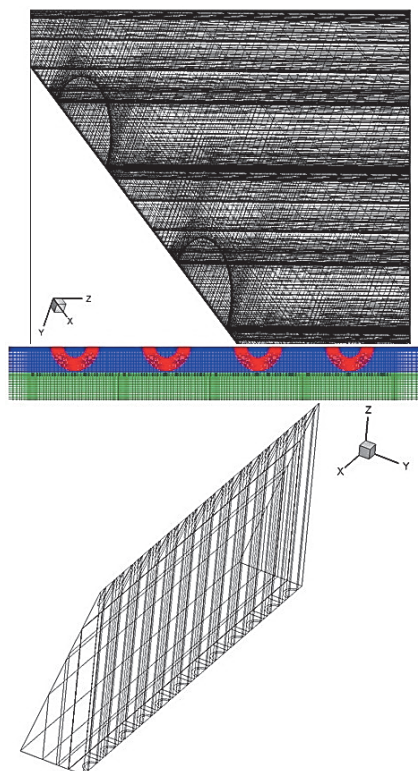


Рисунок 1 – Расчётное разбиение трубы на сетки, состоящие из некоторого количества блоков со срединным расположением полукруглых турбулизаторов

При решении числовых задач интенсифицированной теплоотдачи вычислительные трёхмерные сетки выстраивались однообразным способом: конструировались двумерные сеточки в лучевых и аксиальных координатных осях, разворачиваемых по окружностным координатным осям с перманентным шагом.

Мельчайшие сеточки пристраиваются в крупную сетку, что определяет расчёты течений в ближнем следе у выступа, а переходы от приповерхностных районов к оси совершаются при приложении буферной сетки, предназначения которой состоит в увеличении продольных шагов сеток в областях препятствий и вариации разрешений по окружным координатам.

В рамках настоящей научной статьи не станем подробно рассматривать специфически модельные аспекты численного расчёта по применённым методикам, т.к. подробно аспекты модели уже рассматривалась в [4, 5, 6, 8, 9, 12, 14, 35, 17, 10, 18, 21].

3. Информация для исходящих вычислительных расчётов

На входящих отрезках канала изучались постоянные потоки при тонких варьированных пограничных слоях. Симплексы у турбулентностях соразмерны опытным испытаниям в каналах, предусматривая турбулентные диапазоны порядка диаметров труб (характеристический размер), а степени турбулентностей принимаются равными полтора процента.

В выходных сечениях изучаемых участков труб задаётся «мягкое» граничное условие, т.н. условия продолженных решений, которые экстраполируют параметры вне расчётных областей.

Поверхности труб, которые омываются теплоносителями, считаются изотермическими при граничном условии первых родов и имеют относительно температуры набегающих потоков большую или меньшую температуру (на некоторое количество градусов); на них реализуется условие прилипания.

В дальнейшем относительная температура стенки изменяется от 0,3 до 4,0. Интервалы выбирались таким образом, чтобы охватить те же диапазоны, которые характерны для аналогичных условий для гладких труб [23, 25]. Согласно этим данным [23, 25] относительный коэффициент сопротивления $\xi_{\text{гл}}/\xi_{\text{гл}0}$ зависит практически так же, как и $\text{Nu}_{\text{гл}}/\text{Nu}_{\text{гл}0}$ от относительной температуры температуры стенки θ_c (ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; Nu – критерий Нуссельта; индексы: 0 – изотермические условия; гл – гладкий канал).

В отличие от более ранних научных работ [22, 31], в данной статье расчёты интенсифицированной теплоотдачи по данной факторизированной контрольно-объёмной методике проводились в трёхмерной постановке вместо двумерной (как в работах [1, 4, 5, 2, 6, 9, 33, 12, 11, 13, 29, 14, 15, 16, 28, 34]) при увеличении количества турбулизаторов в канале до 12, с меньшей невязкой (10^{-5}), что позволило значительно расширить расчётный диапазон для геометрических параметров выступов, для определяющих критериев потока и температурных граничных условий.

Критерии сходимостей для динамических и тепловых задач детерминировались ограничиванием погрешности вычислений декартовой составляющей скоростей, а для тепловых задач – ограничиванием величин приращений теплового потока на поверхностях. В данной статье относительная невязка принималась величиной 10^{-5} .

Для наперёд заданной геометрии каналов каждые отдельные задачи из определённого количества блоков разрешаются в один этап: динамическая задача (уравнения неразрывности и количества движения) решается одновременно с тепловой задачей (уравнение энергии), т.е. рассчитываются поля составляющей скоростей течения, характеристики турбулентностей, поля температур и т.п. для различных температурных факторов $\theta_c=0,4\div 4,0$. Ранее данная задача в такой постановке решалась только для изотермических условий.

4. Влияние температурного фактора в широких диапазонах его варьирования ($\theta_c=0,4\div 4,0$) на теплообмен и гидравлического сопротивление в прямой круглой трубе с циклическими поверхностными турбулизаторами потоков полукруглых поперечных профилей при переменных параметрах геометрии и режимов

Коэффициенты гидравлических сопротивлений ξ и осреднённые критерии Нуссельта Nu для труб с полукруглым внутренним оребрением при турбулентной конвективной теплоотдаче в настоящей статье определялись вычислительным способом на основах численных разрешений рейнольдсового уравнения, которое замыкалось ментеровской моделью перемещения у сдвига-

напряжения, и энергоуравнений на неравномасштабной самоперекрещивающейся структурализованной сеточке.

Правильность применяемого способа расчётов обосновывается на том, что перед этим для верифицирования в исследованиях [4, 5, 2, 9, 33, 12, 13, 14, 15] были привлечены соответствующие опытные сведения по теплосъёму и гидравлическим сопротивлениям для трубы с полукруглым внутренним оребрением (в т.ч., диафрагмы), в которых было получено хорошее коррелирование теории с экспериментом.

Установленная в предшествующих авторских теоретических исследованиях (к примеру, в тех же [4, 5, 2, 9, 33, 12, 13, 14, 15]) соответственность существующей экспериментальной информации использованной методики расчёта для местных и интегральных показателей потока и теплосъёма в трубе с внутренним оребрением обосновывает её реализацию при выявлении закономерностей осредняемых или интегральных показателей теплосъёма в каналах при различных температурных факторах $\theta_c = 0,4 \div 4,0$ как зависимость от канальных геометрий и режимных параметров течений теплоносителей.

В данной статье рассмотрению подвергался самый распространённый случай турбулизаторов с полукруглыми поперечными профилями, что присуще для трубы с диафрагмами, т.к. для турбулизаторов более резких очертаний диапазон сходимости задачи может быть ощутимо более узким.

Рассмотренный аспект является существенным на том основании, что возникает необходимость знания величины влияния температурного фактора (в т.ч., для довольно широкого диапазона его изменения $\theta_c = 0,4 \div 4,0$) на интенсифицированные теплообмен и гидросопротивление в трубе с внутренним оребрением как зависимость от определяющих показателей. Важным представляется вопрос о том, каковы различия законов изменения теплообмена и сопротивления для гладких труб и труб с выступами.

В рамках настоящей статьи ставится задача исследования на более высоком уровне, по сравнению с интегральными моделями, и с более высокой точностью неизотермического интенсифицированного теплообмена на воздухе ($Pr = 0,72$) в трубе с полукруглым внутренним оребрением для широкого диапазона изменения относительной температуры стенки ($\theta_c = 0,4 \div 4,0$) для наиболее характерных режимных и геометрических показателей трубы с внутренним оребрением [7, 8, 20] ($d/D = 0,98 \div 0,90$; $t/D = 0,25 \div 1,00$; $Re = 10^4 \div 5 \cdot 10^5$).

Теплофизические свойства газообразного теплоносителя (в данном случае – воздуха) выбирались так же, как и в монографиях [23, 25].

В качестве основополагающих расчётных относительных симплексов следует избрать параметры ξ/ξ_0 , $Nu_{г\lambda}/Nu_0$ которые показывают, насколько неизотермические сопротивление и теплообмен отличаются от изотермических в зависимости от температурного фактора θ_c . Аналогичные зависимости для гладких труб – $\xi_{г\lambda}/\xi_{г\lambda 0}$, $Nu_{г\lambda}/Nu_{г\lambda 0}$ – выбирались на основании работ [23, 25].

Основанием для такого анализа служит метод относительного соответствия, который находит широкое применение в исследованиях интенсифицированного теплосъёма [7, 8, 35, 36].

В дальнейшем полученные расчётные данные позволили сделать анализ влияния на неизотермические сопротивление и теплообмен (при других одинаковых условиях) числа Рейнольдса, относительной высоты (по параметру d/D) и шага между выступами (t/D).

5. Теоретические характерные линии тока и изотермы, рассчитанные по предложенной модели, для исследуемых в статье различных температурных факторов в широких диапазонах их изменений ($\theta_c=0,4\div 4,0$) в прямой круглой трубе с циклическими поверхностно установленными выступами потоков полукруглых поперечных профилей при разных геометрических и режимных условиях

На рисунке 2 для наглядного подтверждения рассчитанных в статье применённым способом результатов приводятся свойственные совокупности характерных расчётных линий токов для трубы с поперечным кольцевым внутренним оребрением полукруглых профилей для изученных условий течений при закрытой, полуоткрытой, открытой впадины (классифицирование по [12, 11, 13, 29, 14, 15, 16, 28, 34]).

В данной статье линии тока приводятся при других одинаковых условиях, но при максимальной разности для температурного фактора θ_c : для $\theta_c=0,4$ и $\theta_c=4,0$, чтобы показать максимальное влияние неизотермичности на них.

Как видно из рисунка 2, неизотермичность оказывает наибольшее влияние на линии токов у турбулизаторов с большой относительной высотой, а на меньших высотах это влияние менее выражено.

На рисунке 3 показаны изотермы для условий, аналогичных течениям рисунка 2. Уровни температур показаны холодным и тёплым цветом в долях от θ_c : для охлаждения – от 0,4 до 1,0; для нагрева – от 1,0 до 4,0.

Как видно из рисунка 3, неизотермичность качественно влияет на изотермы в трубах с турбулизаторами. Для нагрева выравнивание температуры происходит на больших толщинах, чем для охлаждения, что обуславливает снижение степени интенсификации теплообмена.

На рисунке 2 отчётливо видны открытые, полуоткрытые и закрытые впадины между турбулизаторами соответственно (классификация по [12, 11, 13, 29, 14, 15, 16, 28, 34]): рисунок 2, б и г; рисунок 2, а; рисунок 2, в.

Анализ линий тока позволяет качественно оценить, какой конкретно подслон турбулизируется, т.е. позволяет судить о характере интенсификации теплообмена. Например, если вихревые зоны забрасываются в ядро потока, то течение интенсифицируется при большом увеличении гидравлического сопротивления; наличие застойных зон указывает на то, что теплообмен будет ухудшаться при увеличении гидравлического сопротивления; важно расположение точки присоединения турбулентного пограничного слоя, поскольку именно там имеет место максимальное увеличение теплоотдачи при минимизации гидравлического сопротивления и т.д., и т.п.

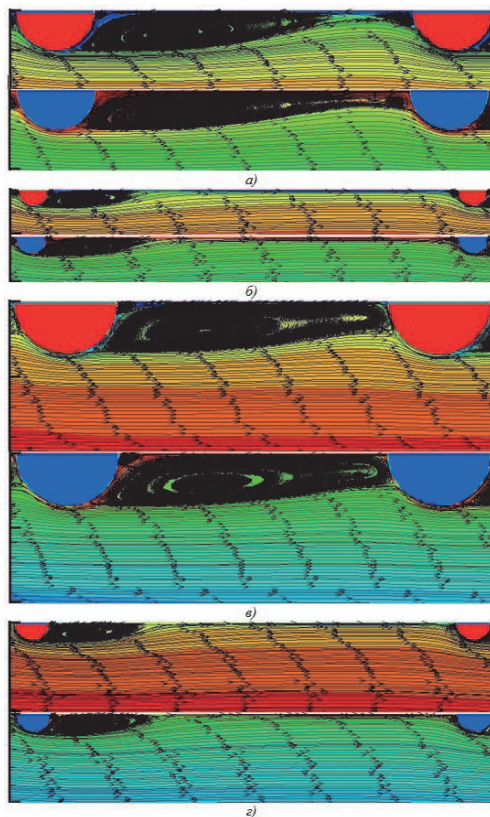


Рисунок 2 – Расчётные линии тока при течении в трубе с турбулизаторами с полукруглыми поперечным исечениями для интенсификации теплообмена при $\theta_c=4,0$ и $\theta_c=0,4$ соответственно:

- а) $d/D=0,90$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$;**
- б) $d/D=0,93$; $t/D=1,00$; $Re=5 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$;**
- в) $d/D=0,93$; $t/D=0,25$; $Re=10^5$; $Pr=0,72$;**
- г) $d/D=0,96$; $t/D=0,50$; $Re=5 \cdot 10^5$; $Pr=0,72$**

Подробный анализ характерных линий тока ранее был проведён в работах [1, 3, 4, 5, 2, 6, 9, 33, 12, 13, 29, 14, 34, 22, 31], поэтому в рамках данной статьи приводится ограниченный материал, частично верифицирующий полученные результаты расчётов.

Общие различия в закономерности изменения относительной теплоотдачи и гидросопротивления в зависимости от температурного фактора обосновываются тем, что его влияние на поля температур будут больше, чем на линии тока (рисунок 2 и рисунок 3), поэтому и влияние на относительный теплообмен температурного фактора в среднем больше, чем на относительное гидравлическое сопротивление (рисунки 4-7) для всех исследуемых в статье параметров.

6. Анализ результатов расчётов по реализованной модели относительных теплообмена $Nu_{г\lambda}/Nu_{г\lambda 0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\lambda}/\xi_{г\lambda 0}$ в зависимости от температурного фактора в широком диапазоне его изменения ($\theta_c=0,4\div 4,0$) при течении воздуха в прямой круглой трубе с циклическими поверхностно установленными выступами потоков полукруглых поперечных профилей при разных геометрических и режимных условиях

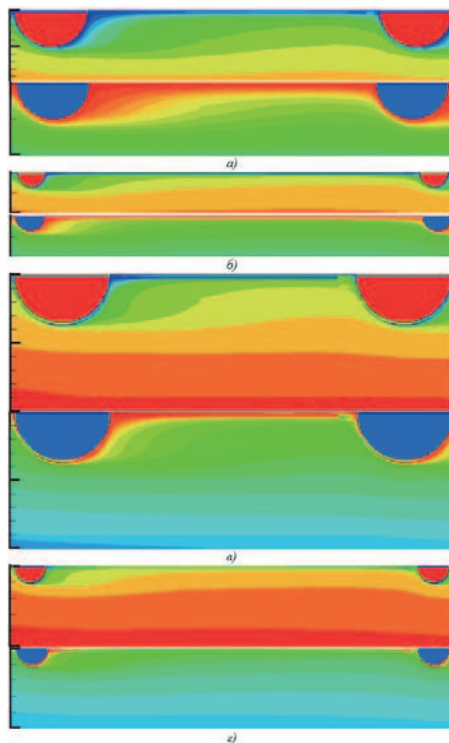


Рисунок 3 – Изотермы при течении в трубе с турбулизаторами с полукруглыми поперечным исечениями для интенсификации теплообмена при $\theta_c=4,0$ и $\theta_c=0,4$ соответственно:

- а) $d/D=0,90$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$;
- б) $d/D=0,93$; $t/D=1,00$; $Re=5 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$;
- в) $d/D=0,93$; $t/D=0,25$; $Re=10^5$; $Pr=0,72$;
- г) $d/D=0,96$; $t/D=0,50$; $Re=5 \cdot 10^5$; $Pr=0,72$

Результаты расчётный вычислений по реализованной модели параметра относительных теплообмена $Nu_{г\lambda}/Nu_{г\lambda 0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\lambda}/\xi_{г\lambda 0}$ в зависимости от температурного фактора в широком диапазоне его изменения ($\theta_c=0,4\div 4,0$) приводятся на рисунках 4-7.

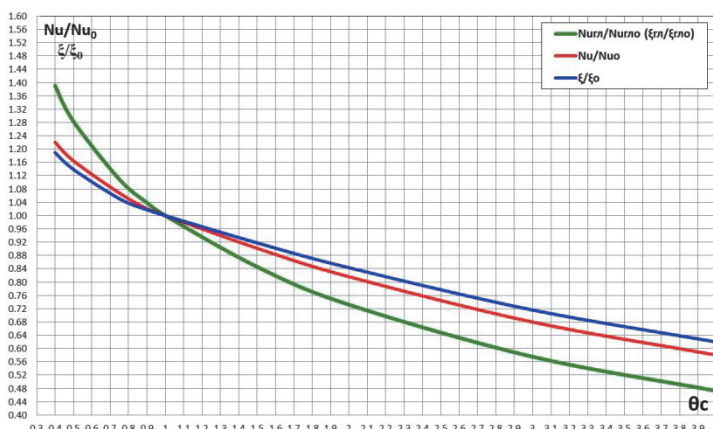


Рисунок 4 – Средние значения параметров $Nu_{г\text{л}}/Nu_{г\text{л}0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\text{л}}/\xi_{г\text{л}0}$ для диапазонов изменения геометрических параметров труб с турбулизаторами $d/D=0,98\div 0,90$; $t/D=0,25\div 1,00$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div 4,0$ при критерии Рейнольдса $Re=10^4$

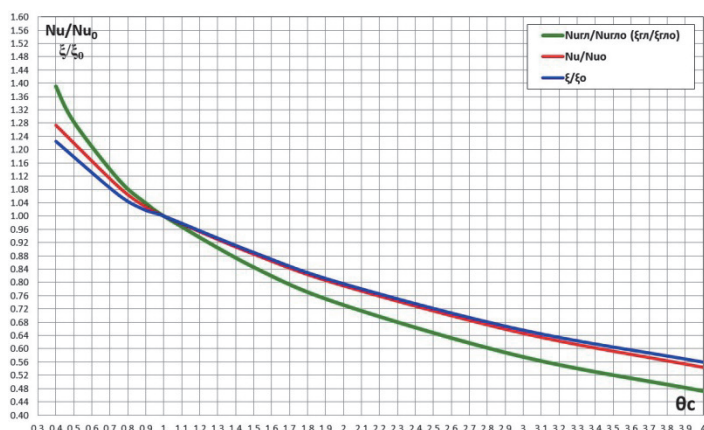


Рисунок 5 – Средние значения параметров $Nu_{г\text{л}}/Nu_{г\text{л}0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\text{л}}/\xi_{г\text{л}0}$ для диапазонов изменения геометрических параметров труб с турбулизаторами $d/D=0,98\div 0,90$; $t/D=0,25\div 1,00$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div 4,0$ при критерии Рейнольдса $Re=5\cdot 10^4$

На рисунках 4-7 приведены средние значения параметров $Nu_{г\text{л}}/Nu_{г\text{л}0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\text{л}}/\xi_{г\text{л}0}$ для диапазонов изменения геометрических параметров труб с турбулизаторами $d/D=0,98\div 0,90$; $t/D=0,25\div 1,00$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div 4,0$ для различных чисел Рейнольдса соответственно $Re=10^4\div 5\cdot 10^5$.

Как видно из рисунка 4, средние значения интенсифицированных неизо-термических сопротивления ξ/ξ_0 и теплообмена Nu/Nu_0 явно меньше, чем аналогичные значения для гладких труб $\xi_{г\text{л}}/\xi_{г\text{л}0}$ и $Nu_{г\text{л}}/Nu_{г\text{л}0}$ во всём диапазоне относительной температуры стенки θ_c .

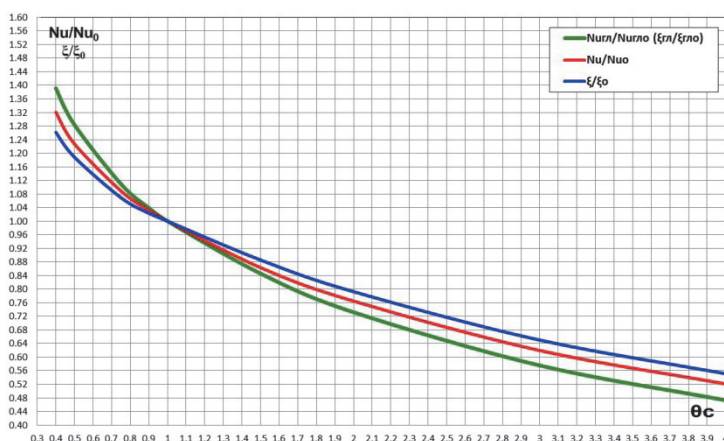


Рисунок 6 – Средние значения параметров $Nu_{гЛ}/Nu_{гЛ0}$ и гидросопротивления $\xi_{гЛ}/\xi_{гЛ0}$ для диапазонов изменения геометрических параметров труб с турбулизаторами $d/D=0,98\div0,90$; $t/D=0,25\div1,00$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div4,0$ при критерии Рейнольдса $Re=10^5$

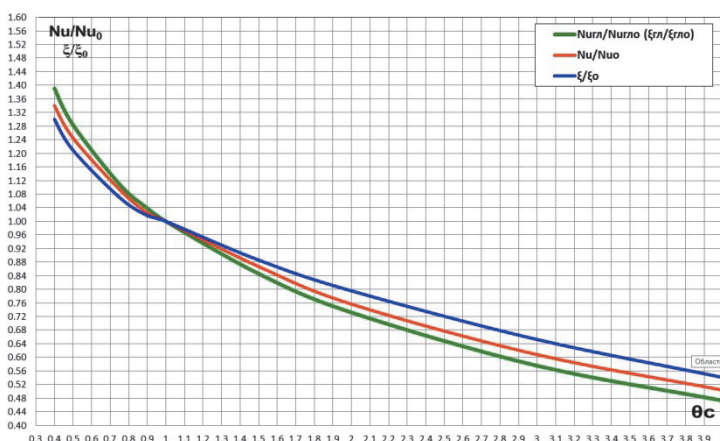


Рисунок 7 – Средние значения параметров $Nu_{гЛ}/Nu_{гЛ0}$ и гидросопротивления $\xi_{гЛ}/\xi_{гЛ0}$ для диапазонов изменения геометрических параметров труб с турбулизаторами $d/D=0,98\div0,90$; $t/D=0,25\div1,00$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div4,0$ при критерии Рейнольдса $Re=5\cdot10^5$

Вышеприведённые данные детерминируют воздействия температурного фактора в трубах с турбулизаторами ниже, чем в гладких трубах, что ранее было теоретически выявлено на основе интегральных моделей интенсифицированного теплообмена [12, 24, 26, 30, 27].

При увеличении числа Рейнольдса до значений $Re=5\cdot10^4$, 10^5 , $5\cdot10^5$ относительные интенсифицированные сопротивления и теплообмен (ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0) также меньше аналогичных значений для гладких труб ($\xi_{гЛ}/\xi_{гЛ0}$ и $Nu_{гЛ}/Nu_{гЛ0}$), что отчётливо видно на рисунках 5-7 соответственно. Влияние на теплообмен темпе-

ратурного фактора в среднем больше, чем на гидросопротивление (рисунки 4-7) для всех исследуемых чисел Рейнольдса. С увеличением числа Рейнольдса средние значения ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0 увеличиваются при снижении $\theta_c < 1$, т.е. при охлаждении воздуха и уменьшаются при увеличении $\theta_c > 1$, т.е. при нагревании воздуха. Т.о., с увеличением числа Рейнольдса влияние температурного фактора θ_c на относительные сопротивления и теплообмен в трубах с турбулизаторами становятся ближе к аналогичным значениям для гладких труб.

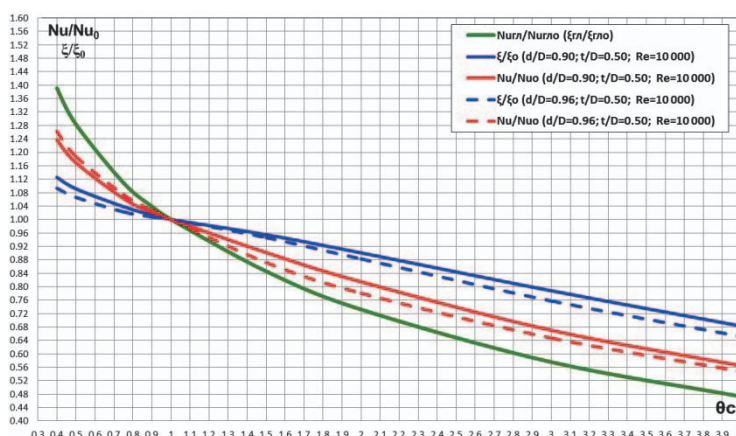


Рисунок 8 – Значения параметров теплообмена $Nu_{г\lambda}/Nu_{г\lambda 0}$ и гидросопротивления $\xi_{г\lambda}/\xi_{г\lambda 0}$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div 4,0$ при различных относительных высотах выступов ($d/D=0,96$ и $d/D=0,90$) при других одинаковых условиях ($t/D=0,50$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$)

Полученные результаты расчётов средних значений ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0 указывают на то, что закономерности влияния температурных факторов на сопротивление и теплообмен качественно отличаются от аналогичных закономерностей для гладких труб, что ранее было теоретически выявлено, базирываясь на интегральных моделях интенсифицированного теплообмена [12, 24, 26, 30, 27]. Следовательно, данная закономерность была подтверждена и уточнена на основании модели более высокой точности.

В дальнейшем следует проанализировать влияние неизотермичности на интенсифицированные не только на средние, но и на конкретные неизотермические значения сопротивления и теплообмена (ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0) (при других одинаковых условиях) относительной высоты (по параметру d/D), шагов между выступами (t/D), критерия Рейнольдса.

Полученные расчётные данные позволили сделать анализ влияния на неизотермические сопротивление и теплообмен относительных высот выступов, при других одинаковых условиях.

На рисунке 8 показаны характерные изменения неизотермических относительных коэффициентов сопротивления ξ/ξ_0 и чисел Нуссельта Nu/Nu_0 в зависимости от относительных высот турбулизаторов.

Влияние неизотермичности на относительные теплообмен и гидросопро-

тивление в трубах с турбулизаторами становится (при других одинаковых условиях), как правило, меньшим при увеличении относительной высоты выступа (т.е. при уменьшении параметра d/D), что хорошо видно на рисунке 8 для $d/D=0,96$ и $d/D=0,90$; $t/D=0,50$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$.

Также полученные расчётные данные позволяют сделать анализ влияния на неизотермические сопротивление и теплообмен безразмерного шага между выступами t/D для остальных одинаковых условиях.

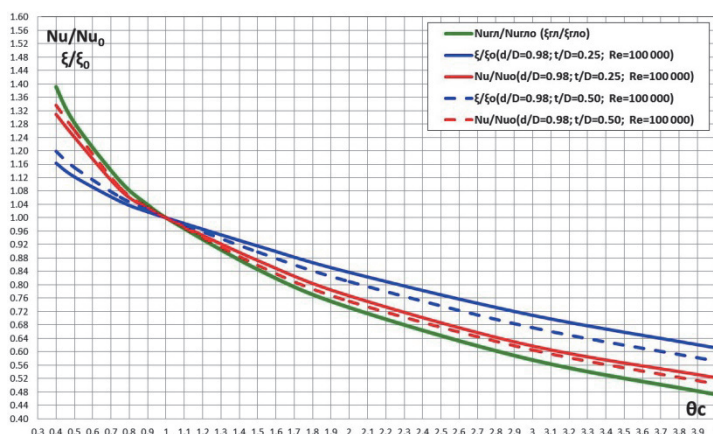


Рисунок 9 – Значения параметров теплообмена $Nu_{гд}/Nu_{гд0}$ и гидросопротивления $\xi_{гд}/\xi_{гд0}$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div 4,0$ при различном относительном шаге между выступами ($d/D=0,25$ и $d/D=0,50$) при других одинаковых условиях ($d/D=0,98$; $Re=10^5$; $Pr=0,72$)

На рисунке 9 показаны характерные изменения неизотермических относительных коэффициентов сопротивления ξ/ξ_0 и чисел Нуссельта Nu/Nu_0 как функции безразмерных шагов между выступами.

Воздействия неизотермичности на относительные теплообмен и гидросопротивление в каналах с выступами становится (при других одинаковых условиях), как правило, меньшим с уменьшением относительных шагов между выступами, что хорошо видно на рисунке 9 для $t/D=0,25$ и $d/D=0,50$; $d/D=0,98$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$.

Кроме этого, полученные расчётные данные позволяют сделать анализ влияния на неизотермические сопротивление и теплообмен критериев Рейнольдса, при других одинаковых условиях.

На рисунке 10 показаны характерные изменения неизотермических относительных коэффициентов сопротивления ξ/ξ_0 и чисел Нуссельта Nu/Nu_0 в зависимости от критерия Рейнольдса.

Влияние неизотермичности на относительные теплообмен и гидросопротивление в трубах с выступами становится (при других одинаковых условиях), как правило, меньшим для меньших критериев Рейнольдса, нежели для больших, что хорошо видно на рисунке 10 для $d/D=0,90$; $t/D=0,25$; $Re=5\cdot 10^4$ и $Re=5\cdot 10^5$; $Pr=0,72$. Эти данные коррелируют со средними данными, приведёнными на ри-

сунках 4-7.

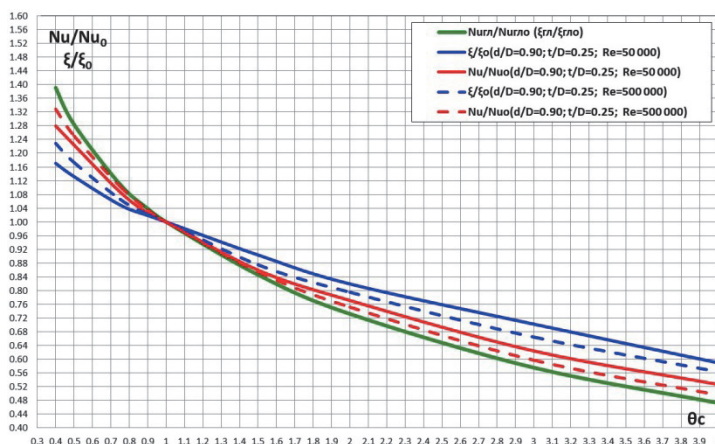


Рисунок 10 – Значения параметров теплообмена $Nu_{\text{гл}}/Nu_{\text{гл}0}$ и гидросопротивления $\xi_{\text{гл}}/\xi_{\text{гл}0}$ в зависимости от температурного фактора $\theta_c=0,4\div4,0$ при различных относительных критериях Рейнольдса ($Re=5\cdot10^4$ и $Re=5\cdot10^5$) при других одинаковых условиях ($d/D=0,90$; $t/D=0,25$; $Pr=0,72$)

Полученные в статье численные расчёты по влиянию неізотермичности на интенсифицированные на неізотермические параметры гидросопротивления и теплоосъёма при турбулентных потоках воздуха в трубах с выступами (ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0) (при остальных одинаковых условиях): относительной высоты, шага между выступами, числа Рейнольдса в зависимости от относительной температуры стенки θ_c полностью качественно согласуются, а количественно уточняются, с аналогичными предыдущими результатами, полученными на основе интегральных моделей теплообмена [12, 24, 26, 30, 27]. Выявленные закономерности для труб с турбулизаторами качественным образом отличаются от аналогичных закономерностей для гладких труб, поскольку влияние температурного фактора на гидросопротивление и теплообмен всегда ниже и зависят от режима течения и геометрии канала.

Частичным верифицированием полученных рассчитанных численных закономерностей служат данные аналитического решения для интенсифицированной теплоотдачи, полученного по модифицированным четырёхслойным моделям для турбулентных пограничных слоёв [3, 12, 28, 34], а также соответствующие законы для предельной теплоотдачи [7, 8, 35, 36, 20].

Теоретические закономерности позволили установить закономерность относительных теплообмена и гидросопротивления в зависимости от неізотермичности в тех областях, в которых ещё не имеются надёжные экспериментальные результаты, что позволяет прогнозировать диапазоны увеличения и уменьшения интенсифицированного теплообмена.

7. Главные выводы

1. Саккумулированный и реализованный в настоящей статье способ вычислений, опирающийся на решении объёмно-контрольным средством рей-

нольдсовых уравнений, которое соединялось ментер-моделью перемещения сдвиг-напряжения и энерго-уравнения на многомасштабной спмоперекрещивающейся структуризированной сеточке обуславливает вычисление относительных гидросопротивления и теплосъёма воздушного теплоносителя в трубах с окружающими внутренними рёбрами полукруглого профиля при различном температурном факторе с приемлемыми невязками.

2. Общие различия в закономерностях изменений относительной теплоотдачи и гидросопротивления в зависимости от температурного фактора обосновываются тем, что его влияние на поля температур будут больше, чем на линии тока, поэтому и влияние на относительный теплообмен температурного фактора в среднем больше, чем на относительное гидравлическое сопротивление для всех исследуемых в статье параметров.

3. Средние значения интенсифицированных неизотермических сопротивления ξ/ξ_0 и теплообмена Nu/Nu_0 явно меньше, чем аналогичные значения для гладких труб $\xi_{гл}/\xi_{гл0}$ и $Nu_{гл}/Nu_{гл0}$ во всём диапазоне относительной температуры стенки θ_c .

4. Полученные в статье данные детерминируют воздействия температурного фактора в трубах с турбулизаторами ниже, чем в гладких трубах, что ранее было теоретически выявлено на основе интегральных моделей интенсифицированного теплообмена.

5. С увеличением числа Рейнольдса средние значения ξ/ξ_0 и Nu/Nu_0 увеличиваются при снижении $\theta_c < 1$, т.е. при охлаждении воздуха и уменьшаются при увеличении $\theta_c > 1$, т.е. при нагревании воздуха. Следовательно, с увеличением числа Рейнольдса влияние температурного фактора θ_c на относительные сопротивления и теплообмен в трубах с турбулизаторами становятся ближе к аналогичным значениям для гладких труб.

6. Теоретические расчётные данные позволили получить закономерности относительных теплоотдачи и гидросопротивления в зависимости неизотермичности в тех областях, где ещё не имеются надёжные экспериментальные данные, что позволяет прогнозировать диапазоны увеличения и уменьшения интенсифицированного теплообмена.

7. Полученные закономерности могут использоваться при инженерного и научного расчёта интенсифицированного турбулентного теплообмена при течении в каналах с выступами, используемых в перспективных теплообменниках, применяемых в авиационной, ракетной, космической технике.

Литература

1. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А. Исаев, И.Е. Лобанов, О.А. Бояркина и др. // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 2010. С. 84-87.
2. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в

- трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223-230.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. 2004. Т. 11. № 2. С. 28-35.
 4. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 57-60.
 5. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях интенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 54-60.
 6. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А. Исаев, П.А. Баранов, И.Е. Лобанов и др. // Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 66.
 7. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1972. 220 с.
 8. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
 9. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. Минск, 2008. Т. 1. С. 101-103.
 10. Лобанов И.Е. Математическое моделирование гидравлического сопротивления в трубах с турбулизаторами для газообразных теплоносителей с переменными теплофизическими свойствами // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2018. № 61 (сентябрь). С. 68-77.
 11. Лобанов И.Е. Математическое моделирование динамики развития вихревых структур в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 12. С. 9-15.
 12. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. М., 2005. 632 с.
 13. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 7. С. 45-58.
 14. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена в трубах с полукруглыми турбулизаторами в зависимости от числа Прандтля для различных геометрических и режимных параметров // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Том 46. № 4. С. 91-101. DOI:

- 10.21822/2073-6185-2019-46-4-91-101.
15. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей с переменными физическими свойствами в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 144-147.
16. Лобанов И.Е. Структура вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Электронный научный журнал «Исследования технических наук». 2012. Май. Выпуск 4. Том 2. С. 18-24.
17. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование кинетической энергии турбулентных пульсаций и её составляющих в трубах с турбулизаторами // Московское научное обозрение. 2013. № 1. С. 23-30.
18. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование теплообмена в прямых круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока полукруглого поперечного сечения в зависимости от числа Прандтля для различных геометрических и режимных параметров // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1576364809>.
19. Лобанов И.Е. Теоретическое математическое моделирование гидравлического сопротивления в прямых круглых трубах с турбулизаторами для газообразных теплоносителей с переменными теплофизическими свойствами, изменяющихся монотонным образом // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1556984658>.
20. Лобанов И.Е. Теоретическое математическое моделирование осреднённого теплообмена в прямых круглых трубах с турбулизаторами для газообразных теплоносителей с переменными теплофизическими свойствами, изменяющихся монотонным образом // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества «Ped-library.ru». 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1556984958>.
21. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами для газообразных теплоносителей с переменными теплофизическими свойствами // Электронный периодический рецензируемый научный журнал «SCI-ARTICLE.RU». 2019. № 73 (сентябрь). С. 57-70.
22. Лобанов И.Е., Антюхов И.В. Современные проблемы интенсификации теплообмена в каналах с помощью периодически поверхностно расположенных турбулизаторов потока прямоугольного поперечного сечения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3-2(299). С. 22-27.
23. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. 2011. № 12. С. 4-15.

24. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: Издательство МАИ, 2011. 160 с.
25. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве). В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супер-многослойных и компаундных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. 288 с.
26. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
27. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
28. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: СПб, 2001. 360 с.
29. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалёв С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. 470 с.
30. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 548 с.
31. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации тепломассообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании её потоком несжимаемой вязкой жидкости с учётом влияния асимметрии формы, естественной конвекции и нестационарных процессов / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, А.Е. Усачов и др. // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 121-124.
32. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев и др. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
33. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д. Госмен, В.М. Пан, А.К. Ранчел и др. М.: Мир, 1986. 234 с.
34. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
35. Koroleva A.P., Kuzmenkov N.V., Frantczuzov M.S. Investigation on heat transfer enhancement in a circular pipe with artificial roughness / The Third Conference «Problems of Thermal Physics and Power Engineering» // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Conf. Ser.: 1683 022105. P.: 1-8. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/2/022105.
36. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32. № 8. P. 1598.

УДК 621.337, 004.9

Применение MBSE-методологий при создании аэрокосмических систем

Галина Альбертовна Стрельцова, кандидат технических наук, доцент кафедры
Информационных технологий и управляющих систем,

Галина Николаевна Исаева, кандидат технических наук,
доцент кафедры Прикладного программного обеспечения,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Рассмотрены основные аспекты применения MBSE-методологий при создании аэрокосмических систем. Описаны этапы поставочных задач в MBSE. Даны рекомендации по построению алгоритмов моделей данных и информационных моделей аэрокосмического объекта согласно стандартам SE.

Сложная система, авиакосмический объект, системная модель, цифровой двойник, метамоделирование, жизненный цикл.

MBSE methodologies' application at creation of aerospace systems

Galina Albertovna Streltsova, candidate of engineering sciences, associate professor
at the Department Information Technologies and Control Systems

Galina Nicolaevna Isaeva, candidate of engineering sciences,
associate professor at the Department Application Software,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

There are considered main aspects of MBSE methodologies' application at creation of complex systems. There are described stages of tasks set to MBSE. There are given recommendations at construction of algorithms for data models and information models of aerospace object according to SE standards.

Complex system, aerospace object, system model, digital twin, metamodeling, life cycle.

Введение

История создания таких сложных систем, как аэрокосмические объекты, имеет длительный вековой срок и богатые события. За прошлый век сложилась устойчивая технология проектирования и производства самых разнообразных летательных технических устройств. Однако широкое применение цифровых технологий диктует смену парадигмы всей сферы производства. Аэрокосмиче-

ская отрасль не является исключением.

Термин MBSE (Model Based System Engineering) дословно переводится как инженерные расчеты системных моделей. На сегодняшний день MBSE считается наиболее востребованной технологией системной инженерии SE (System Engineering). Это не означает, что MBSE считается чем-то качественно новым понятием в изучении сложных систем. Так как такие базовые понятия, как: «система, системность, системный подход», появились еще в первой половине двадцатого века, то сама SE является аналогом советской научно-технической дисциплины: системотехники. Ее состав: схемотехническое проектирование, воспроизводство, испытание и эксплуатация соответственно технических или социально-технических систем. Объекты системотехники: так называемые сложные системы. Состав таких систем: множество подсистем, находящихся в постоянном взаимодействии. Результатом подобного взаимодействия является качественно новое свойство сложной системы. Этим свойством не обладают подсистемы, входящие в структуру сложной системы.

Так как MBSE переживает стадию становления, то на практике технология трактуется неоднозначно. По мнению одних специалистов, MBSE – практический инструмент на основе языка визуального моделирования SysML. При этом технология позволяет применить и другой языково-ориентированный инструмент моделирования. С помощью SysML детально разрабатывают и рассчитывают аналитику, архитектуру и поведение сложной системной модели. Основные требования к системной модели: полнота функций, высокая производительность, учет взаимодействий между подсистемами. Инструмент SysML позволяет создать модель DT (digital twin), то есть «виртуальную модель физического объекта: цифровой двойник».

Существует другая точка зрения, при которой MBSE – это модельное проектирование MBD (Model-based definition модельно-ориентированное проектирование). Начальный этап проектирования: описание требований. Промежуточные этапы: архитектура, проектирование, оценка поведения с помощью симуляции. Инструменты моделирования, как правило, языково-ориентированные. Конечный этап: описание выходных спецификаций проектирования. Довольно часто MBD полностью не рассматривает протекание процессов жизненного цикла по стандартам SE.

Данные точки зрения являются неверными из-за их ограниченности представлений. Понятие MBSE не описывается моделью любого типа или набором документов. Можно сказать, что MBSE представляет собой унифицированную базовую модель. Ее можно называть моделью данных и информации. Цель такого моделирования: обеспечение согласованности данных и информации в реальной сложной системной модели. При этом разработанная модель данных и информации должна представлять полный комплекс элементов SE (от исходного текста до выходных документов). Модель SE строится по этапам жизненного цикла (ЖЦ) объекта. Рассмотрим более подробно основные особенности применения методологии MBSE при создании сложных систем.

Постановка задачи в MBSE

Подход MBSE на практике характеризуется следующим:

1. Вместо бумажной документации в процессе проектирования применяются только цифровые модели.
2. Данные модели должны поэтапно детализироваться в ЖЦ объекта.

В [1] рассматривается пример протекания процессов проектирования строительных объектов традиционным способом по документам и с помощью цифровых моделей MBSE. Традиционный способ (ориентированный на документы) проектирования предполагает, что эскизные наработки проекта создаются генеральным конструктором. Далее эскизы проходят детальную проработку инженерами конструкторами, которые в результате создают цифровой макет проекта. При модельно-ориентированном подходе генеральный конструктор обычно создает несколько вариантов концептуальных моделей и, учитывая соответствующие критерии, выбирает оптимальную модель. Далее с моделью работает конструкторский отдел, создавая цифровой макет. Однако в процессах проектирования должен участвовать и еще один необходимый специалист: системный инженер. Он не является инженером-конструктором, а занимается разработкой и управлением моделями, которые возникают в процессе определения требований. Начало проекта для системного инженера: понимание «миссии» по проекту, затем происходит постепенное выявление требований к системной модели. Таким образом, выбирается проектное решение, которое постепенно осознается на протяжении всего процесса разработки. Обязанностью системного инженера также является создание моделей для прогнозирования возможностей проекта и совершенствование моделей по результатам тестирования и эксплуатации. Таким образом, повышается точность системного моделирования в процессе проектирования. Системный инженер должен управлять взаимодействием между проектами подсистем и модели системы в целом. Системные модели – основа системных операций. Системная основа, которую обязан поддерживать системный инженер, в результате обеспечивает наиболее эффективные проектные процедуры или спецификации.

SE так трактует необходимую обязанность системного инженера: управление системными моделями. Он должен рассматривать все этапы ЖЦ объекта (пункт 2). Существует несколько определений ЖЦ (например, в [3]). В основном объектные модели ЖЦ обычно разделяют на следующие виды: прототипов, V-модели, каскадные (водопадные), спиральные, инкрементные и RAD-модели. Модели ЖЦ выбираются согласно требованиям к его характеристикам. Если требования к модели определены заранее, а также хорошо известны или легко определяются, то выбирается V-модель. В процессах SE обычно применяют V-модели (например, V-модель процесса SE разработки системы рисунка 1).

V-модель рисунка 1 разделяет ЖЦ системы на левую (проектирования) и правую (реализации) ветви. Левая ветвь – «Определение и декомпозиция», правая ветвь соответствует процессу «Интеграция и сборка». Ветви объединены в общий процесс: «Изготовление и сборка». Сплошные стрелки показывают направление процессов ЖЦ в V-модели. Ветви ЖЦ разделены на этапы. Для левой

ветви: требования (заказчика), архитектура системы, проектирование подсистем и компонентов. Правая ветвь: проверка системы (по ее работоспособности), последовательные интеграции систем и подсистем, тестирование компонентов. Детализация модели осуществляется слева направо, а штриховые стрелки показывают обратные связи между процессами правой и левой ветвей модели.

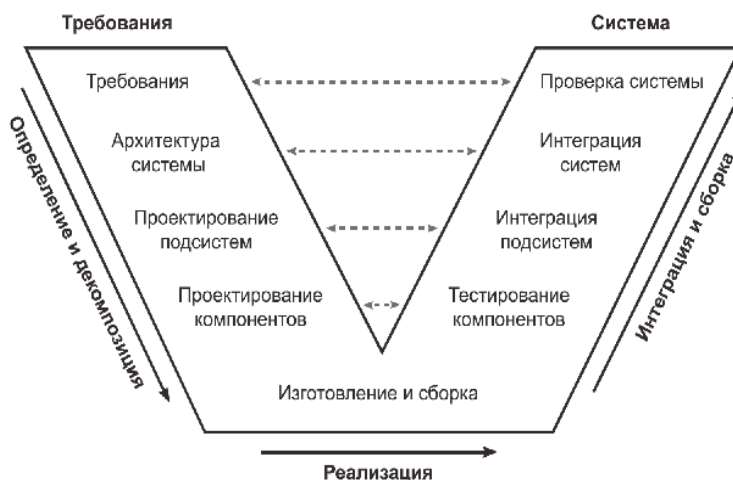


Рисунок 1 – V-модель процесса SE разработки системы

К требованиям V-модели относят ожидаемую количественную или качественную характеристику (свойство) объекта и соответствующие ему ограничения и условия. Обычно требования – это показатели цели в виде контролируемых параметров объекта с заданной точностью. Таким образом, формируют многоуровневую систему требований. Система представляет собой иерархическую взаимосвязанную структуру данных, описывающих формализованные требования к объекту в целом и его составляющим. Система требований верхних уровней декомпозируется для нижних уровней по показателям цели и ограничениям по ресурсам. Многоуровневая система требований может быть сформирована как многоуровневая матрица требований. Данные, поступающие от эксплуатируемого объекта, сверяются с этой матрицей, и далее подлежат обработке цифровой моделью. В результате составляется прогноз: по поведению объекта в различных условиях эксплуатации, по необходимой оптимизации затрат на техническое обслуживание и ремонт объекта, а также на необходимость дальнейшей модернизации объекта.

Математическое представление моделей в MBSE описывается в виде:

- целевых требований в форме ограничений;
- критериев цели (в форме целевых функций);
- моделей многокритериальной оптимизации (в форме ограничений и критериев оптимизации);
- собственно алгоритмами.

Суть подхода MBSE: традиционный анализ и синтез системной модели. Анализ заключается в следующем:

- возможный сбор и систематизация исходных данных. Представляются известные объектные профильные модели, анализируются и выбираются самые сопоставимые из них;
- ставятся требования. Выбираются методологии и средства моделирования.

По результатам анализа проводится синтез:

- итоговой постановки требований к системной модели;
- обзора ранее существующих решений при выборе сопоставимых профильных моделей.

Окончательная конфигурация системной объектной модели подхода MBSE формируется при совмещении этих представлений.

Рисунок 2 источника [1] представляет график процесса создания проектируемого объекта на различных этапах ЖЦ. По горизонтали график показывает этапы ЖЦ проекта (согласно V-модели) от концептуального эскизного проекта (ЭП) до его системной утилизации. По вертикали показываются объемы проектных требований (в %). Последовательно в процессах ЖЦ потребности заказчиков выявляют системные проектные требования, далее формируется архитектура, которая обеспечивает создание рабочего проекта (РП). Выбор инженерных решений проекта на каждом этапе ЖЦ уменьшается.

Основные кривые: 2 и 4. Кривая 2 показывает процентный выбор решений (по технологии, конфигурации, производительности и стоимости). Кривая 4 исследует понесенные затраты в проекте. Дополнительные кривые: 1 демонстрирует легкость внесения изменений в проект, 3 характеризует объем знаний о проекте.



Рисунок 2 – График процесса создания проектируемого объекта на различных этапах ЖЦ

По кривой 1 изменения в проекте максимальны в начале процесса концептуального ЭП. В конце этапа ЭП возможности уменьшаются. Что показывает необходимость внесения изменений в проект желательно на стадии концептуального ЭП. Напротив, в начале процесса кривая 2 резко возрастает, а затем рост замедляется, поэтому основные проектные решения желательно утвердить на проектных этапах ЖЦ. Кривая 4 (рост затрат) имеет s-образный характер. На проектных этапах ЖЦ затраты минимальны, а затем они резко возрастают в момент передачи проекта в производство. Кривая 3 (объем знаний о системе) также имеет s-образный характер, но с менее выраженным ростом. Данные графики показывают, что эффективность создания проекта в MBSE, прежде всего, зависит от эффективности решений в процессе концептуального проектирования ЖЦ.

В Московском Физико-техническом институте – национальном исследовательском университете (МФТИ) с наибольшим успехом разрабатываются соответствующие учебные программы по применению SE в аэрокосмической отрасли [2].

Следует учесть, что аэрокосмический объект – это, прежде всего, техническая система. Технические системы в SE определяются следующими факторами: предназначением; требованиями по их применению, функциями преобразования вещества, энергии и информации, а также компонентами системы, которые должны реализовать данные функции.

В Центре прикладных систем искусственного интеллекта МФТИ, который занимается проблемами современных концептуальных моделей в [9] был представлен базовый алгоритм модельно-ориентированного концептуального проектирования. Проектируется так называемый целевой объект. Целевым объектом при этом (иначе целевой системой) называют объект, «интересный» для наблюдателя. Задаются описания целевых объектов: предназначения (требования). Они могут быть представлены в виде абстрактных моделей «сущностей» и «связанностей». А также как техническая конструкция из звеньев, блоков, узлов и агрегатов.

Алгоритм включает в себя четыре этапа моделирования: онтологическое, архитектурное, математическое и компьютерное, а также моделирование целевой системы.

Первый этап моделирования. Создаются онтологические модели. Исходные данные: предметная область в виде представления объектной модели (целевой системы). Онтологическая модель семантически представляет собой ключевые термины и понятия («сущностей» и их «связанностей») целевой системной модели. Например, в [8] онтологические модели описываются как метамодели, которые формализуют информационную систему (ИС). Язык формализации модели ИС: предметно-ориентированный. В иерархии метамоделирования онтологическая модель является метамоделью среднего уровня M1, с которой работают аналитики, разработчики и CASE-средства. M1 содержит модель нижнего уровня M0 (модель данных). Выше уровня M1 находится лингвистическая метамодель M2 с предметно-независимым языком моделирования. Самый высокий уровень

иерархии мета-метамодель М3. MBSE применяют те же уровни метамоделирования для сложных системных моделей. Уровни «модель М0, метамодель М1, мета-метамодель М2» детализируются и могут трансформироваться, чтобы «породить» новое описание. В результате создаются порождающие «generative-модели». С их помощью система может легко пройти этапы своего ЖЦ: реализацию, интеграцию, верификацию и валидацию.

Второй этап моделирования. Создание моделей архитектуры. Это так называемые frameworks (то есть набор правил, шаблонов и инструментов, которые используются для построения «продуктов» или процессов в программировании, а также в других областях.). Frameworks: структурированные и упорядоченные таблицы. В них записываются иерархические семантические таксономии учитываемых «сущностей» и «связанностей».

Архитектура модели имеет упорядоченную иерархию следующих списков:

- требований к целевой функции;
- функций для реализации требований к целевой системе;
- списка компонент целевой системы для реализации функций целевой системы.

При необходимости включается итерационный процесс пересмотра. Затем происходит формирование таблиц или матриц попарных связанностей всех сущностей целевой системы во всех комбинациях (требования-требования; функции-компоненты; требования-компоненты; функции-функции и т.д.). Для оценки качества связи применяют в общем случае пятибалльную шкалу. В простейшем случае бинарную шкалу: «связи нет» 0, «связь есть» 1.

Так как в методах MBSE можно систематизировать разные точки зрения на целевую систему для поддержки принятия решений, то в общем случае кроме технических для принятия решений нужно рассматривать следующие факторы: технологические, экономические, экологические, социальные. Тогда ячейки таблицы могут иметь несколько чисел, отражающих силу связанности сущностей отдельно с точки зрения указанных факторов. При необходимости результаты формирования таблиц пересматриваются. Включается итерационный процесс пересмотра.

Третий этап моделирования. Вначале для целевой системы формируется список или справочник ее качественных и количественных параметров в виде соответствующих таблиц (матриц) связанности. Затем выбираются математические модели и алгоритмы, отражающие связи параметров целевой системы. Согласно данному выбору далее создаются компьютерные и цифровые модели. Стандарт [4] дает определение математической модели (ММ). Архитектурные модели дополняются ММ, которые математически описывают для целевой системы параметры, связанности и алгоритмы. Стандарты [5, 6] дают определение компьютерной (электронной) модели. Поэтому базой этой модели является архитектурная модель, ММ (программный код) и данные по конкретному объекту моделирования. Также следует указать стандарт [6, пункт 3.1.3], который определяет программное обеспечение (ПО) компьютерного моделирования и вычис-

лительной техники. ЖЦ изделия в процессе компьютерного моделирования изделия дается в [5, п. 3.1.11]. Стандарт [7] поясняет понятие цифровой модели изделия (ЦМИ). Для ЦМИ используется ПО компьютерного моделирования и другие инструменты программных и иных средств. Функциональность и «полнота» ЦМИ зависит от стадии ЖЦ изделия.

Последней завершающей процедурой третьего этапа моделирования является совмещение моделей, а также валидация и верификация. Стандарт [9] представляет понятие «валидации» модели изделия. Необходимым условием валидации в [9] указывается верификации ПО компьютерного моделирования.

Четвертый этап моделирования. Представляет собой окончательное моделирование целевой системы. Является представлением целевой системы в виртуальном (цифровом) пространстве. Поведение целевой системы должно быть идентичным поведению реального физического объекта.

Информационные модели и модели данных аэрокосмического объекта

Аэрокосмический объект является сложной системой, которая должна иметь очень развитое информационное обеспечение. Традиционно в процессах SE информация о системе содержалась в документах: описаниях системы, спецификациях, документации по управлению интерфейсом (ICD), отчетах (по аналитике, по процедурам, выборе альтернатив), планах тестирования (верификации) и других. Очевидно, что возникает проблема поддержки информации по ее согласованности, синхронизации, и даже оценки ее правильности. Поэтому используют методики MBSE, которые формализуют применение SE посредством моделей. Например, в источнике [11] разработан метод СКФ (структурированных функций качества): автоматизация диаграмм SysML с помощью матриц/таблиц, разрабатываемых в MS Excel, на предпроектном этапе ЖЦ.

В общем случае, в MBSE системная модель (или набор системных моделей) обладает большей частью информации о системе [13]. Основные положения по ее организации:

- Модель системы считают основным «артефактом» процесса SE.
- Степень информативности в моделях с поддержкой ее в течение ЖЦ определена объемом разработок по MBSE.

Представлены две MBSE методологии (по SE руководству SE handbook):

- Функциональный метод SE (FBSE). Не является модели-ориентированным. Но есть его разновидности, явные модельные методы на основании функций (например, Vitech MBSE).
- Объектно-ориентированный метод SE (OOSEM – Object-Oriented Systems Engineering Method).

FBSE метод. Цель: нахождение функциональной архитектуры (ФА) для разработки системных процессов.

FBSE является итеративным процессом на всем протяжении ЖЦ системы. Верхний уровень иерархии ФА: единственная системная функция (или ее набор), остальные являются подчиненными. Описания функций в виде требований: функциональных, эксплуатационных, по производительности. Необходимо

также описать ограничения. Ограничения должны показать, каким образом системная модель взаимодействует с внешней средой и другими системными моделями. А также указывает способы реализации взаимодействий. На рисунке 3 представлена блок-схема общего алгоритма метода FBSE.

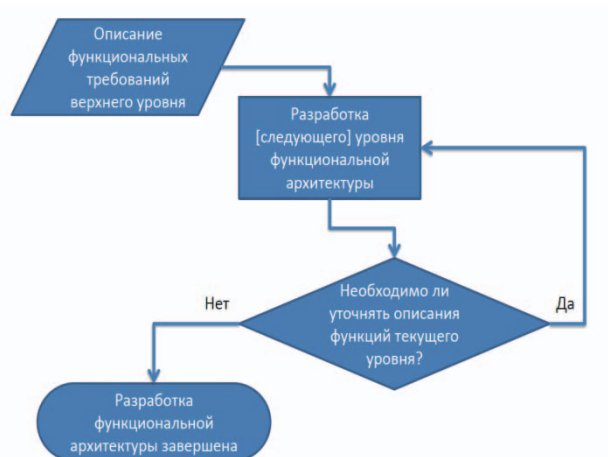


Рисунок 3 – Блок-схема общего алгоритма метода FBSE

Чтобы создать основы ФА системы, метод должен распределить соответствующие функции и подфункции. Рассматриваются: ПО и АО (аппаратное и программное обеспечения), БД (базы данных). А также предметная область (например, объекты инфраструктур, персонал, помещения). Основное условие: описание системных функций без описания способа их реализации. Теоретически только когда полностью определены системные требования, должен начаться процесс по нахождению ФА. На практике он выполняется итеративно, и ФА дополнительно определяется по мере развития системных требований. Выстраивается иерархия ФА: детализация более низкого уровня с оценкой последующей детализации. Повторение процесса продолжается до тех пор, пока его детализация становится нецелесообразной. Рисунок 4 показывает, что представляет собой блок-схема алгоритма процесса итерации FBSE.

В FBSE итерации используются для требований текущего уровня: функциональных (требований основного назначения системы), по производительности и ограничениям (конструкции, дизайна, архитектуры). В результате метода FBSE:

- Определяется соответствие текущего уровня требований следующего уровня требованиям.
- По следующему уровню формируют наборы требований альтернатив.
- Происходит процесс по окончательной конфигурации системной ФА и выбору решений по технологии.

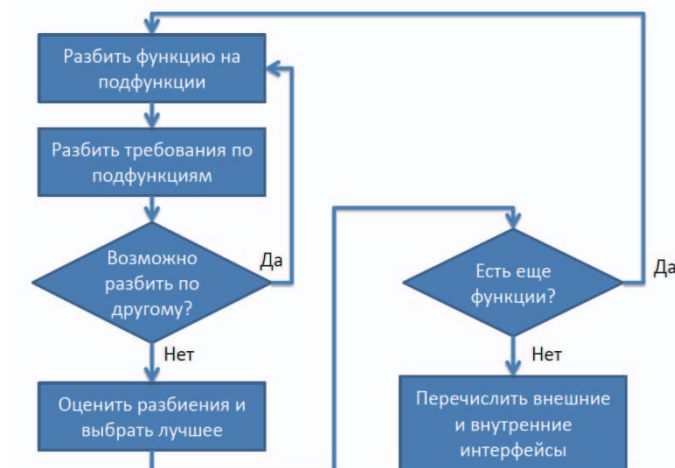


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма процесса итерации FBSE

Таким образом, FBSE в сущности является анализом определенной функции ФА по определению необходимых для нее подфункций. При этом учитывают все режимы, при которых используют функцию. Если выявляется функция эксплуатационных требований, то ее необходимо дополнительно рассмотреть с точки зрения распределенных требований: функциональных, ограничений, а также дополнений по эксплуатации. При этом:

- если функция разлагается на подфункции, то связанные с ней требования подлежат разложению.
- В каждой итерации необходимо выбирать альтернативы по декомпозициям с их оценкой и распределением каждой функции.
- Декомпозиции должны окончательно определить все интерфейсы (между функциями, подфункциями и внешней средой).
- Выявленные подфункции должны указывать иерархию (наследование от верхнего уровня); все интерфейсы.

Особенности системных требований по производительности:

- Окончательный иерархический набор требований анализируется и оценивается по нескольким уровням декомпозиции до процессов его разделения на подфункции.
- Необходим сравнительный анализ ФА альтернатив для определения предпочтительного разбиения. Каждая итерация должна оценивать все альтернативные декомпозиции и определить все интерфейсы.
- Последовательно устанавливаются по иерархии функциональные требования и интерфейсы. Нижние уровни иерархии требуют распределений требований по производительности на подфункции.
- Должны предварительно быть распределены и определены требования по времени.

- Окончательный набор требований должен использовать измеримые параметры и характеристики. Их набор должен быть достаточным в качестве системного критерия проектирования.

Практическая реализация ФА по FBSE осуществляется следующими способами:

1. IPO (Input Process Output) диаграмма, которая показывает входы и выходы данных в системе без ее декомпозиций.

2. Диаграммы поведения (реакции системы на воздействия). Определяются как алгоритмы последовательностей: временные, параллельного выполнения, их точки синхронизации, состояния системы и другие.

3. Диаграммы управления. Описывают наборы управляющих воздействий на систему. Реализуются в виде блок-схем, структурных схем и диаграмм перехода состояний.

4. Диаграммы работ DFD (Data flow diagrams). Поток входных и выходных данных в системе. Должны иметь промежуточные хранилища данных. Каждая DFD проверяется на соответствие IPO или DFD более высокого уровня.

5. «Сущность-связь» ER. Диаграмма описывает объекты (функции) и логические отношения между ними.

6. FFBD (Functional flow block diagrams) диаграмма связи входных и выходных функций системы в единую блок-схему.

7. IDEF (Integrated definition functional modeling) диаграмма, которая показывает связи между функциями системы в виде потоков данных. Также показывает потоки управления и ресурсы, необходимые для управления функциями.

8. Словари. Данные в документах. Описывают данные, элементы данных, файлы. Необходимы для согласования работ между организациями, занимающимися разработкой систем.

Целью декомпозиции ФА является разработка иерархии FFBD. Она должна отвечать всем функциональным требованиям. Также включаются требования по производительности и ограничения системной реализации. Функция в иерархии должна показывать:

- структурную взаимосвязь с другими функциями уровня (диаграммы FFBD или IDEF0/1),

- назначенный и определенный набор функциональных требований,

- описание наборов системных входных и выходных данных.

Следует указать, что ни одного предпочтительного способа ФА представления не существует. Поэтому для проверки и оценивания процесса анализа и согласованности в работе с командой разработчиков системы на практике используют несколько способов.

Метод OOSEM. Объединяет концепцию ООП (объектно-ориентированного подхода) и традиционные модельные методы SE. Применение OOSEM: гибкие и расширяемые системы. Соответствуют изменяющимся условиям и развитым технологиям.

Метод использует: спецификации, системный анализ, проектирование и

тестирование. Результаты метода применяются в разработках: ПО (на основе ООП), АО, системной верификации и валидации. Язык: SysML с поддержкой ООП. Также используются уникальные методы (сокращение потока параметров, анализ изменений требований, системный и логический разбор).

SE в OOSEM применяет четыре процесса и входящие в их состав под-процессы:

1. Управление разработкой системы: (планирование и контроль, риски, конфигурация, измерения).
2. Определение требований по системе и дизайну (системные требования, архитектура, распределения системных требований по элементам системы).
3. Разработка удовлетворяющих требованиям системных элементов с реализацией и тестированием.
4. Системная интеграция и тестирование (с индивидуальной и совместной проверкой на соответствие системным требованиям).

Процессы по OOSEM аналогичны V-процессам на каждом уровне ЖЦ. Применяют рекурсию и итерацию в иерархии системы. Источник [14] описывает OOSEM более подробно.

Аэрокосмический объект относится к категории целевой системы SoS (Struct of Structs, Структура Структур). Такую SoS несложно представить «цифровым двойником» ЦД авиакосмического объекта, который по стандарту [7] является цифровой моделью объекта с двусторонними информационными связями в структуре объекта.

В процессе своей эксплуатации аэрокосмический объект можно считать киберфизической системой (КФС), в составе которой имеется ЦД объекта [10]. На рисунке 5 представлены различные структурные схемы построения ЦД. Схемы показывают состав ЦД. Аналитический ЦД проектируется по экспериментальным данным по проектам «снизу вверх» (рисунок 5 а). Цифровой ЦД проектируется на основе численного моделирования физических процессов «сверху вниз» (рисунок 5 б). Следует обратить внимание, что в схемах присутствует информационная модель – диаграмма потока данных IPO (Input Process Output).

Для целей более точного текущего описания и прогнозирования поведения объекта дополнительно создается цифровая модель DS (Digital Shadow «цифровая тень» ЦТ). ЦТ может создаваться экспериментально после обработки данных с датчиков в процессе эксплуатации реального объекта. Если использовать систему HMS (Health Monitoring System) или другие технологии промышленного интернета и диагностики, то можно создавать ЦТ на базе ЦД. В процессе эксплуатации объекта HMS получает оперативную информацию о его функционировании. Модель ЦД после обработки данной информации становится «умной моделью» ЦД и «порождает» «умную» ЦТ (SDS Smart Digital Shadow).

Обычно практическая модель ЦТ формируется на этапе тестирования и эксплуатации реального объекта, но ММ ЦТ на базе физических процессов может быть определена еще в процессе проектирования объекта. Тогда при изменении краевых условий задачи численного моделирования появляется возможность в широких пределах предсказывать поведение авиакосмического объекта.

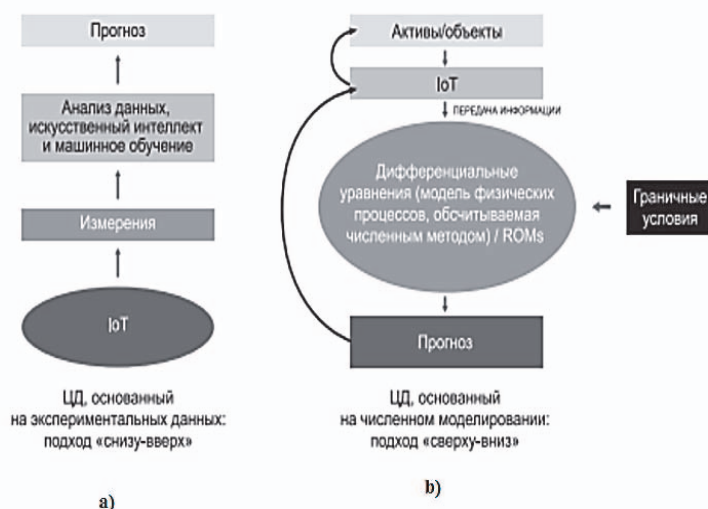


Рисунок 5 – Схемы построения ЦД

После сбора данных с датчиков в существующей аэрокосмической КБС происходит обработка, анализ данных, контроль физического процесса. При этом ЦД определяет «цифровую часть» КБС. Он имеет обратную связь, по которой управляется физическим объектом (например, выбирает оптимальный режим работы или запускает механизмы самовосстановления).

Заключение

На основании всего вышесказанного можно сделать следующие выводы [13]:

- Методология инженерных расчетов системных моделей (MBSE) создает различные абстрактные модели с их детализацией в ЖЦ сложных авиакосмических систем.
- Она использует различные автоматизированные алгоритмы, средства компьютерного инженерного анализа, что значительно повышает скорость и качество принимаемых проектных решений.
- Методы MBSE применяют уровни метамоделирования «описания описаний, языка» для сложных системных моделей. Их уровень: «модель M0, метамодель M1, мета-метамодель M2» детализируется, а также может трансформироваться, чтобы «породить» новое описание.
- В результате создаются порождающие «generative-модели». С их помощью система может легко пройти этапы своего ЖЦ: реализацию, интеграцию, верификацию и валидацию.
- Основа создания моделей MBSE: «унифицированный язык моделирования» UML и нотации «сущность – связь» ER. Окончательное формирование этапа проектирования осуществляется модельным управлением на базе MDA (Model-driven Architecture).

Литература

1. Баденко В.Л. Модельно-ориентированный системный инжиниринг для строителей: основные понятия и принципы. СПб.: 2023. 44 с.
2. Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем // Труды Московского физико-технического института. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 149-161.
3. ГОСТ Р 56136-2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения, статья 3.16.
4. ГОСТ Р 57188-2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения, статья 2.1.2.
5. ГОСТ Р 57412-2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.
6. ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация.
7. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.
8. Метамоделирование и многоуровневые метаданные как основа технологии создания адаптируемых информационных систем [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://fdp.hse.ru/data/2010/03/30/1217474950/IBS-04-p20.pdf> (дата обращения 14.10.2023).
9. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0: учеб. пособие / Кондратьев В.В. Москва: МФТИ, 2021. 102 с.
10. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор профессор Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.
11. Романов А.А., Шпотя Д.А. Инженерная методика идентификации потребностей пользователей и определения требований заказчика как основа разработки изделий космической техники. Труды МФТИ. 2020. Том 12. № 1. С. 154-167.
12. Системная инженерия [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rsq.narod.ru/lectures/systems_engineering_05.pdf (дата обращения 14.10.2023).
13. Стрельцова Г.А. Особенности современного автоматизированного проектирования: новые термины и подходы. Славянский форум. Материалы Международной научно-практической конференции «Системный анализ, управление и обработка информации» (15 мая 2023 года, г. Бургас, Болгария) Выпуск 2(40).
14. Object-Oriented Systems Engineering Method (OOSEM) Tutorial, Version 3.11. Bethesda [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.incose.org/docs/default-source/events-documents/iw2019/wis-market-place/iw2019-wgis2-object-oriented_systems_engineering_method_oosem.pdf?sfvrsn=b6b392c6_2 (дата обращения 14.10.2023).

УДК 662.8.055.3

Разработка металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-C с применением барьерных слоев

Дмитрий Сергеевич Бабкин, Главный технолог,
АО «Электроизолит», г. Хотьково, Московская область

В данной статье выдвигается гипотеза о возможности создания для применения в газотурбинных двигателях металломатричного слоистого композиционного материала (МСКМ) системы Ti-C с применением барьерных слоев, замедляющих деструкцию армирующего материала (углеродный гидросплетенный холст), вызванную карбидизацией матричного материала (титана). В результате проведенного анализа и экспериментов выдвигаемая гипотеза подтверждается.

Металломатричный слоистый композиционный материал, гипотеза, обзор.

Development of metal matrix layered composite material of the Ti-C system using barrier layers

Dmitry Sergeevich Babkin, Chief technologist,
JSC «Electroizolit», Khotkovo, Moscow region

In this article, a hypothesis is put forward about the possibility of creating a metal matrix layered composite material (MLCM) of the Ti-C system using barrier layers that slow down the destruction of the reinforcing material (carbon hydro-woven canvas) caused by carbidization of the matrix material (titanium). As a result of the analysis and experiments, the hypothesis put forward is confirmed.

Metal matrix layered composite material, hypothesis, experiment.

Введение

В связи с постоянным развитием техники возрастет потребность в материалах с повышенными механическими свойствами по сравнению с повсеместно применяемыми металлами и сплавами. Следует учитывать, что авиакосмической промышленности наиболее распространены конструкционные материалы, основной характеристикой которых является удельная прочность и жесткость. При сравнении основных применяемых конструкционных материалов следует выделить титановые сплавы, превосходящие по удельной прочности и жесткости, стали и алюминиевые сплавы. Таким образом, высокий интерес представляют титановые сплавы, одним из методов повышения механических свойств, которых, является их армирование.

Обзор

Основными материалами для армирования титановой матрицы являются

волокна бора, алюминия, карбида кремния. Таким образом, МКМ по типу упрочнения можно классифицировать на три основные группы, а именно: дисперсно-упрочненные, слоистые и волокнистые смотрите рисунок 1.

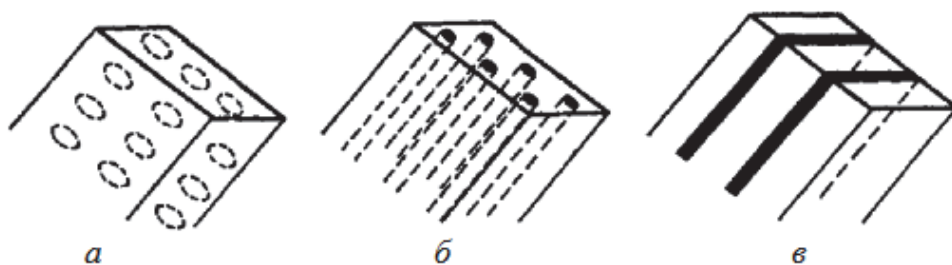


Рисунок 2 – Упрощенное схематическое изображение строения металломатричных композиционных материалов:
а-дисперсно-упрочненная, б-волокнистые, в-слоистые [7]

Титановая матрица, армированная волокнами, классифицируется согласно ГОСТ как: **Металломатричный волокнистый композиционный материал (МВКМ)** включает в себя композиционные материалы с металлической матрицей, армированной непрерывным и прерывистым высокомодульным волокном, а также нетрадиционные композиционные материалы с металлической матрицей [1].

Металломатричный слоистый композиционный материал (МСКМ) набирается из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами [7].

В работе [3] проведен обзор существующих технологий создания армированных волокнами композиционных материалов с титановой матрицей, так же подчеркивается перспективность данного спектра материалов в особенности при создании газотурбинных двигателей на рабочие температуры до 500-700 °С. Однако в данной работе не в полной мере освещено армирование титана углеродными волокнами.

Подробно армирование титана углеродными волокнами было рассмотрено в работе [2]. Целью автора было получение ВКМ «Ti-углеродное волокно». Для создания ВКМ «Ti-углеродное волокно» автор применял титановый порошок и дискретные углеродные волокна марки ВМН-РК. В исследовании приведен сопоставительный анализ нескольких методов получения смеси титанового порошка и углеродного волокна. Было установлено, что при сухом и гидropеремешивании не удастся избежать расслоения смеси, которые в последующем снижают прочность получаемого ВКМ в следствие образования конгломератов, так же на данный параметр влияние оказывает сильное взаимодействие между углеродным волокном и титановой матрицей. Для уменьшения карбидизации матрицы автором предлагается применение покрытий карбида кремния и молибдена на углеродное волокно со слоем титанового покрытия толщиной 5 мкм на

углеродном волокне.

Анализируя работу [5], можно сделать вывод, что предварительное нанесение титанового покрытия толщиной 5 мкм на углеродное волокно, сопряжено с образованием карбида титана, которое характеризуется высокой твердостью и хрупкостью, что может снизить прочность получаемого ВКМ. Для уменьшения карбидизации матрицы необходимо применение интерфазных покрытий, данный тезис так же подтверждается в работах [6,7,11,12,13]. Так же следует учитывать при анализе возможности применения в изделиях данного материала то, что получаемый данной технологией композиционный материал является Квазиизотропным, т.е. материал изотропен в макромасштабе и анизотропен в микромасштабе.

Исследование межфазного взаимодействия титана и углерода в композиционном материале «углекон-титан» было проведено в работе [9]. Получение титанового покрытия на материале углерод углеродном (УУКМ) марки «Углекон М» производился способом атмосферного плазменного напыления и наплавкой вольфрама в среде инертных газов. На полученный материал наносилось титановое покрытие. Для нанесения титанового покрытия применялись порошки марок ТПП-7, ПТ-6, так же были применены: механоактивированная титановая губка МАТГ и компактный титан ВТ1. На образец углерод-углеродного материала марки «Углекон М» было нанесено покрытие из представленных ранее материалов. Толщина получаемого покрытия составила 0,2 мкм. Было выявлено, что на границе раздела фаз происходит интенсивное взаимодействие, приводящее к образованию карбида титана, изображение границы раздела фаз представлено на рисунке 2. На основании анализа данных, полученных авторами, можно выдвинуть предложение о релевантности применения интерфазных покрытий карбида кремния или пиролитического углерода.

Авторами были проведены эксперименты по повторному нагреванию материала, которые показали разрушение поверхностного слоя углерод-углеродного композиционного материала в переходной зоне.

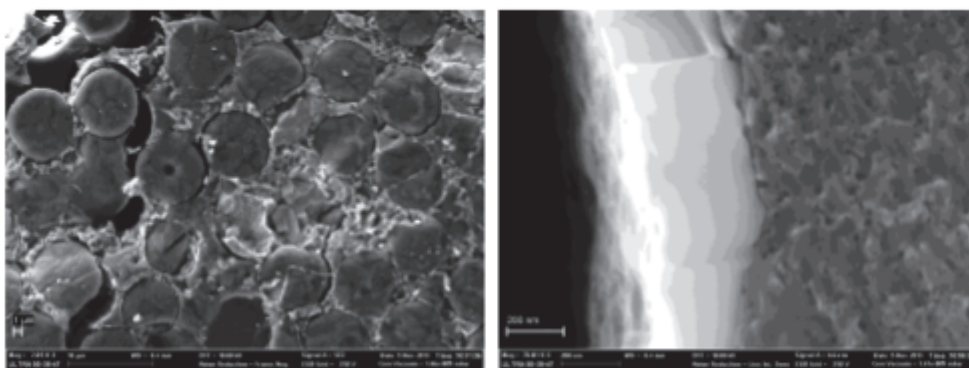


Рисунок 3 – Изображение полученного образца с применением сканирующей электронной микроскопии [9]

На основании полученных результатов авторами было проведено исследование по влиянию толщины получаемого переходного слоя на адгезию между наносимым покрытием и углеродным материалом. По результатам исследования было выявлено, что покрытия, толщина которых превышает 0,2 мкм, являются хрупкими. Таким образом, в работе выявлен оптимальный трещиностойкий карбидный слой, превышение которого будет приводить к хрупкому разрушению по карбидному слою. В продолжение данной работы авторами было проведено исследование [10], результатом которого является полученная прямая зависимость прочности соединения от температуры спекания.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости анализа оптимальной толщины карбида титана в контактной зоне углерод-титан при планировании разработки материала в связи с данными, указанными в работах [2,9,10], так же следует отметить корреляцию минимальной температуры спекания в данных работах 1100 °С. Преобразования в системе Ti-C продемонстрированы в работе [8].

На основании обзора имеющейся литературы, можно сделать следующие выводы:

1. Высокая степень карбидизации углеродного армирующего материала, приводящая к уменьшению прочности получаемого материала.
2. Хрупкость титанового покрытия свыше 0,2 мкм.
3. Необходимость применения интерфазных покрытий.
4. Минимальная температура спекания при изготовлении композиционного материала титан-углерод 1100 °С.

Таким образом, анализируя полученные выводы, была выдвинута гипотеза о возможности создания для применения в газотурбинных двигателях металломатричного слоистого композиционного материала (МСКМ) системы Ti-C с применением барьерных слоев, замедляющих деструкцию армирующего материала (углеродный гидросплетенный холст), вызванную карбидизацией матричного материала (титана).

Основная часть

Для подтверждения выдвинутой гипотезы был проведен ряд экспериментов, представленных в работах [3,4].

В работе [3] были проведены эксперименты по возможности создания композиционных материалов Ti-C_f на основании применения углеродных высокопористых органоморфных каркасов, насыщаемых металлом различными методами. Были рассмотрены методы жидкофазного насыщения углеродного высокопористого каркаса марки Ипресскон[®] с предварительно нанесенным интерфазным покрытием карбида кремния и расплавом титана марки ВТ-14. В пяти проведенных экспериментах была зафиксирована деструкция армирующего волокна более 50% от изначального диаметра и не полное насыщение высокопористого каркаса в связи с образованием карбида титана, приводящего к закупориванию пор армирующего каркаса. Для проверки возможности внедрения расплава титана в данный каркас был применен порошковый титан марки ВТ-1-0, данный способ показал более равномерное проникновение расплава. Вследствие этого было принято решение о применения метода послойной выкладки, в котором применялись титановая фольга марки ВТ-1-0, гидросплетенный углеродный холст с

предварительным нанесением интерфазы карбида кремния, а также на основании анализа существующих источников, описывающих применение покрытий инертных к углероду металлов, таких как молибден, было принято решение о применении прослоек медной фольги марки М1. Из данных слоев был собран пакет фольг, который далее был спрессован методом вакуумного горячего прессования. Был получен образец рисунок 3, который показывает, что применяемый способ позволяет снизить деструкцию армирующего материала и обеспечивает равномерность распределения матрицы. Зафиксирована потеря диаметра филамента примерно 15-20%.

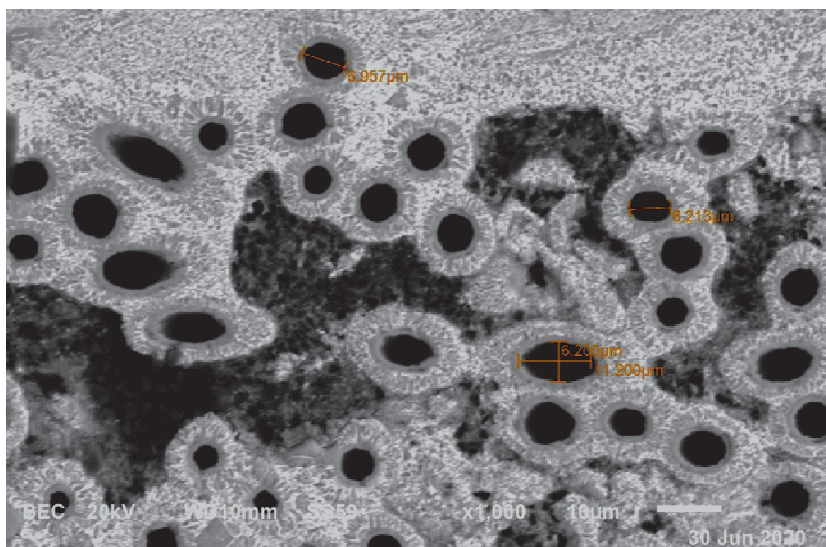


Рисунок 4 – Микроструктура полученного образца [3]

По результатам исследований [3] было доказано, что снижение взаимодействия титановой матрицы и углеродного армирующего возможно достигнуть за счет применения медной фольги и интерфазы карбида кремния. Следует отметить, что межфилламентное пространство заполнено сплавом Ti-Cu-C.

Заключение

На основании проведенного обзора выявлены основные проблемы при создании металлматричных композиционных материалов системы Ti-C. Так же учтены данные по технологическим режимам, которые стали отправной точкой для проведения последовательных исследований, результатом которых является созданный автором новый металлматричный слоистый композиционный материал системы Ti-Cu-C.

Литература

1. ГОСТ Р 56656-2015. Композиты металлические. Метод определения характеристик прочности при растяжении армированных волокнами композитов с металлической матрицей = Metal composites. Method for determination of tensile properties of fiber reinforced metal matrix composites: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие

- Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2015 г. N 1598-ст: введен впервые: дата введения 2017-01-01 / разработан Объединением юридических лиц «Союз производителей композитов», ОАО НПО «Стеклопластик» и Автономной некоммерческой организацией «Центр нормирования, стандартизации и классификации композитов» на основе аутентичного перевода на русский язык указанного в пункте 4 стандарта, который выполнен ТК 497. М.: Стандартиформ, 2016. 20 с.
2. Афанасьев А.Ю. Разработка технологии получения композиционного материала «титан – углеродное волокно» // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2004. 32 с.
 3. Бабкин Д.С. Насыщение углеродных высокопористых органоморфных каркасов металлом: сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (22-23 марта 2021 г.), в 4-х томах // Курск: Юго-Западный государственный университет. 2021. Т. 4. С. 135.
 4. Бабкин Д.С. Применение вакуумного горячего прессования при создании металлматричных композиционных материалов сборник статей по материалам участников XI Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» (13 мая 2021 года, наукоград Королев). М.: Издательство «Научный консультант», 2021. 27-34 с.
 5. Изотова А.Ю., Гришина О.И., Шавнев А.А. Композиционные материалы на основе титана, армированные волокнами (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 5(53).
 6. Колесников С.А., Бубненко И.А., Кошелев Ю.И., Меламед А.Л., Проценко А.К., Корчинский Н.А. Разработка и исследование армированных углеродных материалов с керамической защитой от окисления в воздушных потоках // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2018. № 11.
 7. Кулик В.И., Нилов А.С. Композиционные материалы с металлической матрицей: учебное пособие // Балт. гос. техн. ун-т. СПб. 2020. 69 с.
 8. Сидоров Д.В., Серпова В.М., Заводов А.В., Шавнев А.А. Исследование межфазного взаимодействия на границе раздела в системе Ti-C с отечественными титановыми сплавами классов $\alpha + \beta$ и псевдо α // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 5. С. 75-81.
 9. Струков Н.Н., Сметкин А.А., Асташина Н.Б. Исследование межфазного взаимодействия в композиционном материале «Углекон – титан» // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 1. С. 49-54.
 10. Струков Н.Н., Сметкин А.А. Разработка углерод-титановых композиционных материалов для медицинских имплантатов с использованием технологии наплавки // Металлообработка. 2015. № 3(87). С. 58-61.
 11. Arvieu C., Manaud J.P., Quenisset J.M. Interaction between titanium and carbon at moderate temperatures // Journal of Alloy and Compounds. 2004. Vol. 68. P. 116-122.
 12. Kalkanli A., Durmaz T., Kalemtaş A., Arslan G. Melt Infiltration Casting of Alumina Silicon Carbide and Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites // Journal of Material Sciences & Engineering. 2017. Vol. 6. P. 01-05.
 13. Katzman H. Fibre coatings for the fabrication of graphite-reinforced magnesium composites // Journal of Materials Science. 1987. Vol. 22. № 1. P. 144-148.

УДК 51-72; 544.65

Влияние выделения водорода на процессы осаждения цинка

Ленар Наилевич Кашапов, кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры биомедицинской инженерии
и искусственного интеллекта в биотехнических системах,
научный сотрудник НИЛ Плазмохимическое получение
функциональных материалов,

Александр Дмитриевич Кудрявый, лаборант НИЛ численных методов
математической физики,

Виолетта Юрьевна Чебакова, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры анализа данных и технологий программирования,
Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»
ФГАУ ВО КФУ, г. Казань

Константин Владимирович Кормушин, ассистент кафедры материаловедения,
сварки и производственной безопасности,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н.Туполева-КАИ», ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань

Электролиз водных растворов нашел самое широкое применение в гальванотехнике, получении металлов, наноматериалов и получении водорода. В данной работе предложен метод решения обратных задач, возникающих при расчете констант скоростей приэлектродных стадийных реакций в гетерогенных системах: инертный электрод-щелочной электролит с выделением водорода: как в случае получения только водорода, так и в случае параллельных практически не связанных реакций с получением водорода и металлического осадка на примере цинка.

Численная оптимизация, метод Рунге-Кутты, осаждение цинка, получение водорода, математическое моделирование.

The influence of hydrogen release on zinc settlement processes

Lenar Nailevich Kashapov, Candidate of Engineering Science, Senior lector at the
Department of Biomedical Engineering and Innovation Management,
Research Laboratory Plasma-chemical properties of materials,

Aleksandr Dmitrievich Kudryavij, research assistant of Scientific
Research Laboratory of Numerical Methods of Mathematical Physics,

Violetta Yur'evna Chebakova, Candidate of Science of Physics and Mathematics,
Associate professor at the Department of Data Analysis
and Programming Technologies,

Federal State Autonomous Institution for Higher Education «Kazan (Volga region)
Federal University» FSAI HE KFU, Kazan,

Konstantin Vladimirovich Kormushin, assistant at the Department of Material Science, Welding and Industrial Safety,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI»,
KNRTU-KAI, Kazan

Electrolysis of aqueous liquids has found the widest acceptance in electroplating technology, production of metals, nanomaterials and hydrogen obtaining. In this paper, it is proposed the method for solving inverse problems that arise during the calculation of rate constants of near-electrode stepwise reactions in heterogeneous systems (inert electrode-alkaline electrolyte with hydrogen release) both in the case of obtaining hydrogen only and parallel practically unrelated reactions with hydrogen and metal deposit obtaining as exemplified by zinc.

Numerical optimization, Runge-Kutta method, zinc settlement, hydrogen obtaining, mathematical modeling.

Введение

Электроэкстракция порошков металлов из щелочных электролитов позволяет утилизировать промышленные отходы, содержащие тяжелые металлы, особенно в черной и цветной металлургии, металлообработке, а также позволяет получать металлы из обедненных руд.

В мире ежегодно образуется большое количество промышленных отходов, содержащих тяжелые металлы, особенно в черной и цветной металлургии, металлообработке. Эти материалы обычно классифицируют как опасные из-за возможности выщелачивания токсичных элементов при длительном хранении. Вместе с тем, из-за достаточно высокой ценности цветных металлов, их рациональное использование привлекает все больший интерес. Одним из способов утилизации является электроэкстракция металлического порошка из электролитов.

Так в работе [32] проведено исследование процессов электроосаждения Pd, Rh and PdRh в спиртовых растворах, а также в спиртовых растворах при наличии примесей в виде альдегидов (формальдегид, ацетальдегид), так же дана оценка плотности осаждаемого покрытия и размеров получаемых наночастиц. В работе [45] описаны процессы электроэкстракции кобальта, приводящие к уменьшению в нем примеси марганца из сульфатных растворов кобальта (II) и марганца (II). В статье [26] предложена оптимизация процесса получения обогащенного бора из лома карбида бора, образующегося при производстве карбида бора, и замечено, что электроэкстракция позволяет уменьшить наличие примесей в виде кислорода и углерода. В [43] электроэкстракция была предложена для удаления остаточного содержания меди в чугунах и сталях. В [25] проведены лабораторные исследования катодного процесса электроэкстракции свинца из трилофатного электролита, полученного после выщелачивания свинцовых кексов цинкового производства и подвергнутого очистке.

Так же фундаментальные знания по теории процессов, проходящих при

электролизе, позволяет использовать данный процесс и в других производственных технологиях. Так для получения покрытий и порошков используют плазменные установки с жидкими электродами [1,4,12] и электрохимическое оксидирование. Плазменные установки с жидкими электродами применяются также для травления металла, очистки сточных вод от загрязнения тяжелыми металлами. Электрохимическое оксидирование позволяет получать покрытия с заданными свойствами [16,19], также распространение получило и плазменно-электролитическое оксидирование. Так в [6] представлен обзор методов электрохимической обработки металлов и полупроводников, таких как электрохимическое осаждение, растворение или оксидирование. Отдельным пунктом в нем рассмотрена локализация электроактивного компонента электролита, объем которого не содержит электроактивный компонент, в зоне обработки и возможности включение в состав электролита поглотителя электроактивного компонента, ограничивающего его латеральную диффузию и позволяющего увеличить степень локализации обработки. В [5] рассмотрены особенности анодной поляризации алюминиевого сплава А6 импульсами тока переменной амплитуды, представлены условия и методика эксперимента, сделаны выводы о зависимости между пористостью и микротвердостью (эластичностью) оксидных пленок, образующихся при анодной поляризации алюминия импульсами тока переменной амплитуды. Установлено, что пористые эластичные покрытия формируются при небольшом колебании анодного потенциала.

В силу широкого применения цинка для защиты металла от коррозии, производства сплавов и красок, использование в качестве цементирующего металла повышение эффективности технологий по его получению является актуальной задачей.

Однако, кроме защитных свойств, данные покрытия обладают достаточной твердостью и износостойкостью, что позволяет использовать электрическое цинкование для восстановления изношенных поверхностей деталей машин.

Так же интересным представляется применение цинка в гибридных батареях. Так, в [44] предлагается новый метод создания гибридов нитрида цинка в качестве высокоэффективных многофункциональных электрокатализаторов для электрокатализа и накопления энергии в батареях Zn-air. Так же гибридные батареи на основе процессов осаждения цинка рассмотрены в [38,48]. Электроэкстракция цинкового порошка из щелочного электролита обладает большой актуальностью. В работе [28] показана технология переработки порошковых отходов сталелитейного производства для получения цинка, а в работе [18] дан обзор исследований влияния различных условий электроэкстракции цинковых порошков из щелочных электролитов и выявлено, что среди авторов нет единого мнения о влиянии условий электролиза с точки зрения выхода по току и расхода электроэнергии. В работе [47] приведены данные выхода по току при электролизе раствора гидроксида натрия в присутствии тетрагидроксоцинкат натрия, полученного путем выщелачивания цинкосодержащих руд.

При разработке новых и оптимизации уже известных технологий математическое моделирование позволяет уменьшить количество экспериментов, связав внешние и внутренние параметры. Так, в работе [39] представлено компьютер-

ное моделирование осаждения Pd в этаноле, проведенное с помощью пакета моделирования Vienna Ab-initio Simulation Package (версия VASP 5.3.3). В [43] представлена пространственная модель осаждения стабилизированных наночастиц ибупрофена из жидкой фазы.

Также электрическое осаждение металлов и их солей из щелочных электролитов применяется для получения покрытий. Так, электроосаждения цинка применяется для получения покрытий, обладающих антикоррозионными свойствами, а также для восстановления изношенных поверхностей деталей машин.

К сожалению, пространственные модели достаточно сложны в реализации и зачастую требуют больших вычислительных ресурсов. При этом модели, состоящие из уравнений кинетики, позволяют провести первичный анализ на эффективность электролизера, так как закон Фарадея дает завышенные оценки выхода, особенно при наличии параллельных ветвей стадийных реакций. Если известны значения констант скоростей приэлектродных процессов, то задача прогнозирования выхода осаждаемого вещества не представляет собой особой сложности и может быть численно решена методом Рунге-Кутты, применяемым для решения систем, состоящих из задач Коши. Так, в [42] метод Рунге-Кутты второго порядка используется для оценки переходных режимов мощности теплового реактора. Для большинства проанализированных в работе случаев переходные значения мощности сопоставимы со значениями, рассчитанными другими методами, при этом относительные отклонения, вычисленные во всех случаях, были ниже порядка 10^{-2} . В работе [24] метод Рунге-Кутты-Фельберга применялся при исследовании влияния гомогенно-гетерогенных реакций на поверхности вращающегося диска с солнечным нагревом при обтекании его гибридной наножидкостью. В [21] предложены коэффициенты явного трехстадийного метода типа Рунге-Кутты. Приведены результаты расчетов двух моделей орегонатора, подтверждающие повышение эффективности за счет дополнительного контроля устойчивости. В [7] исследована кинетика процесса окисления кумола кислородом воздуха в присутствии кобальтового катализатора при разных температурах. Система дифференциальных уравнений, описывающих кинетические уравнения со скоростями реакций, выраженными через уравнение Аррениуса, решалась методом Рунге-Кутты.

В работе [15] представлено исследование сгорания полидисперсной газовой взвеси угольной пыли, выделяющей летучие компоненты. Экзотермические химические реакции в газе определялись по закону Аррениуса с кинетикой второго порядка. Гетерогенная реакция на частицах задавалась реакцией первого порядка. Задача решалась методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага. Для решения жестких систем задач Коши, описывающих задачи химической кинетики с реакциями второго и третьего порядка, в [3] предложен явный метод Рунге-Кутты с алгоритмом выбора шага. Для схем метода Рунге-Кутты с числом стадий до 4 приведены наборы соответствующих схемных коэффициентов.

Метод Рунге-Кутты в сочетании с другими методами может использоваться как составная часть численного алгоритма расчета более сложных задач. При неизвестных константах скоростей реакций зачастую возникают обратные

задачи, которые иногда можно свести к задачам оптимизации, например, для химических реакторов [22,31,35,41] и в задачах химической кинетики в газах [10,17,29,30]. В работе [20] предложена модификация метода Хука-Дживса, основанная на интервальных данных и верифицированная на кинетической задаче окисления нафталина. Таким образом методы прямой оптимизации могут быть модифицированы для решения задач химической кинетики для реакций первого и второго порядка, когда скорости реакций записаны через уравнения Аррениуса.

Электрохимические процессы электролиза растворов относятся к гетерогенным процессам, наиболее интенсивное их развитие и течение происходит на границе раздела сред металлического электрода и жидкого электролита, и для них характерно наличие истинного и кажущегося порядка реакции [8]. Непосредственно электролиз можно отнести к реакциям нулевого порядка. В этих реакциях концентрация линейно уменьшается от времени, и наблюдается линейная зависимость уменьшения, но так как условия эксперимента оказывают существенное влияние, то зависимость перестает быть линейной.

Данные процессы происходят в результате стадийных электрохимических реакций. Одними из основных характеристик процессов являются константы скоростей стадийных реакций, которые зависят от ряда факторов, свойственных конкретным системам, это состав и шероховатость поверхности электрода, коэффициент переноса заряженных частиц в электролите и концентрации электролита, приложенного напряжения и поданного тока. Скорость общей реакции зависит от скорости лимитирующей реакции (самой медленной из стадийных реакций).

В данной работе предложен метод решения обратных задач, возникающих при расчете констант скоростей приэлектродных стадийных реакций в гетерогенных системах (инертный электрод – щелочной электролит) рассмотренный авторами и обобщенный на случай параллельных практически не связанных между собой реакций с получением водорода и металлического осадка на примере цинка. Алгоритм, предложенный авторами, позволяет построить прогноз выхода цинка, с меньшими затратами как машинных ресурсов, так и натуральных экспериментов.

Алгоритм, реализующий обратную задачу, базируется на численных методах оптимизации, тогда как решение системы кинетических уравнений, описывающих стадийные приэлектродные реакции в жидком электроде, решается методом Рунге-Кутты. Алгоритм предложенный авторами данной статьи в отличие от известных статистических методов, например, построение регрессионных моделей, и методов интерполяции, например, сплайнами, позволяет определить прогнозные значения массы цинка при меньшем количестве экспериментов не просто в виде функциональной зависимости с подгоночными коэффициентами, а непосредственно решить систему кинетических уравнений, описывающих стадийные электрохимические реакции, оценить вклады электрохимических процессов, выделить лимитирующий процессы, получить граничные условия для уравнений, рассчитывающих концентрации компонент электролита в объеме, непосредственно опираясь на теорию электрохимических процессов.

Методы оптимизации применяются при решении задач в различных областях, зачастую это задачи проектирования систем, задачи принятия решений, экономические задачи планирования, а также обратные задачи нахождения оптимальных параметров [30,33,40]. В статье [49] дан обзор и сравнительный анализ классических методов оптимизации нулевого, первого, второго порядков, а также генетических модификаций при решении сложных задач оптимизации с различными особенностями. В [46] статье рассмотрены основные методы многомерной оптимизации, проведено сравнение их эффективности, а также дан анализ применимости рассмотренных алгоритмов к различным типам оптимизируемых функций. В [9] предложена распараллеливание метода прямой численной оптимизации. В [14] рассмотрена возможность применения генетических алгоритмов к оптимизации.

Широкое применение при решении задач оптимизации получили прямые методы, в частности метод Хука-Дживса, который зачастую объединяют и комбинируют с другими методами [36,37].

Постановка

При электроэкстракции некоторых металлов из щелочных растворов происходит выделение водорода. В частности, получение порошка цинка при электролизе раствора гидроксида натрия, содержащего тетрагидроксоцинкат натрия. В этом случае выделение водорода носит негативный характер, так как параллельное выделение водорода приводит к подщелачиванию приэлектродного слоя, и загрязнению получаемого порошка гидроксилами и оксолями осаждаемого цинка, а также к внедрению адсорбированных атомов водорода в растущий металлический осадок, вызывая падение прочностных и пластических свойств получаемого металла. Данное явление получило такое название, как «водородная хрупкость металла».

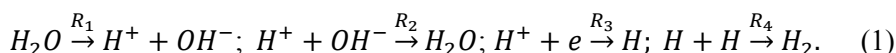
Таким образом, при моделировании выделения цинка учитываются не только стадийные процессы осаждения цинка, но и выделения водорода. Это позволяет подобрать режимы работы таким образом, чтобы уменьшить его выход. Однако на данный момент ведутся разработки по получению технологий, позволяющих разделять и собирать выделившийся в процессе водород.

Выделение водорода на катоде и кислорода на аноде записывается общей суммарной реакцией $H_2O \rightarrow H_2 + 0.5O_2$, она включает в себя как анодные, так и катодные реакции, разделенные между собой межэлектродным расстоянием. Здесь и далее будем использовать обозначения: H_2O это молекула воды, H^+ – ион водорода, OH^- – гидроксильная группа, H – атом и H_2 – молекула водорода, O_2 – молекула кислорода.

Механизм протекания приэлектродных процессов зависит от водородного показателя среды. На инертных металлах в кислой среде адсорбция водорода на катоде происходит за счет реакции $H_3O^+ + e \rightarrow H + H_2O$ и адсорбция кислорода на аноде будет протекать как $H_2O - 2e \rightarrow O + 2H^+$. В щелочных средах адсорбция водорода происходит за счет реакции $H_2O + 2e \rightarrow O + 2H^+$ на катоде и кислорода на аноде через реакцию $2OH^- - 2e \rightarrow O + H_2O$.

Предложенный нами метод позволяет рассматривать электрохимические процессы на каждом из электродов отдельно. При электролизе щелочных раство-

ров гидроксида калия, а так же гидроксида натрия, реакция адсорбция водорода на катоде происходит через стадийные реакции электрохимических процессов:



При этом ионы калия, а также натрия на электродах не окисляются, их концентрация накапливается в катодном пространстве с течением времени, таким образом, они не включены в интересующие нас стадийные катодные реакции. Система задач Коши, состоящая из кинетических уравнений и начальных условий и моделирующая стадийные катодные электрохимические реакции выделения водорода в щелочных растворах, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial G_1 / \partial t = -R_1 G_1 + R_2 G_2 G_3 \\ \partial G_3 / \partial t = R_1 G_1 - R_2 G_2 G_3 \\ \partial G_2 / \partial t = R_1 G_1 - R_2 G_2 G_3 - R_3 G_2 \\ \partial G_4 / \partial t = R_3 G_2 - R_4 G_4^2 \\ \partial G_5 / \partial t = R_4 G_4^2 \end{array} \right. \quad (2)$$

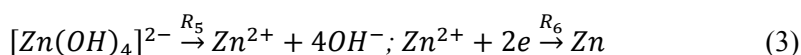
Начальные условия можно записать как: $G_1|_{t=0} = C_1$; $G_2|_{t=0} = C_2$; $G_3|_{t=0} = C_3$; $G_4|_{t=0} = 0$; $G_5|_{t=0} = 0$. Здесь $G_1 \geq 0, G_2 \geq 0, G_3 \geq 0, G_4 \geq 0, G_5 \geq 0$ – концентрация воды (поверхностная), ионов водорода, гидроксильной группы, атомов и молекул водорода, соответственно. При этом налагаются дополнительные условия неотрицательности на константы скоростей реакций. Также не стоит забывать, что скорость общей реакции зависит от скорости лимитирующей реакции (самой медленной из стадийных реакций).

При выборе начальных приближений для скоростей констант приэлектродных процессов приходится учитывать, что в случае наличия двух конкурирующих цепочек прикатодных реакций, одна из которых протекает с выделением твердой фазы, отмечаются более сложные кинетические закономерности. Тогда как при проведении расчетов с выделением газовой фазы, который характеризуется только одной цепочки стадийных реакций и начальное приближение скоростей реакций, можно выбрать исходя из соотношения между скоростями стадийных реакций, стехиометрических чисел и скорости лимитирующей реакции. Начальные условия на скорости процессов задаются согласно соотношению, связывающему лимитирующую скорость реакций $k_{\text{лимитир}} = \frac{1/(G_1 - G_5) - 1/G_1}{t}$ и, соответствующие, стехиометрические числа. За лимитирующую скорость взята

скорость соединения атомов водорода в молекулу. Так для ветви разложения воды будет $k_{\text{лимитир}} = \frac{R_1}{2} = \frac{R_3}{2} = R_4$.

В комнатных условиях реакция разложения воды является обратимой и равновесной, но с началом процесса равновесность нарушается и как показано авторами в работах [11,13] константа скорости процесса ассоциации ионов водорода и гидроксильной группы в молекулу воды практически равна нулю.

Несмотря на то, что общих частиц участвующих в этих двух параллельных реакций по выделению водорода и цинка нет, к реакциям (1) добавляются реакции (3).



Связь реакций (1) и (3) учитывается через перенапряжение на электроде, которое экспоненциально зависит от концентрации частиц, участвующих в электродных реакциях на катоде [27]:

$$E_{\text{перенапряжения}} = \frac{RT}{nF} \ln (G_6 G_2 / G_4 G_7).$$

Здесь n – зарядовое число, G_6, G_7 , – значения концентраций ионов и атомов цинка.

Структура металлического осадка определяется рядом факторов, такими как: состав раствора, наличие в нем примесей, предварительной подготовки поверхности, плотности тока и т.д. В работе [23] приведены результаты исследования кинетики выщелачивания низкосортной цинкосиликатной руды серной кислотой и показано, что скорость процесса определяется диффузией через слой. В [34] показано влияние добавок на строение выделившего слоя Zn (фактически пористое) и утверждается, что при достаточной плотности тока процесс осаждения представляет реакцию с контролируемым переносом массы. Так же в работе представлены фото поверхности при разной плотности тока при электролизе раствора $NaOH$ с концентрацией 240 г/л и с 25 г/л Zn^{2+} и температуре 35 °С. В работе [50] также отмечено, что характер покрытия из осажденного цинка является губчатым и пористым.

Моделирование осаждения цинка было проведено в приближение пористой пленки, когда процесс контролируется диффузией и скорость процесса можно считать пропорциональной диффузии и обратно пропорциональной толщине слоя осажденного цинка. Толщину слоя продукта в приближении решения уравнения Яндера можно считать пропорциональной времени.

Для расчета массы осажденного цинкового осадка используем соотношение, связывающее массу, концентрацию цинка и объем пленки

$$M_{Zn} = G_7 S \sqrt{2KT} * 65,38, \quad (4)$$

где T – конечное время расчетов.

Далее введем обозначения D , G_8 это диффузия и концентрация ионов $Zn(OH)^{2-}$ через пористую пленку осадка, G_0 – концентрация данных ионов в объеме электролита.

Запишем константы, с учетом влияния перенапряжения, следующим образом:

$$R_5 = \frac{k_1 G_7 G_4}{G_6 G_2}, R_3 = \frac{k_5 G_7 G_4}{G_6 G_2}.$$

Таким образом, математическая модель состоит из системы, описывающей электрохимические стадийные прикатодные реакции:

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial G_1 / \partial t = -R_1 G_1 \\ \partial G_2 / \partial t = R_1 G_1 - k_5 G_7 G_4 / (G_6 G_2) G_2 \\ \partial G_4 / \partial t = k_5 G_2 G_7 G_4 / (G_6 G_2) - R_4 G_2 G_2 \\ \partial G_5 / \partial t = R_4 G_2 G_2 \\ \partial G_8 / \partial t = \frac{D}{\sqrt{2Kt}} (G_0 - G_8) k_7 - k_1 G_7 G_4 / (G_6 G_2) G_8 \\ \partial G_6 / \partial t = k_1 G_7 G_4 / (G_6 G_2) G_8 - R_6 G_6 \\ \partial G_7 / \partial t = R_6 G_6 \end{array} \right. \quad (5)$$

*

Метод решения

Из экспериментов известны данные выхода по току выделяемых веществ на определенные моменты времени T_l , $l=1, \dots, n$.

Решение задачи по поиску констант скоростей прикатодных электрохимических процессов и прогнозированию выхода строится на минимизации функционала

$$C = \sum_{l=1}^n \sum_{v=1}^m (G_{l,v}^{\text{эксперимент}} - G_{l,v}^{\text{расчетные}})^2.$$

Здесь l отвечает за суммирование по времени, v же отвечает за суммирование по веществам, концентрации которых известны. При этом для системы задач Коши (2), описывающих выход водорода в щелочных растворах, значение v будет равно одному, так как выделяется единственное вещество (водород).

В задачах с параллельным выделением нескольких веществ в идеале желательно иметь данные выхода по всем, пускай и на разные моменты времени. Однако, как правило, фиксируется наиболее важный для исследователя, в данном

случае это – масса осаждаемого осадка в нескольких временных точках и тогда функционал приобретает вид:

$$M(K, k_1, \dots, k_7) = \sum_{l=1}^n (M_{Zn,l}^{\text{эксперименты}} - M_{Zn,l}^{\text{расчетные}})^2 \quad (6)$$

Сам алгоритм решения данной задачи приведем на решении обратной задачи по выходу водорода.

Численный алгоритм базируется на прямом итерационном методе оптимизации (метод Хука-Дживса), дополненного проверкой ограничений, и на методе Рунге-Кутты применяемого для решения прямой задачи, описывающей стадийные электрохимические реакции.

Шаг 1: На первом шаге задаются приближения для начальных условий и значений скоростей реакций по данным эксперимента. При расчете начальных констант скоростей стадийных реакций лимитирующий скоростью берется скорость реакции образования молекулярного водорода. Константы скоростей стадийных реакций R_1, R_2, R_3, R_4 будут являться координатами первоначальной базисной точки b_1 , вектор приращений (h_1, h_2, h_3, h_4) задается как первоначальные константы скоростей деленные на 10.

Шаг 2: На этом шаге каждая координата рассматривается отдельно по следующему алгоритму, который включает в себя два этапа:

Этап 1: В точках $b_1(R_1, R_2, R_3, R_4)$, $b_2(R_1 - h_1, R_2, R_3, R_4)$, $b_3(R_1 + h_1, R_2, R_3, R_4)$ расчет концентраций $G_{5,j}$ на момент времени t_j , $j=1..n$ происходит методом Рунге-Кутта для системы уравнений (1) с шагом по времени Δt в виде, приведенном в приложении.

В случае если на каком-либо шаге по времени в точках b_1, b_2, b_3 одна из концентраций G_1, G_2, G_3, G_4 окажется меньше «нуля», то данную точку из рассмотрения на этапе 2 исключаем.

Этап 2: Следующим шагом находятся значения функции M в точках b_1, b_2, b_3 . Точка, имеющая минимальное значение M , дает новую координату R_1 . Однако, если значение $R_1 - h_1 < 0$, то рассматриваем только $R_1, R_1 + h_1$.

Вычисления проводят пока значение координаты R_1 меняется.

Затем по отдельности рассматриваем каждую из координат R_2, R_3, R_4 повторяя для них шаг 2 по аналогии с координатой R_1 .

Результатом покоординатного повторения шага 2 будет новая точка b'_1 в которой достигался покоординатный минимум.

Шаг 3: Если координаты первоначальной базисной точки b_1 равны координатам новой точки b'_1 , то расчеты по шагу 2 повторяются с уменьшением вектора приращений, в противном случае за базисную точку берутся значения $b'_1, b_1 + 2 * (b_1 - b'_1)$ при которых, опять таки, значение M минимально.

Условием выхода из итерационного процесса является ограничение на размер шага по соответствующей координате.

Нахождение значений концентрации, необходимых для расчета целевой

функции $C(k_1, k_2, k_3, k_4)$, по системе (2) осуществляется путем решения прямой задачи явным методом Рунге-Кутты. Из семейства явных методов Рунге-Кутты четвертого порядка был выбран метод, называемый классическим методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Точности четвертого порядка в целом достаточно для соответствия точности снятия экспериментальных данных. Для описания его реализации к данной задаче введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned}\bar{U}(t) &= (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5)^T, \\ \bar{R} &= (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5), \\ \bar{F}(t, \bar{R}, \bar{U}) &= (f_1(t, \bar{R}, \bar{U}), f_2(t, \bar{R}, \bar{U}), f_3(t, \bar{R}, \bar{U}), f_4(t, \bar{R}, \bar{U}), f_5(t, \bar{R}, \bar{U}))^T.\end{aligned}$$

Здесь $(\cdot)^T$ – операция транспонирования, а функции $f_1(t, \bar{R}, \bar{U}), f_2(t, \bar{R}, \bar{U}), f_3(t, \bar{R}, \bar{U}), f_4(t, \bar{R}, \bar{U}), f_5(t, \bar{R}, \bar{U})$ соответствуют правым частям системы (1):

$$\begin{cases} f_1(t, \bar{R}, \bar{U}) = -R_1 G_1 + R_2 G_2 G_3 \\ f_2(t, \bar{R}, \bar{U}) = R_1 G_1 - R_2 G_2 G_3 - R_3 G_2 \\ f_3(t, \bar{R}, \bar{U}) = R_1 G_1 - R_2 G_2 G_3 \\ f_4(t, \bar{R}, \bar{U}) = R_3 G_2 - R_4 G_4^2 \\ f_5(t, \bar{R}, \bar{U}) = R_4 G_4^2 \end{cases}.$$

Так, система (2) перепишется в векторном виде:

$$\frac{d\bar{U}(t)}{dt} = \bar{F}(t, \bar{R}, \bar{U}), \text{ где } t_0 < t \leq T.$$

Здесь T – максимальное значение времени, на котором было зафиксировано экспериментальное значение. Покроем отрезок времени (t_0, T) сеткой $\omega_n = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_i = t_0 + ih, \dots, t_n = T\}$, где $h = t_{i+1} - t_i = \text{const}$. Значения в половинных узлах сетки будем обозначать как: $t_{i+\frac{1}{2}} = t_i + h/2$.

В узлах сетки ω_n введем сеточные функции $\bar{U}_i = \bar{U}(t_i)$ и $\bar{F}_i(t_i, \bar{R}, \bar{U}_i)$, соответствующие численному решению разностной задачи:

$$\bar{U}_{i+1} = \bar{U}_i + h\bar{d}_i.$$

Здесь

$$\begin{aligned}\bar{d}_i &= (\bar{d}_i^{(1)} + 2\bar{d}_i^{(2)} + 2\bar{d}_i^{(3)} + \bar{d}_i^{(4)}), \\ \bar{d}_i^{(1)} &= \bar{F}_i(t_i, \bar{R}, \bar{U}_i), \\ \bar{d}_i^{(2)} &= \bar{F}_i(t_{i+\frac{1}{2}}, \bar{R}, \bar{U}_i + h * \bar{d}_i^{(1)}/2), \\ \bar{d}_i^{(3)} &= \bar{F}_i(t_{i+\frac{1}{2}}, \bar{R}, \bar{U}_i + h * \bar{d}_i^{(2)}/2), \\ \bar{d}_i^{(4)} &= \bar{F}_i(t_{i+1}, \bar{R}, \bar{U}_i + h * \bar{d}_i^{(3)}).\end{aligned}$$

Вектор начальных приближений для значений концентрации $\bar{U}_0 = \bar{U}(t_0)$ берется из условий состояния системы до начала электролиза.

Таким образом, по нескольким имеющимся данным натурального эксперимента по выходу водорода, с помощью данного алгоритма, можно найти константы скоростей стадийных катодных реакций и рассчитать прогнозные значения концентраций реагирующих веществ на различные моменты времени. Данный алгоритм дает небольшую погрешность в случае приближения, предполагающего неизменность площади поверхности (образовавшийся газ уходит с поверхности электрода) [11,13]. В этом случае максимальное отклонение расчетных и экспериментальных данных составило в среднем не более 10%. Алгоритм был верифицирован по экспериментам работы [2]. Так же авторами в работе [13] показано, что влияние количества взятых точек не оказывает решающего влияния на погрешность и определяется количеством проведенных экспериментов. Сравнения результатов моделирования работы [13] можно посмотреть на рисунке 1.

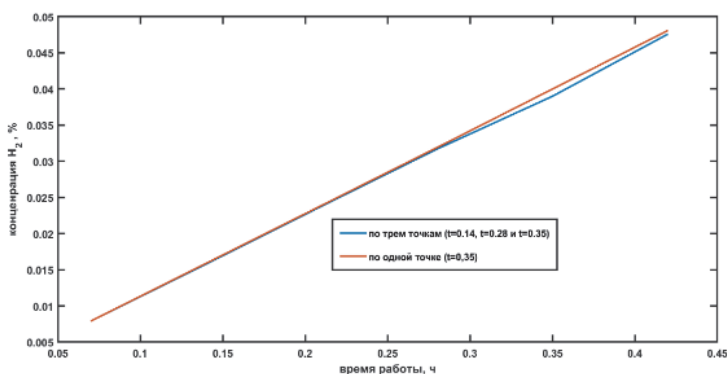


Рисунок 1 – Анализ влияния количества экспериментальных точек на точность расчетов

В работе [13] этот вопрос исследовался для процессов выделения вещества в газовой фазе, когда применялось приближение неизменности и однородности площади электрода. Исследования в работе [13] проводились по эксперименту работы [2]. В ней электролизер имеет внутренний диаметр равный 50 мм, рабочая площадь электродов равна 60 см², высота уровня электролита 300 мм. Сам электролит представляет собой 30% раствор КОН, температуру в электролизере поддерживали постоянной с помощью регулирующего потенциометра.

Результаты численных расчетов

Математическая модель по выходу осаждаемого вещества проверялась на эксперименте, описанном в работе [47]. В ней исследовалось влияние приложенного напряжения на приэлектродные процессы электроосаждения цинка в растворах гидроксида натрия на катоде из нержавеющей стали. В ней руду, содержащую оксид цинка, прокаливали при 400 °С в течении 2 часов, далее ее измельчали до приблизительного размера в 150 мкм и подвергали выщелачиванию 20% раствором гидроксида натрия при 100 °С в течение 4 часов. Затем в раствор вводился сульфид натрия для осаждения свинца, содержащегося в полученном растворе. Приготовленный электролит готов к работе после отделения жидкой и

твердой фазы. Концентрация ионов цинка Zn^{2+} в приготовленном растворе составляет 10 г/л. Рабочий электрод был сделан из нержавеющей стали и имеет площадь в 1 см^2 .

Определим начальные условия для моделируемой системы исходя из условий эксперимента работы [47] до начала процесса электролиза.

Рассчитывать концентрацию компонент будем исходя из следующих предположений:

- гидроксид натрия является сильным основанием и полностью диссоциирует на ионы, и один моль гидроксида калия дает один моль гидроксильного радикала $NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$.
- Ионное произведение воды постоянно и при комнатных условиях приближенно равно 10^{-14} .
- Начальная концентрация растворенного в воде водорода мала и ей можно пренебречь.

Исходя из этих предположений и пропорционального пересчета концентраций начальные условия были взяты, как $G_8|_{t=0} \approx 0,153 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$, $G_2|_{t=0} \approx 0,168 \cdot 10^{-14} \text{ моль/л}$, $G_6|_{t=0} \approx 0$, $G_7|_{t=0} = 0$, $G_1|_{t=0} \approx \frac{41,7 \text{ моль}}{\text{л}}$, $G_4|_{t=0} \approx 0$, при обычных условиях в воде содержится $G_5|_{t=0} \approx 4,29 \cdot 10^{-7} \text{ моль/л}$.

Так как в статье [47] не приведены данные по выходу водорода, то будем строить функционал только по известной массе осажденного цинка.

Расчеты проводились двумя способами и показали, что значения концентраций цинка при расчете фактически не зависели от способа вычислений и построения численного алгоритма, то есть различия в значениях были незначительны. При этом время расчетов по второму способу было меньше, хотя он состоял из двух этапов. Первый способ заключался в непосредственном расчете по полной модели, описываемой системой (5) с накладываемыми на нее ограничениями и соотношением. При втором способе расчеты производились в два этапа. На первом этапе получали начальные приближения для скоростей процессов стадийных реакций получения цинка:

$$\begin{cases} \frac{\partial G_8}{\partial t} = \frac{D_8}{2Kt} (G_8 - G_0)k_7 - k_1 G_8 \\ \frac{\partial G_6}{\partial t} = k_1 G_8 - R_6 G_6 \\ \frac{\partial G_7}{\partial t} = R_6 G_6 \end{cases}.$$

И на втором этапе полученные константы уточнялись по системе (5). Соответственно, это говорит о том, что для более точных расчетов также необходимо знать и объем выделившегося водорода, так, например, в [47] отмечается, что выделение водорода зависело от скорости разрастания цинка, которая определялось значениями приложенного тока.

В таблице 1 представлено сравнение расчетных значений по массе осаждаемого цинка и экспериментальных данных работы [47], где функционал (6),

строился по массе цинка на моменты времени $T=10$ минут и $T=60$ минут для силы тока в 375 A/m^2 (первый случай) и 500 A/m^2 (второй).

Таблица 1 – Сравнение расчетных и теоритических значений при силе тока 375 A/m^2 и 500 A/m^2

Время, мин	Относительное уклонение расчетных значений от теоритических (%)	
	375 A/m^2	500 A/m^2
20	27	26
30	21	18
40	11	8
50	3.5	0
60	0	0
70	3	3
100	2	8

В таблице 2 представлено сравнение расчетных значений по массе осаждаемого цинка и экспериментальных данных работы [47], где функционал (6), строился по массе цинка на моменты времени $T=10$ минут и $T=60$ минут для силы тока в 125 A/m^2 (первый случай) и 250 A/m^2 (второй).

Таблица 2 – Сравнение расчетных и теоритических значений при силе тока 125 A/m^2 и 250 A/m^2

Время, мин	Относительное уклонение расчетных значений от теоритических (%)	
	125 A/m^2	250 A/m^2
20	35	40
30	16	26
40	12	17
50	3	8
60	0	0
70	2	6
100	25	18

На рисунке 2 представлен диапазон разброса экспериментальных данных [47] и расчетной кривой при силе тока в 125 A по двум точкам ($t=1$ час и $t=10$ мин), на нем четко прослеживается большая погрешность расчетов в начальной стадии процесса и отклонение его течения от линейного закона.

Процесс электролиза относится к гетерогенные гетерофазным реакции, для них характерно наличие истинного и кажущегося порядка реакции [8]. Непосредственно электролиз можно отнести к реакциям нулевого порядка, когда концентрация линейно уменьшается от времени и наблюдается линейная зависимость. Однако скорость общей реакции зависит от скорости лимитирующей реакции (самой медленной из стадийных реакций). Так например, в работе [2] наблюдается линейная зависимость выхода водорода при электролизе, а в работе [47] в начальной стадии образования зародышей цинка линейность нарушается.

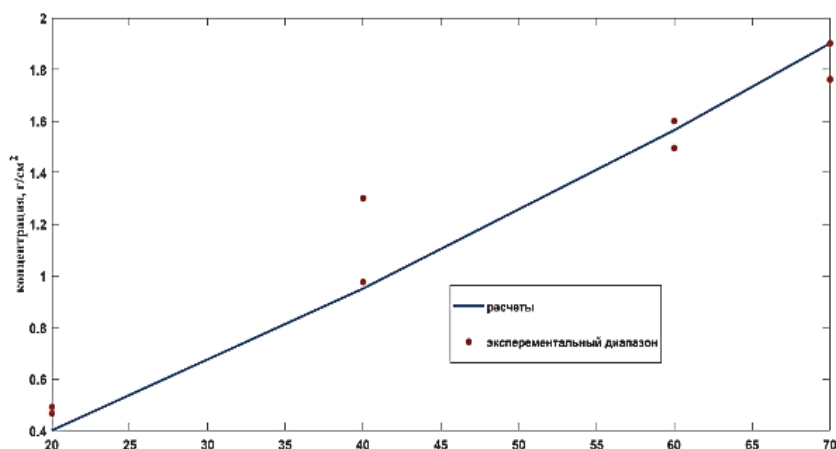


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных данных с расчетами при силе тока 125 A/m^2 по двум точкам ($t=1$ час и $t = 10$ мин)

Кажущийся порядок – порядок реакции зависит от условий эксперимента. В данном случае существенными факторами оказались неоднородность поверхности электрода, образовавшаяся в процессе начальной стадии электролиза, и поданный ток. Поданное напряжение влияет на характер осаждаемого покрытия (пористое или сплошное). В случае пористой пленки, считается, что она не оказывает сопротивления реагентом, подходящим к поверхности раздела сред и не влияет на скорость реакции, в случае непористой пленки, сопротивлением пограничного слоя можно пренебречь, считая основным сопротивление слоя выделившегося продукта [8].

Расчеты показали наибольшее расхождение в начале процесса электролиза. Из этого можно заключить, что фаза образования зародышей, оказывает влияние на начальной стадии и с разрастанием кристаллов цинка ее влияние уменьшается.

Таким образом на начальной стадии разрастания кристаллов цинка водород выделяется как на электроде, так и на поверхности кристаллов цинка что делает поверхность сильно неоднородной с разной скоростью выделения.

Так режимы при плотности тока 500 A/m^2 и 375 A/m^2 по работе [47] имеют меньшую скорость покрытия площади электрода цинком, чем 125 A/m^2 и 250 A/m^2 и, соответственно, большую поверхность для выделения водорода, а так же большее время для выделения водорода на материале катода, так как на стали он выделяется легче чем на металлическом цинке.

И, соответственно, более точную информацию по развитию начальной стадии можно было бы получить при учете данных о выходе водорода.

Заключение

Фундаментальные знания по теории процессов, проходящих при электролизе, позволяет использовать данный процесс в технологиях получения металлических порошков и покрытий, электрохимического оксидирования, травления металлов и т.д. Электрохимические процессы электролиза растворов относятся к

гетерогенным процессам, наиболее интенсивное их развитие и течение происходит на границе раздела сред металлического электрода и жидкого электролита. При этом несмотря на то что реакции разложения на поверхности электрода относятся к реакциям нулевого порядка, общая скорость осаждения зависит от лимитирующей скорости самой медленной стадийной электрохимической реакции, протекающий при осаждении, а также ряда факторов меняющих истинный порядок реакции.

В настоящей работе показано применение методов численной оптимизации к решению обратных задач, возникающих при прогнозировании выхода веществ по току в гетерогенных системах. Данный численный алгоритм позволяет находить скорости констант в приэлектродных процессах в соответствии с заданными экспериментальными данными по выходу, а также рассчитывать концентрации веществ, участвующих в приэлектродных процессах на конкретные моменты времени. Алгоритм предложенный авторами данной статьи в отличие от известных статистических методов, например построение регрессионных моделей, и методов интерполяции, например сплайнами, позволяет определить прогнозные значения массы металлического осадка при меньшем количестве экспериментов не просто в виде функциональной зависимости с подгончными коэффициентами, а непосредственно оценить вклады электрохимических процессов, выделить лимитирующие процессы, получить граничные условия для уравнений рассчитывающих концентрации компонент электролита в объеме, непосредственно опираясь на теорию электрохимических процессов.

Предложенный алгоритм базируется на прямом методе Хука-Дживса, дополненного проверкой ограничений, и метода Рунге-Кутты применяемого для решения кинетической системы уравнений, описывающей стадийные электрохимические реакции. Алгоритм был обобщен на случай осаждения металла в виде пористой пленки, на примере электроэкстракции цинка, сопровождающегося выделением водорода. Расчеты проводились только по данным выхода цинка.

Расчеты показали наибольшее расхождение в начале процесса электролиза. Из этого можно заключить, что фаза образования зародышей, оказывает влияние на начальной стадии и с разрастанием кристаллов цинка ее влияние уменьшается и на начальной стадии разрастания кристаллов цинка водород выделяется как на электроде, так и на поверхности кристаллов цинка что делает поверхность сильно неоднородной. Также важным фактором оказалось и поданное напряжение, которое влияет на характер осаждаемого покрытия (пористое или сплошное).

В целом предложенный численный алгоритм позволяет получить прогноз с приемлемой точностью. Он позволяет уменьшить количество необходимых для прогноза экспериментальных данных, а также выявить основные процессы, проходящие на электроде. Константы, рассчитанные с помощью данного алгоритма, могут использоваться при расчетах в задачах большей размерности в качестве граничных условий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 23-29-00099).

Литература

1. Ахатов М.Ф., Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Гилимзянов И.И. Исследование электрического разряда в растворе амиачной селитры // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 5. С. 23-24.
2. Бабаев Р.К., Алиев С.А. Исследование кинетических закономерностей получения водорода электролизом воды // Проблемы науки. 2018. № 4(28). С. 31-33.
3. Белов А.А., Калиткин Н.Н., Булатов П.Е., Жолковский Е.К. Явные методы расчёта жёстких задач Коши // Доклады академии наук. 2019. Т. 485. № 5. С. 553-557.
4. Гайсин А.Ф., Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М. Многоканальный разряд между твердым и электролитическим электродами в процессах модификации материалов при атмосферном давлении // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2010. Т. 1. № 1. С. 10-21.
5. Галанин С.И., Макшанчиков И.А. Особенности анодной поляризации алюминиевого сплава при электрохимическом оксидировании импульсами тока // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 78-81.
6. Давыдов А.Д., Волгин В.М. Электрохимическое локальное безмасковое микро / нано размерное осаждение, растворение и оксидирование металлов и полупроводников (обзор) // Электрохимия. 2020. Т. 56. № 1. С. 56-86.
7. Дахнави Э.М., Разяпов И.Г., Харлампики Х.Э. Влияние температуры на процесс каталитического окисления кумола // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 6. С. 263-266.
8. Дьяченко А.Н., Шагалов В.В. Химическая кинетика гетерогенных процессов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 102 с.
9. Иванов А.Г. Параллельная программа безусловной минимизации // Вестник Челябинского государственного университета. 2003. Т. 3. № 2(8). С. 39-49.
10. Ивашко А.Г., Карякин И.Ю., Зюркалов А.А. Анализ методов Хука-Дживса и Нелдерамида применительно к задаче нахождения параметров модели фазовых превращений // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2010. № 6. С. 162-167.
11. Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Математическое моделирование катодных процессов при получении водорода // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 1. С. 99-105.
12. Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Кашапов Л.Н., Ключев С.В., Чебакова В.Ю. Исследование плазменно-электролитного процесса получения наночастиц оксида титана // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 5. С. 70-79.
13. Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Кинетика двухфазных газожидкостных сред в процессах электролиза // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 6. С. 869-876.
14. Королев С.А., Майков Д.В. Метод идентификации параметров модели метаногенеза в виде системы дифференциальных уравнений на основе генетиче-

- ского алгоритма // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 1(19). С. 29-35.
15. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., Палеев Д.Ю. Численное исследование сгорания полидисперсной газовой пыли угольной пыли в сферическом объеме // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8. № 3. С. 531-539.
16. Кузьмина М.Ю., Кузьмина А.С., Кузьмин М.П., Белик О.Д. Способ получения анодных пленок оксида цинка // Патент на изобретение 2723629 С1, 17.06.2020. Заявка № 2020112112 от 25.03.2020.
17. Майков И.Л., Зайченко В.М. Решение оптимизационных задач при химических превращениях // Управление большими системами: сборник трудов. 2013. № 42. С. 273-285.
18. Мамяченков С.В., Якорнов С.А., Анисимова О.С., Блудова Д.И. Обзор результатов исследования электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 2. С. 367-394.
19. Минаев Д.В. Электрохимическая регенерация хромовокислого электролита анодного оксидирования // Наука сегодня: теоретические и практические аспекты. материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях. Научный центр «Диспут». 2017. С. 34-35.
20. Мифтахов Э.Н., Зигангирова Д.Р., Мустафина С.А., Морозкин Н.Д. Алгоритм решения обратной задачи химической кинетики в условиях неопределенности исходных данных // Вестник Технологического университета. 2020. Т. 23. № 11. С. 101-105.
21. Новиков Е.А., Кнауб Л.В. Применение явного трехстадийного метода типа Рунге-Кутты для численного моделирования задач химической кинетики // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 1-1(22). С. 82-85.
22. Abbassi M., Chaabani A., Said L.B. An efficient chemical reaction algorithm for multi-objective combinatorial bi-level optimization // Engineering Optimization. 2022. Vol. 54(4). P. 665-686.
23. Abdel-Aal E.A. Kinetics of sulfuric acid leaching of low-grade zinc silicate ore // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 55. P. 247-254.
24. Alam M.W., Hussain S.G., Souayah B., Khan M.S., Farhan M. Numerical simulation of homogeneous-heterogeneous reactions through a hybrid nanofluid flowing over a rotating disc for solar heating applications // Sustainability (Switzerland). 2021. Vol. 13(15). Art. 8289.
25. Anisimova O.S., Sergeev V.A., Mamyachenkov S.V. et al. Electroextraction of Lead from a Lead Trilonate Solution // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54. P. 132-135.
26. Ashish J., Anthonysamy S., Ghosh C. et al. Electroextraction of boron from boron carbide scrap // Materials Characterization. 2013. Vol. 84. P. 134-141.
27. Bagotsky V.S. Fundamentals of Electrochemistry. 2nd Edn. // Wiley. New York. 2006. 752 p.

28. Boyanov B.S., Baev T.B. Utilization of zinc in powders from electric arc furnaces in steel production // *Journal of Mining and Metallurgy*. 2009. Vol. 45(1) B. P. 15-22.
29. Collins L., Bhattacharya K. Optimal design of a model energy conversion device // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 59(2). P. 389-401.
30. Farid M., Chaudhry A., Ytterstad M., Wiklund S.J. Pharmaceutical portfolio optimization under cost uncertainty via chance constrained-type method // *J. Math. Industry*. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 3.
31. Jaczson R. Optimal use of mixed catalysts for two successive chemical reactions // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1968. Vol. 2(1). P. 27-39.
32. Kleinikova S.A., Levchenko M.G., Yalmaev A.B. et al. Some features of alcohols electrooxidation process on Pd, Rh and PdRh catalysts // *Electrochimica Acta*. 2022. Vol. 409. Art 139998.
33. Kol'cov Yu.V., Boboshko E.V. Comparative analysis of optimization methods for solving the problem of interval evaluation of electric energy losses // *Computer research and modeling*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 231-239.
34. Leung P.K., Ponce-De-León C., Low C.T.J., Walsh F.C. Zinc deposition and dissolution in methanesulfonic acid onto a carbon composite electrode as the negative electrode reactions in a hybrid redox flow battery // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56(18). Pp. 6536-6546.
35. Li G., Liu X. Comments on «Optimal Use of Mixed Catalysts for Two Successive Chemical Reactions» // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2015. 165(2). C. 678-692.
36. Li H.H., Fu H.R., Li W.H. Analysis of logistics distribution path optimization planning based on traffic network data // *Computer Optics*. 2021. Vol. 45. No. 1. Pp. 154-160.
37. Liu M., Sun Z.H. Application of the fruit fly optimization algorithm to an optimized neural network model in radar target recognition // *Computer Optics*. 2021. Vol. 45. No. 2. Pp. 296-300.
38. Manikanta Kumar M., Raj C.R. Heteroatom-Doped Carbon-Encapsulated FeP Nanostructure: A Multifunctional Electrocatalyst for Zinc-Air Battery and Water Electrolyzer // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2022. Vol. 14(13). Pp. 15176-1518.
39. Monyoncho E.A., Steinmann S.N., Michel C., Baranova E.A., Woo T.K., Sautet P. Ethanol electro-oxidation on palladium revisited using polarization modulation infrared reflection absorption spectroscopy (PM-IRRAS) and density functional theory (DFT): why is it difficult to break the C-C bond // *ACS Catal*. 2016. Vol. 6(8). 4894-4906.
40. Naderipour A., Abdul-Malek Z., Hajivand M., Seifabad Z.M., Farsi M.A., Nowdeh S.A., Davoudkhani I.F. Spotted hyena optimizer algorithm for capacitor allocation in radial distribution system with distributed generation and microgrid operation considering different load types // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11. Art. 2728.
41. Nestoridis V., Andreou I., Vayenas C.G. Optimal residence time policy for product yield maximization in chemical reactors // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1986. Vol. 49(2). P. 271-287.

42. Ravindra Babu P., Pal U., Sen R.N., Karthikeyan R. Runge-Kutta type – 2 method for solving reactor point kinetics equations and its validation by analysing thermal and fast reactor benchmarks // *Annals of Nuclear Energy*. 2022. Vol. 170. Art. 108979.
43. Schikarski T., Avila M., Trzenschiok H. et al. Quantitative modeling of precipitation processes // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 444. Art. 136195.
44. Song J., Yu D., Wu X., Xie D., Sun Y., Vishniakov P., Hu F., Li L., Li Ch., Maximov M.Yu., El-Khatib K.M., Peng Sh. Interfacial coupling porous cobalt nitride nanosheets array with N-doped carbon as robust trifunctional electrocatalysts for water splitting and Zn-air battery // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 437. Art. 135281.
45. Voropanova L.A., Khomenko L.P. Kinetic parameters of electroextraction of cobalt from aqueous solutions of cobalt and manganese sulfates // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2007. Vol. 80(5). P. 734-739.
46. Zhang Y., Deng J., Chen J., PYu P., Xing X. The Electrowinning of Zinc from Sodium Hydroxide Solutions // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 146. P. 59-63.
47. Ziad T. Alismaeel, Ali H. Abbar, Osama F. Saeed. Application of central composite design approach for optimisation of zinc removal from aqueous solution using a Flow-by fixed bed bioelectrochemical reactor // *Separation and Purification Technology*. 2022. Vol. 287. Art. 120510.
48. Zvonkov V.B., Popov A.M. Comparative study of classical optimization methods and genetic algorithms // *Herald of the academician M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University*. 2013. Vol. 4. No. 50. Pp. 23-27.
49. Zaharova E.M., Minashina I.K. Overview of multi-dimensional optimization methods // *Informational processes* 2014. Vol. 14. No. 3. Pp. 256-274.
50. Gürmen S., Emre M. A laboratory-scale investigation of alkaline zinc electrowinning // *Minerals Engineering*. 2003. Vol. 16. No. 6. Pp. 559-562.

УДК 621.794

Исследование влияния вида раскислителя на наличие неметаллических включений в стальных отливках

Максим Леонидович Скрябин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Материаловедения, сопротивления материалов
и деталей машин»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

Вятский государственный агротехнологический университет,
г. Киров, Кировская область

В современном тяжелом машиностроении получение стальных отливок стало одной из важных структурных составляющих производственного процесса. В процессе получения отливок неизбежно появляются какие-либо дефекты. В данной работе рассмотрено влияние раскислителя на наличие неметаллических включений в стальных отливках из стали 35ХГСЛ, которые значительно снижают качество готового изделия. Также в работе рассмотрены некоторые параметры, снижающие вероятность появления как поверхностных, так и внутренних дефектов. В целом, неметаллические включения, расположенные на поверхности зерен, значительно ухудшают способность стали к пластической деформации из-за ослабления границ зерен и приводят к ухудшению механических свойств металлических материалов.

Раскислитель стали, стальные отливки, неметаллические включения, сталь 35ХГСЛ.

Investigation of the effect of the type of deoxidizer on the presence of non-metallic inclusions in steel castings

Maxim Leonidovich Scriabin, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
Resistance of Materials and Machine Parts,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Kirov region

In modern heavy engineering, the production of steel castings has become one of the important structural components of the production process. In the process of obtaining castings, any defects inevitably appear. In this paper, the influence of the deoxidizer on the presence of non-metallic inclusions in steel castings made of 35HGS steel, which significantly reduce the quality of the finished product, is considered. The paper also considers some parameters that reduce the likelihood of both surface and internal defects. In general, non-metallic inclusions located on the grain surface significantly impair the ability of steel to plastic deformation due to the weakening

of grain boundaries and lead to deterioration of the mechanical properties of metal materials.

Deoxidizer of steel, steel castings, non-metallic inclusions, steel 35HGSЛ.

Для получения высококачественных стальных отливок в литейном производстве необходимы мероприятия, устраняющие основные неметаллические включения. Это особенно важно при получении изделий, к механическим свойствам которых предъявляют высокие требования.

Причинами возникновения газовых дефектов, неметаллических включений и камневидного излома в стальных отливках могут быть как металл, так и литейная форма. Неметаллическими включениями следует считать нерастворимые в жидкой фазе стали химические соединения: сульфиды, окиси, силикаты, некоторые нитриды и карбиды.

Силикаты являются основными неметаллическими включениями, попадающими из формы, остальные включения в большинстве случаев попадают из металла. На качество отливки влияет не только количество неметаллических включений, но и их форма, а также расположение по сечению отливки. Неметаллические включения остроугольной формы во многих случаях могут стать концентраторами напряжений, а при эксплуатации изделия причиной его последующего разрушения [5, С. 305].

Большинство сталей, а также сплавы легированные алюминием, хромом, кремнием и некоторыми другими легирующими элементами склонны к образованию оксидных пленок. Окисная пленка, образующаяся на поверхности жидкой стали, уменьшает ее жидкотекучесть и является причиной образования различных дефектов в отливках.

Неметаллические включения, расположенные на поверхности зерен, значительно ухудшают способность стали к пластической деформации из-за ослабления границ зерен и приводят к ухудшению механических свойств металлических материалов. Исключением являются только неметаллические включения закругленной формы, равномерно распределенные по всему сечению и в самих зернах, существенно не изменяют свойств стали.

Неметаллические включения (частицы кладки печи, шлака засоренные шихтовые материалы и другие) могут попасть в расплав во время процесса получения стали. Источником неметаллических включений могут быть и различные реакции, протекающие в жидкой стали, в результате которых получают различные окиси, сульфиды, насыщающие расплав.

Перечисленные неметаллические включения можно сравнительно легко удалить из расплава задержкой их в ковше или использованием таких литниковых систем, в которых эти включения улавливаются с помощью специальных расширителей.

К числу чаще встречающихся неметаллических включений, образующихся в металле, можно отнести окись железа (FeO), двуокись силиция (SiO_2), железные и марганцевые силикаты ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ и $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$), легко всплывающие из расплава, сульфиды железа и марганца (FeS и MnS) и другие. Обыкновенно

сульфиды располагаются на поверхности зерен, образуют пленки с низкой температурой плавления и вызывают хрупкость нагретой стали во время пластической деформации.

Неметаллические включения небольших размеров практически невозможно устранить во время поступления металла в форму. Также можно отметить, что наличие некоторых неметаллических включений уменьшает коррозионную стойкость сплава, так как они образуют с металлической основой гальванические пары, облегчающие процесс электрохимической коррозии.

В процессе заливки литейной формы жидкой сталью часть неметаллических включений, попавших в металл из внешней среды, может всплыть в прибыль или собраться в поверхностных слоях отливки, снимаемых при последующей обработке резанием.

Скорость всплывания включений непосредственно зависит от сопротивления среды расплава и является существенным параметром, влияющим на выделение неметаллических включений из основной ванны.

Чаще всего неметаллические включения исследуют металлографически, что позволяет определять их количество, форму и размеры [3, С. 8].

При металлографическом анализе измеряют: поверхность, занятую включениями, отнесенную ко всей исследуемой поверхности шлифа, среднее количество включений на единицу поверхности; средний радиус включений.

В слитке неметаллические включения распределяются очень неравномерно. Это, прежде всего, относится к сульфидным включениям [6, С. 160].

Большое влияние на количество и размеры сульфидных включений оказывает скорость кристаллизации. В зависимости от скорости кристаллизации содержание серы, образующей видимые с помощью микроскопа сульфидные включения, изменяется от 10 до 100% общего количества ее в стали. При этом средний радиус включения составляет 1,5...12 мкм.

С увеличением скорости кристаллизации общий процент сульфидных включений и их размеры значительно уменьшаются.

Характер распределения сульфидных и силикатных включений по сечению отливки различен. Количество и размеры силикатных включений по сечению отливки практически не изменяются, тогда как количество сульфидных включений резко увеличивается в местах зональной ликвации. Кроме того, размеры сульфидных включений увеличиваются по направлению от поверхности к центральной части отливки. Силикатные включения устраняются усовершенствованием процессов плавки и разливки стали [4, С. 135].

Таким образом, основной способ уменьшения сульфидных включений в фасонных стальных отливках, характеризующихся сравнительно небольшими сечениями – это увеличение скорости кристаллизации. Указанного можно достигнуть применением металлических форм или смесей с высокой теплоаккумулирующей способностью [2, С. 245].

Создание условий, при которых неметаллические включения могут всплыть из жидкой стали, является одним из основных мероприятий по уменьшению неметаллических включений в стальных отливках.

Так как вязкость жидкой стали оказывает влияние на скорость всплыва-

ния включений, целесообразно перегревать металл во время плавления и выдерживать его в течение определенного времени при высокой температуре.

Для устранения сульфидов, вызывающих наиболее сильное охрупчивание стали в горячем состоянии, используют такие сильные раскислители, как алюминий, кальций, кремний и титан,

Для подтверждения влияния модификаторов на уменьшение количества неметаллических включений нами использовался силикокальций СК 30.

Были исследованы 36 плавов: 26 плавов, где раскислителем являлся алюминий А1 99 и 10 плавов, где использовался силикокальций СК 30 (табл. 1).

Таблица 1 – Исследование наличия неметаллических включений в зависимости от вида раскислителя: А1 99 и СК 30

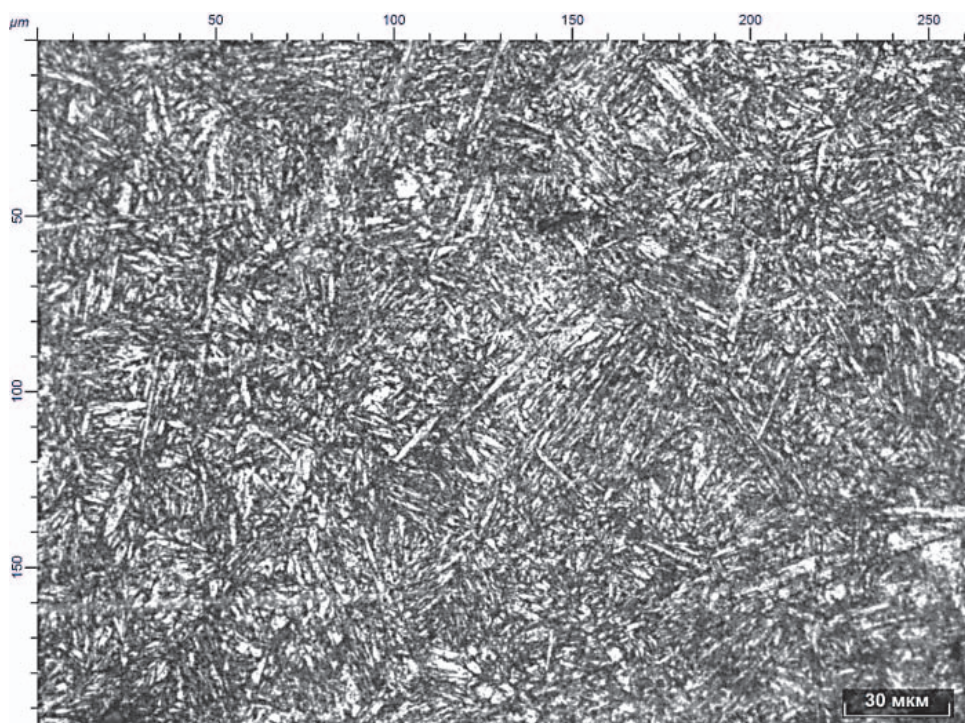
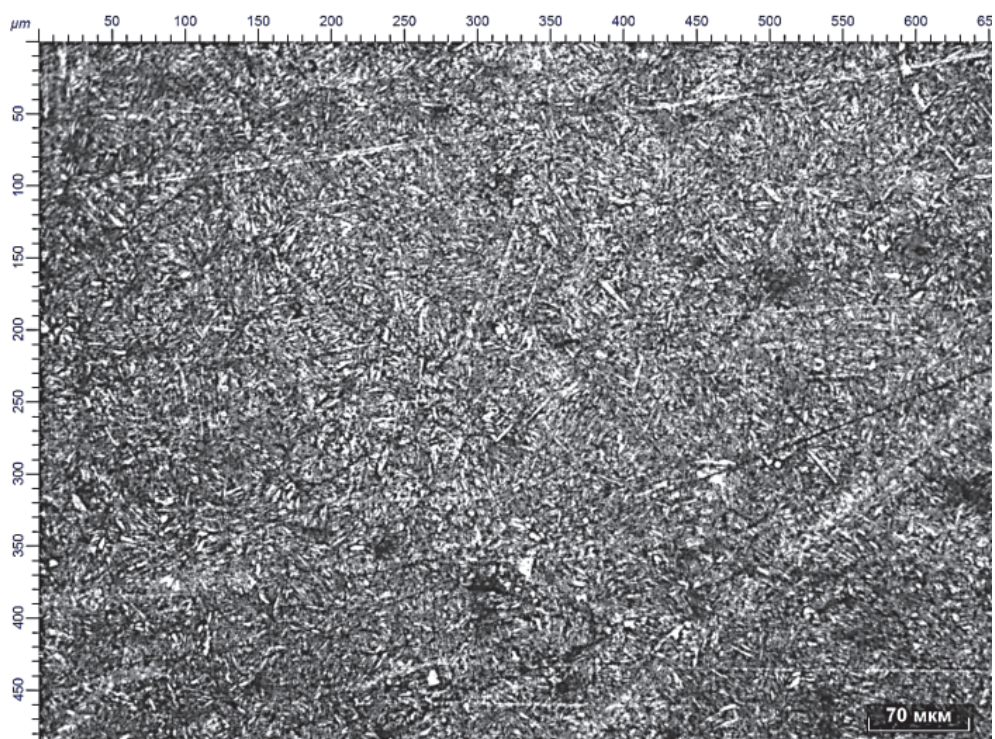
Раскислитель А1 99	Раскислитель СК 30
Количество неметаллических включений минимально	
19, 22, 23, 24, 40, 41, 47, 49, 51, 52, 53	25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 54
Количество неметаллических включений максимально	
20, 21, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 50	-

Для исследования влияния микролегирования на наличие неметаллических включений были отобраны 5 плавов: 27, 33, 34, 35, 44. На рисунке 1 изображены микроструктуры исследуемых образцов после проведения заключительной термической обработки. Также стоит отметить, что на плавке 27 в микроструктуре также присутствует большое количество игольчатого сорбита.

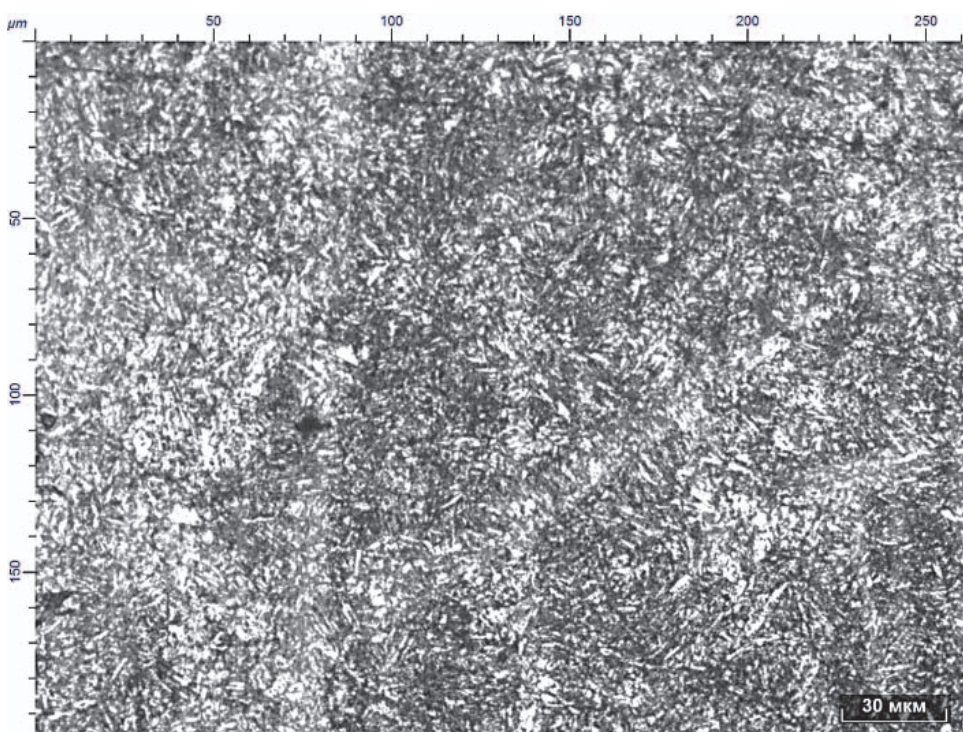
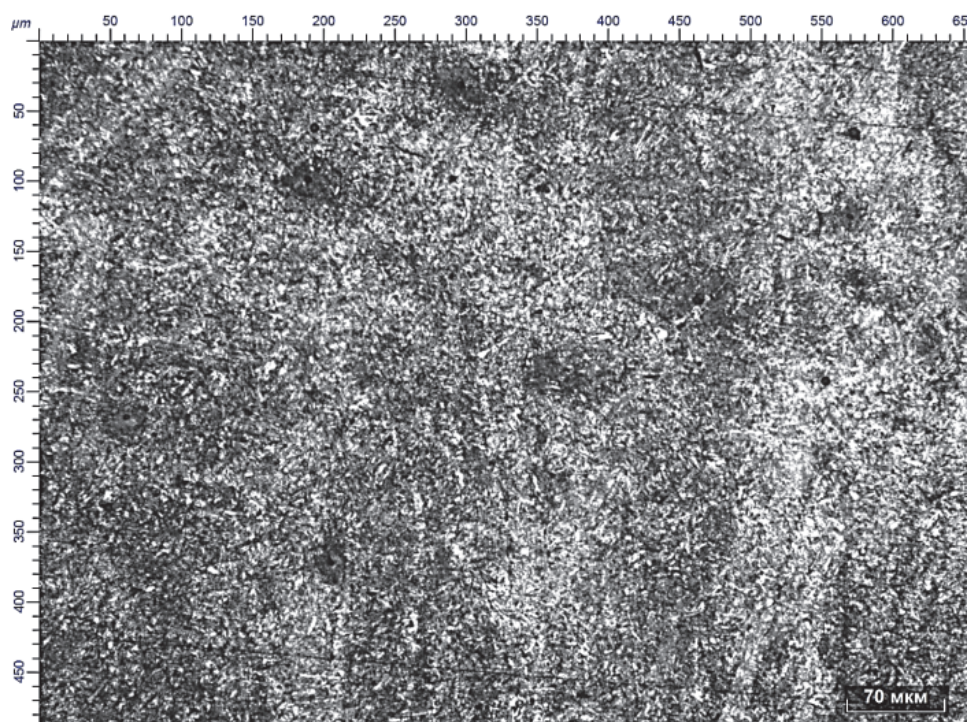
Проведя комплексный анализ полученных результатов, можно отметить, что силикокальций способствует предотвращению появления неметаллических включений, но всех закономерностей их появления не выявлено.

Для повышения механических характеристик отливок большое внимание следует уделять созданию условий для образования крупных неметаллических включений с более низкой температурой плавления, чем температура плавления металла [4, С. 132]. Для этого необходимо использовать комплексные раскислители (CaO, Al₂O₃, MnO, SiO₂, MnS).

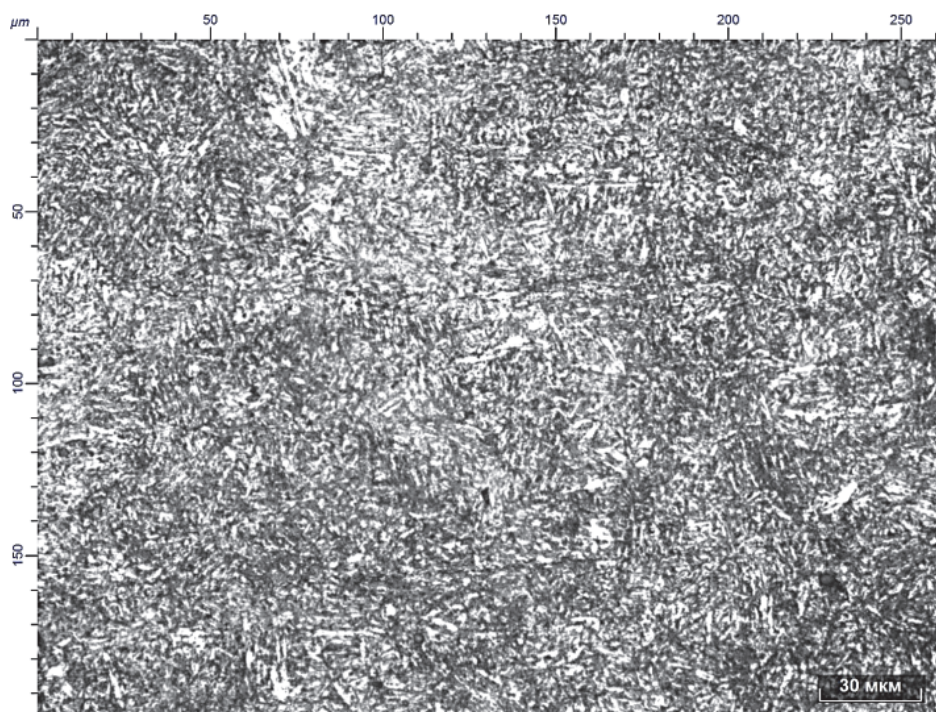
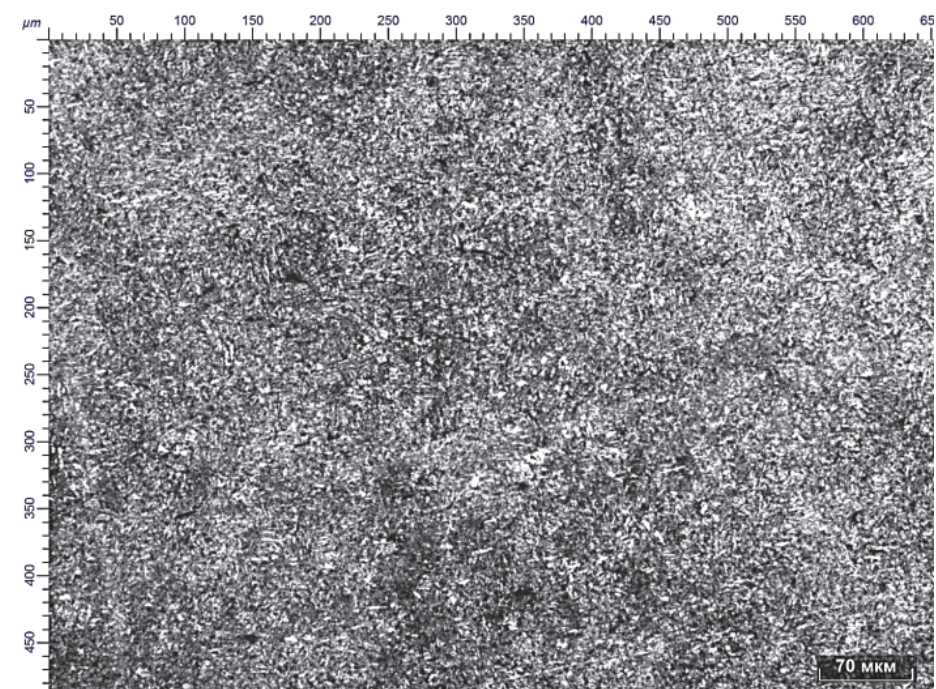
Также стоит отметить, что продувка инертными газами способствует очищению расплавов от неметаллических включений. В процессе продувки пузыри инертного газа прилипают к поверхностям включений и облегчают их всплывание на поверхность расплава.



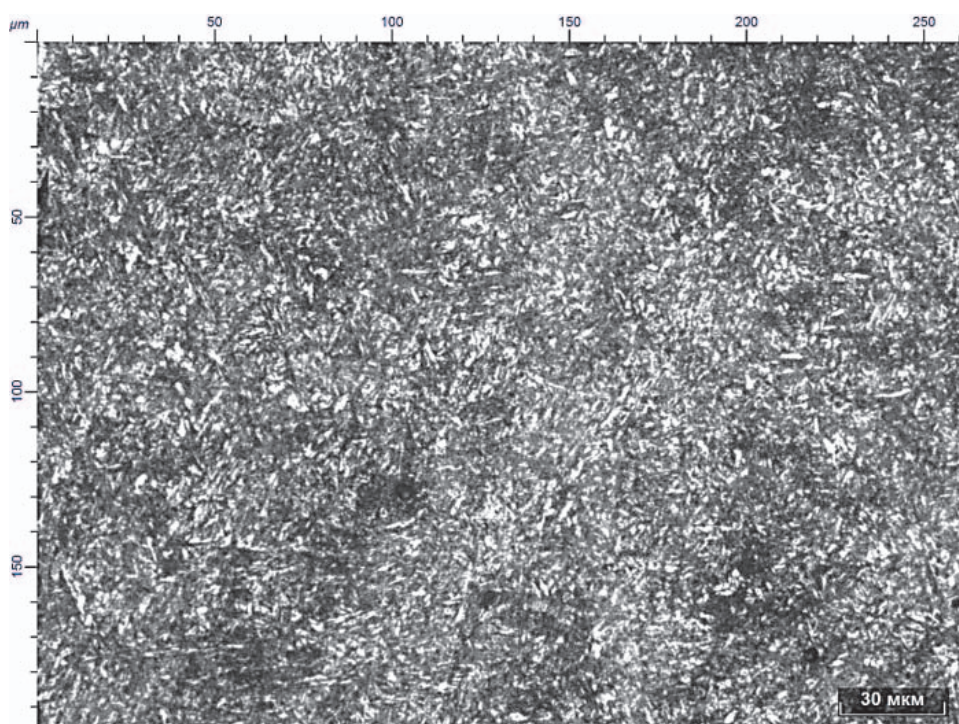
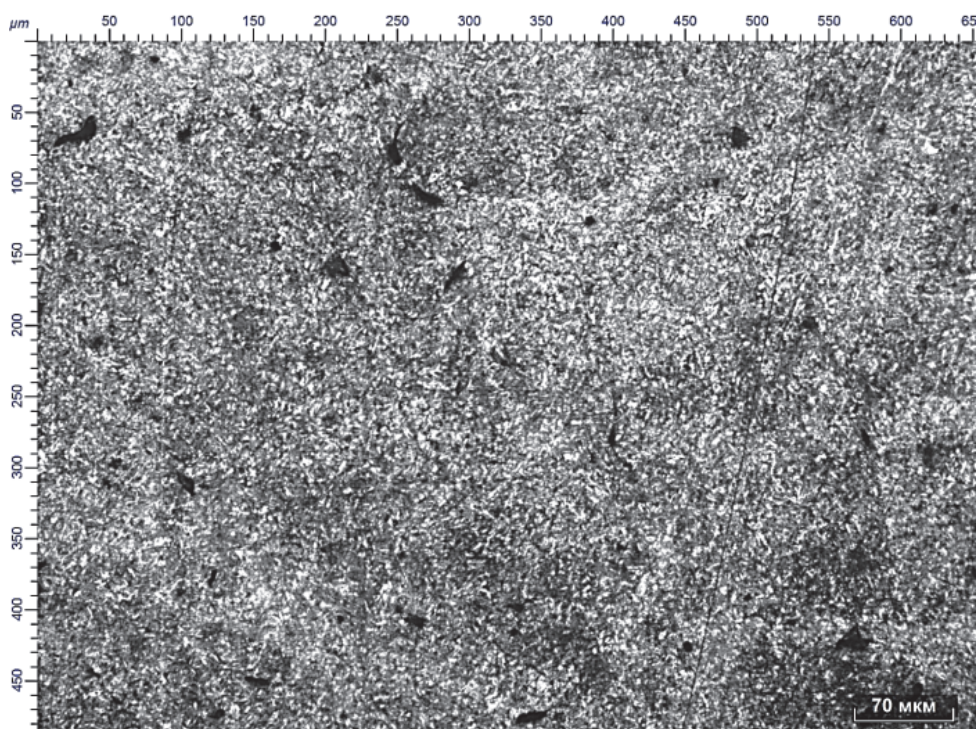
a)



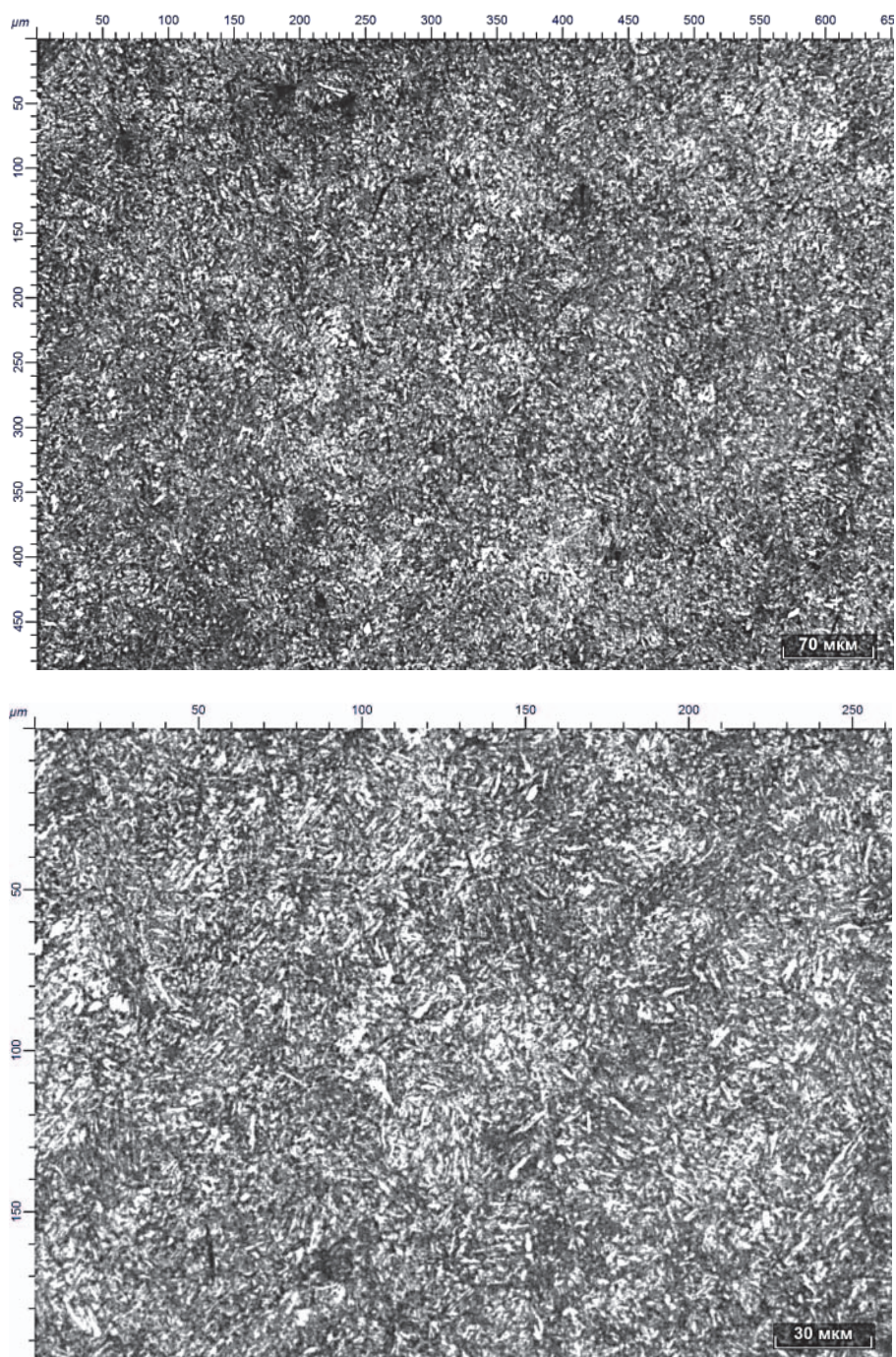
б)



В)



г)



д)

Рисунок 1 – Микроструктуры исследуемых образцов после заключительной термической обработки образцов следующих плавов:
а) 27; б) 33; в) 34; г) 35; д) 44

Необходимость применения эффективных модификаторов стали привела к введению в нее кальция, кремния, алюминия, нитридообразующих добавок. При использовании этих элементов в качестве модификаторов отдельные частицы выделяются из расплава в процессе кристаллизации и ограничивают рост зерен. Из сплавов, модифицированных данными элементами можно получить отливки с более высокими механическими свойствами. Также применение силикокальция в качестве модификатора позволяет получать глобулярные неметаллические включения и повышать ударную вязкость металла.

Литература

1. Герасимова Л.П., Ершов А.А. Изломы конструкционных сталей. М: Металлургия, 1987. 272 с.
2. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т. 1: Физические методы исследования металлов: Справочное пособие / под ред. А.Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1971. 552 с.
3. ОСТ 1 90093-82. Отливки фасонные из конструкционной легированной стали. 1982. 13 с.
4. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Ф. Б. Пикеринг; пер. с англ. М.: Металлургия, 1982. 184 с.
5. Скрябин М.Л. Исследование камневидного излома литой стали у сельскохозяйственных машин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Кокино, 2019. № 1(18). С. 304-310.
6. Скрябин М.Л., Чухлова С.С. Исследование влияния тонких нитридных пленок алюминия на камневидный излом литой стали // Информационно-технологический вестник. 2018. № 3(17). С. 158-166.

УДК 674.815

Анализ возможных механизмов разрушения ламинированных композиционных материалов с использованием модели

Борис Леонидович Спирин, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,
Сергей Владимирович Фролов, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой механики и инженерной графики,
Владимир Владимирович Абразумов, доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики,
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

В данной статье рассматриваются различные аспекты повреждений многослойных композиционных материалов, связанные с нарушением структуры слоев данных изделий. В предложенной модели изучается механика повреждений в зависимости от типа внешних нагрузок. Особое внимание уделено краевому эффекту разрушения данных композитов, который может оказать решающий вклад в нарушение работоспособности изделия из данного материала. Рассмотрены структурные нарушения, такие как разрушения матрицы, изгиб образующих волокон, нарушение межслойного взаимодействия, граничное разрушение.

Композиционные материалы, ортотропные материалы, расслоение, краевой эффект.

Methods for determining the possibility of failure of laminated composite materials

Boris Leonidivich Spirin, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
Sergei Vladimirovich Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
Vladimir Vladimirovich Abrazumov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «State Fire Academy of EMERCOM of Russia», Moscow

This article discusses various aspects of damage to multilayer composite materials associated with disruption of the structure of the layers of these products. The proposed model studies the mechanics of damage depending on the type of external loads. Particular attention is paid to the edge effect of destruction of these composites, which can have a decisive contribution to the malfunction of a product made from this material. Structural disturbances such as matrix destruction, bending of forming fibers, disruption of interlayer interaction, and boundary failure are considered.

Composites, orthotropic materials, stratification, edge effect.

Вводная часть

При расчетах на прочность многослойных композитных материалов используют теорию ламината (CLT – Classical Lamination Theory), которая основана на классических положениях Кирхгофа-Лова (Kirchhoff-Love) [1], составляющих её основу. В данную теорию входит допущение о том, что прямая, проведенная через композит перпендикулярно плоскости среднего слоя, остается неизменной и после деформации, вызванной приложением внешней нагрузки. Деформациями и напряжениями, лежащими вне плоскости пластинки можно пренебречь, что соответствует теории плоского напряженного состояния. Следовательно, зависимости между напряжениями и деформациями для ортотропных материалов можно записать в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где Q_{ij} – компоненты, показывающие снижение прочности пластинки, зависящие от следующих свойств материала: продольного модуля упругости (E_1), поперечного модуля упругости (E_2), модуля сдвига (G_{12}), а также коэффициента Пуассона (ν_{12}), и, соответственно определяются по формулам:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{E_1\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12}$$

Данный материал состоит из различных по своим свойствам слоев, каждый из которых может иметь свою толщину t_k и ориентацию волокна θ_k . Следовательно, относительно главной оси усилия для каждого слоя можно записать в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 + zk_x^0 \\ \varepsilon_y^0 + zk_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 + zk_{xy}^0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $z_{k-1} < z < z_k$, ε^0 и k^0 – коэффициенты деформации и кривизны среднего слоя. $\bar{Q}_{ij}$ – компонент жесткости пластинки для k - слоя, может быть определен по формуле:

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{11} &= U_1 + U_2 \cos(2\theta_k) + U_3 \cos(4\theta_k) \\
\bar{Q}_{12} &= U_4 - U_3 \cos(4\theta_k) \\
\bar{Q}_{22} &= U_1 - U_2 \cos(2\theta_k) + U_3 \cos(4\theta_k) \\
\bar{Q}_{66} &= U_5 - U_3 \cos(4\theta_k) \\
\bar{Q}_{16} &= (U_2 \sin(2\theta_k) + U_3 \sin(4\theta_k)) / 2 \\
\bar{Q}_{26} &= (U_2 \sin(2\theta_k) - 2U_3 \sin(4\theta_k)) / 2
\end{aligned} \tag{3}$$

где U_i – инвариантные свойства слоя, которые определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
U_1 &= \frac{(3Q_{11} + 3Q_{22} + 2Q_{12} + 4Q_{66})}{8} \\
U_2 &= \frac{(Q_{11} - Q_{22})}{2} \\
U_3 &= \frac{(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 4Q_{66})}{8} \\
U_4 &= \frac{(Q_{11} + Q_{22} + 6Q_{12} - 4Q_{66})}{8} \\
U_5 &= \frac{(Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} + 4Q_{66})}{8}
\end{aligned}$$

Деформации слоев имеют различное значение в зависимости от толщины композита. Следовательно, зависимости напряжений в слое от кривизны слоя K_i и угла ориентации волокна θ_k могут быть как постоянными, так и находиться в линейной зависимости. Поэтому в конечном итоге для определения величины внутренних силовых факторов необходимо произвести интегрирование по толщине пластины:

$$\left\{ \begin{aligned} N_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz, & N_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz, & N_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz, \\ M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz, & M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz, & M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz, \end{aligned} \right. \tag{4}$$

Теперь произведем подстановку каждого полученного значения напря-

жения для соответствующего слоя в выражение (2) и получим:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{11} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{11} & B_{11} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} , – имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned}$$

Жесткость композита определяется коэффициентами растяжения A , коэффициентами изгиба B и коэффициентами связи изгиб-растяжение D .

Силы, лежащие в плоскости композита с деформациями средней плоскости, связаны коэффициентами A . Моменты, лежащие в плоскости, связаны с величиной изгиба (кривизны) посредством коэффициентов D . Коэффициенты B связывают силы в плоскости с кривизной (продольный изгиб), а суммарный момент – с деформациями в средней плоскости (для несимметричных композитов).

Эти коэффициенты отвечают за механические свойства многослойных композитов и оптимизируются в соответствующих целевых функциях для получения материалов с заданными свойствами, либо являются граничными условиями в задачах определения прочности композита. В различных отраслях промышленности получение нужных свойств достигают либо применением несимметричных, либо полностью изотропных материалов.

Зная механические свойства каждого слоя композитного материала, можно рассчитать соответствующие усилия, возникающие в нем, а значит оценить возможность появления в каждом слое нарушения сцепления волокон внутри слоя, нарушения сцепления слоев и плоскости композита, появление значительных касательных напряжений приводящих к сдвигу слоев относительно друг друга, нарушение прямолинейности волокна. Эти изменения приводят к разрушению композита, но вклад каждого из них в окончательное разрушение оказывается различным. Также точно не известно взаимное действие данных факторов

друг на друга. Влияние каждого из этих факторов требует отдельного глубокого изучения и является предметом большого количества экспериментальных работ.

В предложенной модели сделана попытка рассмотреть совместное действие влияющих на разрушение факторов и оценить вклад каждого из них, а также выяснить допустимые условия работы композитов, имеющих различные дефекты. В качестве допущения принято, что материалы, не имеющие дефектов, работают в зоне абсолютной упругости и подчиняются действию закона Гука. Также механизм развития трещины рассмотрен достаточно упрощенно, но соответствует с достаточной степенью точности экспериментальным данным, полученным другими исследователями.

Процесс разрушения многослойного композита при действии нагрузки можно условно разделить на несколько этапов. На начальных этапах происходит постепенная загрузка матрицы композита до момента ее «насыщения» (Рейфснидер и Хайсмит [7]). В это время возможны локальные, «простые» и несвязанные между собой нарушения структуры ламината, зависящие от неоднородности матрицы, что неизбежно из-за неидеальности материала и процесса изготовления. Дальнейшее нарушение структуры композита является более сложным процессом, начинается рост трещин, появившихся на первом этапе. Из-за невозможности перераспределения нагрузки на пока не полностью загруженные слои, появляются вторичные трещины. Происходит расслоение волокон и их «микровыпучивание» на отдельных участках пластинок, что особенно заметно у композитов, имеющих разную ориентацию ламината по толщине. Особенно заметно эти эффекты проявляются вблизи свободных кромок плиты. На следующей стадии материал становится нестабильным и разрушается за счет сильного взаимодействия всех этих дефектов между собой.

Для решения данной проблемы Работновым и Качановым [9] был предложен метод одномерного двухфазного разрушения композита, основанный на теории ползучести, который был обобщен для трехмерных задач в работах Десаи и Францискониса [4]. Данный метод получил достаточно широкое применение и используется не только для решения задач прочности композита, но и для исследования свойств других анизотропных хрупких материалов, в которых появление зон локальной ползучести начинается при незначительной нагрузке и в дальнейшем может нарастать лавинообразно. При составлении данной модели эти методы были учтены, а также использована теория смесей, рассмотрена механика разрушения, опирающаяся на экспериментальные данные.

Для составления модели рассмотрим некоторую малую часть объема композита ΔV . Этот объем можно разделить на неповрежденную область ΔV_u и область с нарушениями в структуре композита ΔV_d . По причине неоднородности объема в материале возникают области и плоскости ослабления, которые создают зоны влияния, оказывающие воздействие на соседние участки. В таких местах начинается развитие трещин и возникают другие нарушения в структуре композита. Данные зоны показаны на рисунке 1. Эти зоны влияния определены объемом ΔV_d и возрастают по мере увеличения нагрузки.

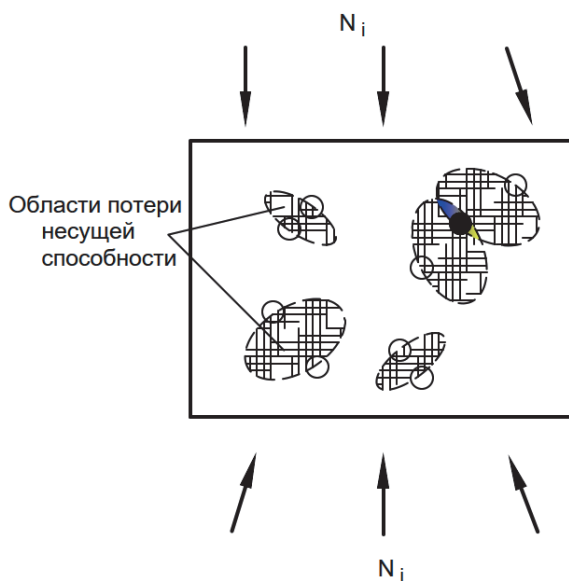


Рисунок 1 – Две области пластины (слоя) композита ○- зона возможного появления трещины; ● – зона маловероятного появления трещины

$$\Delta V = \Delta V_u + \Delta V_d$$

Введем соотношение, которое назовем коэффициент повреждения объема:

$$r = \frac{\Delta V_d}{\Delta V}$$

Данная часть объема представляет суперпозицию двух состояний материала: неповрежденного и поврежденного, которые называются соответственно **u**-состояние **d**-состояние. Отсюда следует, что для анализа явлений, происходящих в данном объеме, придется использовать теорию взаимодействующих сплошных сред. Исходя из данной теории, можно записать следующее выражение для полного тензора напряжений в данном объеме:

$$\sigma_{ij} = (1-r)\sigma_{ij}^u + r\sigma_{ij}^d, \quad (6)$$

где σ_{ij}^u и σ_{ij}^d задают тензоры напряжений неповрежденной (**u**) и поврежденной (**d**) частей объема соответственно.

Все эти тензоры могут быть разложены на изотропную и анизотропные части соответственно:

$$\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + S_{ij}, \quad \sigma_{ij}^u = p^u\delta_{ij} + S_{ij}^u, \quad \sigma_{ij}^d = p^d\delta_{ij} + S_{ij}^d$$

$$p = \frac{\sigma_{kk}}{3}, \quad p^u = \frac{\sigma_{kk}^u}{3}, \quad p^d = \frac{\sigma_{kk}^d}{3}$$

Поскольку для данного материала взаимное смешивание частей отсутствует, то можно записать:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^u = \varepsilon_{ij}^d,$$

где ε – соответствующие тензоры деформаций

Рассмотрим пластину, находящуюся в k -м слое. Расположим для неё координатные оси таким образом, чтобы ось (1) была параллельна волокну слоя, а ось (2) перпендикулярна ему и лежала в плоскости пластины. В результате воздействия нагрузки зоны деформации для повреждённого и неповрежденного объема распределились в соответствии с рисунком 1. Если материал не разрушен, то для части d жесткость на сдвиг равна 0:

$$S_{ij}^d = 0 \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7):

$$p = (1-r)p^u + rp^d$$

$$S_{ij} = (1-r)S_{ij}$$

Обозначим через σ_{ij}^{dm} и σ_{ij}^{df} – тензоры напряжений для пластины слоя и волокон, составляющих слой соответственно. С учетом этого (7) можно записать:

$$\sigma_{ij}^{dm} = p^d \delta_{ij}$$

Составляя уравнения равновесия для продольной оси (1), получаем

$$\sigma_{11}^d = \lambda \sigma_{11}^{df} + (1-\lambda) \sigma_{11}^{dm},$$

где λ определяется как отношение площади волокна к площади всей пластины, если площадь берется перпендикулярно продольной оси:

$$\lambda = \frac{A_f}{A}$$

Для остальных направлений можно получить:

$$\sigma_{22}^d = \sigma_{22}^{df} = \sigma_{22}^{dm} = p^d$$

$$\sigma_{33}^d = \sigma_{33}^{df} = \sigma_{33}^{dm} = p^d$$

Исходя из гипотезы, что до разрушения свойства волокна не меняются можно переписать выражение с учетом следующих обозначений: E_f – модуль Юнга материала, Δ – коэффициент пропорциональности для поврежденной части пластины:

$$\sigma_{11}^{df} = E_f \varepsilon_{11}$$

$$p^d = \Delta \varepsilon_{kk}$$

Для нагрузки, действующей в плоскости слоя в части **d** можно записать следующее соотношение между нагрузкой и деформациями:

$$\sigma_{ij}^{df} = C_{ijkl}^d \varepsilon_{kl},$$

где C_{ijkl}^d – функция от переменных $\lambda, E_f, \Delta, \nu_{12}$. Аналогичное выражение можно записать и для неповрежденной **u** – части (с учетом того, что в ее составе нет трещин):

$$\sigma_{ij}^u = C_{ijkl}^u \varepsilon_{kl}$$

Здесь коэффициент C_{ijkl}^u – тензор четвертого ранга неповрежденной части **u**, которую можно рассматривать как ортотропную, и, соответственно, содержащую 9 независимых коэффициентов. Как известно, для плоского напряжённого состояния независимыми коэффициентами, не равными 0, являются: $E_{11}, E_{22}, \nu_{11}, G_{12}$. После получения повреждений материал изменяет свои свойства, и к начальным условиям не возвращается. Функции его работы становятся неголономными, а значит трудно поддающимися определению обычным путем и определяемыми в основном только статистическими методами с той или иной степенью точности. Из предыдущих уравнений можно записать:

$$\dot{\sigma}_{ij} = L_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} - \dot{T}_{ij}, \text{ где}$$

$$L_{ijkl} = (1-r) C_{ijkl}^u + r C_{ijkl}^d$$

$$\dot{T}_{ij} = \dot{r} (\sigma_{ij}^u - \sigma_{ij}^d)$$

Для полноты модели необходимо определить закон изменения $\dot{r}$:

$$\dot{r} = f(\dot{\varepsilon}_{ij}, \varepsilon_{kl}) \quad (8)$$

В случае плоского напряженного состояния (8) примет вид:

$$\dot{r} = A \dot{\varepsilon}_{11} + B \varepsilon_{22} + C \dot{\varepsilon}_{12}, \quad (9)$$

где коэффициенты A, B, C зависят от величины соответствующей деформации. Существует некоторое пороговое значения r , которое можно обозначить как r_{cr} , при достижении которого происходит разрушение материала (соответствующие значения имеют верхний индекс **f**), и используя классическую теорию разрушений, это значение может быть записано в следующем виде:

$$r_{cr} = a(\varepsilon_{11}^f)^2 - a(\varepsilon_{11}^f)(\varepsilon_{22}^f) + b(\varepsilon_{22}^f)^2 + c(\varepsilon_{12}^f)^3$$

Здесь величины a , b , c – некоторые константы для данного материала, определяющие условия разрушения. Для состояния, возникающего непосредственно перед разрушением данное уравнение можно переписать в следующем виде:

$$r = a(\varepsilon_{11})^2 - a\varepsilon_{11}\varepsilon_{22} + b(\varepsilon_{22})^2 + c(\varepsilon_{12})^2. \quad (10)$$

Решая уравнения (9) и (10), совместно получаем следующие выражения:

$$A = 2a\varepsilon_{11} - a\varepsilon_{22}$$

$$B = 2b\varepsilon_{22} - a\varepsilon_{11}$$

$$C = 2c\varepsilon_{12}$$

В выражениях (9) и (10) величины r и $\dot{r}$ являются скалярными и могут быть в основном использованы для случаев изотропных и ортотропных материалов. Ненагруженное состояние материала, когда на него не действует сила и начальные свойства слоев композита является изотропным или ортотропным для плит, образованных волокнами. Но по мере роста нагрузки в материале возникают трещины и другие нарушения структуры материала, которые в общем нельзя отнести к изотропным или ортотропным. Начинает проявляться анизотропия материала с трещинами (дефектами) и начальная модель становится сильно упрощенной. Для того, чтобы этого избежать, в модель обычно вводится внутренняя переменная T , которая является тензором и задает анизотропные свойства композита, появляющиеся в нем при увеличении нагрузки. Использование тензора позволяет задавать нелинейные соотношения (используя, например модуль сдвига) между усилиями и деформациями не усложняя запись основных уравнений модели. Экспериментальные данные показывают, что трещины в композите появляются в основном вдоль или поперек волокон, но дальнейшее поведение дефектов достаточно сложно формализуется.

На основе этих результатов можно определить основные константы для данной модели. Для более точного определения констант требуется провести испытание на растяжение и сжатие вдоль волокон, поперек волокон, а также на определение модуля сдвига. В определении последнего, однако, возникают некоторые сложности, например для материалов, в которых значительную роль начинают играть краевые эффекты (расщепление волокна вдоль кромок).

В многослойных композитах значительное влияние начинают оказывать межслойные напряжения и деформации, особенно для материалов с различной ориентацией волокон в каждом слое. На рисунке 2 приведен пример такого композита, который состоит из симметричных ортотропных слоев. Данный композит испытывает напряжения растяжения.

Для определения возникающих в композите напряжений записываются уравнения равновесия для моментов с учетом закона парности напряжений, распределение которых также показано на рисунке 2. Момент, вызываемый векто-

ром σ_z , должен быть уравновешен моментом вектора σ_y . Межслойные силовые факторы вектора σ_z вызывают расслоение композита. Согласно гипотезе Пайпса (Pipes) [10], ширина области, в которой проявляется данный эффект, примерно равна толщине ламината и может быть учтена как краевой эффект. На остальной площади плиты может применена теория плоского напряженного состояния, и разрушения в ней значительно отличаются от аналогичных в краевых слоях.

Снова рассмотрим некоторый малый объем на краю плиты ΔA , который в свою очередь состоит из нормальной и поврежденной областей ΔA_u и ΔA_d . Символом t обозначим толщину ламината. Данное разделение применимо для некоторого расстояния от края – mt , где m – целое число.

$$\Delta A = \Delta A_u + \Delta A_d$$

$$r_e = \frac{\Delta A_d}{\Delta A}$$

где r_e – коэффициент повреждения свободного края композита. Его значение достигает максимума на краю и уменьшается до минимума на расстоянии mt от края. Определим среднее значение в направлении оси 1.

$$\bar{r}_e = \frac{1}{mt} \int_{mt} r_e dA$$

Межслойное повреждение возможно только для случая растяжения вдоль вектора σ_z , поэтому для областей сжатия эта величина не учитывается.

$$\bar{\sigma}_z = \frac{1}{mt} \int_{mt} \langle \sigma_z \rangle dA \quad (11)$$

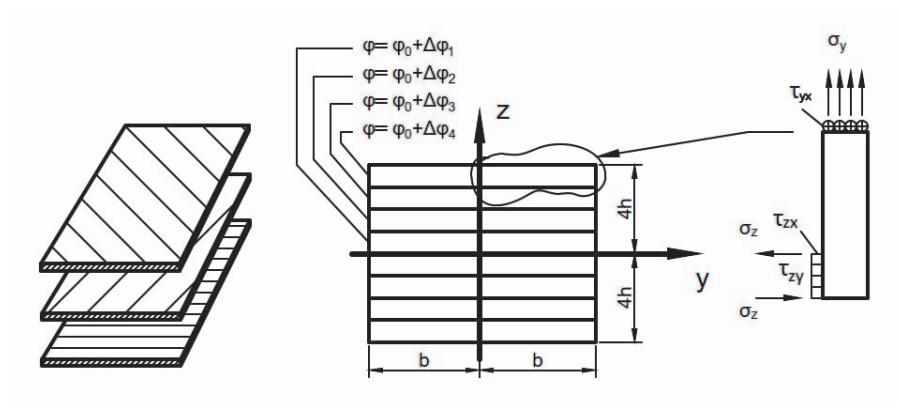


Рисунок 2 – Появление межслойных напряжений φ – угол ориентации волокна; σ_z – нормальные напряжения; τ – касательные

С учетом уравнений равновесия данное выражение может быть записано в следующем виде:

$$\bar{\sigma}_z = \varphi \sigma_z^*, \quad \text{где}$$

$$\sigma_z^* = \int_{\text{я}}^{\text{т/2}} \sigma_y(n) n dn$$

Свойства распределения σ_z^* определены через анализ двумерной матрицы свойств композита. Если ввести допущение о зависимости величины зоны разрушения от величины растягивающего усилия, то известна функция, связывающая ΔA и σ_z :

$$\bar{r}_e = \varphi' \dot{\sigma}_z^* \quad \text{или} \quad \bar{r}_e = \varphi' \sigma_z^*$$

Используемая в данном выражении константа задает область распределения напряжений по свободной кромке. Для определения данной константы рассмотрим зону, на которой разрушения оказывают влияние на свободный край:

$$r_l = r + \bar{r}_e$$

Величина φ' определяется экспериментальным путем, связанным с изучением расслоения кромок [5].

Выделим из композита некоторую область R объемом ΔV , границу которой обозначим ∂R , на которую действуют внешние силы F , со скоростью $\dot{E}$. Следовательно,

$$\dot{E} = \frac{1}{\Delta V} \int_R \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dV$$

Некоторая часть данной работы перейдет в потенциальную энергию упругой деформации для частей u и d , а часть будет потеряна в результате преобразования u материала в d , которую обозначим $\dot{Q}$. И тогда

$$\dot{E} = \frac{1}{\Delta V} \left[\int_{\Delta V_d} \sigma_{ij}^d \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_{\Delta V_u} \sigma_{ij}^u \dot{\epsilon}_{ij} dV + C \right] + \dot{Q} + \langle \dot{S} \rangle, \quad (12)$$

где $\langle \dot{S} \rangle$ – скорость нагружения при которой происходит расслоение свободных краев композита, и $\langle \dot{S} \rangle = 0$, если часть объема не находится в зоне повреждения композита. $\dot{Q} = qV_d$; $\dot{S} = \delta \dot{A}_d$, в свою очередь $\dot{V}_d, \dot{A}_d$ – скорости изменения соответствующих величин. Окончательно баланс энергии можно записать в виде:

$$-\left[\int_{\partial R} T_i \dot{u}_i dS + \int_R c f_k \dot{u}_k dV \right] = \int_R \dot{E} dV + \frac{1}{2} \int_R c \frac{d}{dt} \dot{u}_i \dot{u}_j dV$$

В левой части выражения присутствует часть работы, переходящая в потенциальную энергию, а последнее выражение в правой стороне часть кинетической энергии. Рассмотрим полностью расслоившийся композит и сравним это состояние с композитом, имеющим множественные трещины по всему объему.

Обозначим через $A(t)$ суммарную площадь трещин в композите, $\dot{\Gamma}$ – эффективная поверхностная энергия, γ – коэффициент отношения поверхностной энергии трещины к единице объема. Тогда по формуле Гриффитса получим:

$$\dot{\Gamma} = \gamma \dot{A}$$

Баланс энергии для композита, содержащего трещины в уравнении (12), требует, чтобы вместо $\dot{Q} + \langle \dot{S} \rangle$, была использована величина $\dot{\Gamma}$. Таким образом, данный метод позволяет использовать подход механики разрушения с точки зрения энергетического баланса. Необратимые процессы, происходящие в композите, связаны с ростом повреждений из-за увеличивающейся деформации и из-за краевых эффектов. Упругая часть деформации может быть определена следующим образом:

$$\dot{E}^R = \int_{\Delta V_u} \sigma_{ij}^u \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_{\Delta V_u} \sigma_{ij}^d \dot{\epsilon}_{ij} dV + C \quad (13)$$

Следовательно,

$$\dot{U} = \int_R \dot{E}^R dV; \quad \dot{H} = \int_{\partial R} T_i \dot{u}_i dS + \int_R c f_k \dot{u}_k dV; \quad \Pi = U + H \quad (14)$$

Из (13) и (14) можно получить выражение для коэффициента преобразования энергии деформации G , которая необходима для преобразования неповрежденного объема в объем с трещинами. То есть энергия необходимая для расщепления. Если нагрузка является постоянной, а свободная граница перемещается, тогда работа силы в два раза превосходит энергию упругой деформации [2]. Следовательно,

$$\frac{\partial H}{\partial V_d} = 2 \frac{\partial U}{\partial V_d}; \quad \frac{\partial H}{\partial A_d} = 2 \frac{\partial U}{\partial A_d}$$

Полный баланс энергии:

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial V_d} = \frac{\partial Q}{\partial V_d} + \frac{\partial \langle S \rangle}{\partial V_d} = \frac{\partial U}{\partial V_d} = G$$

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial A_d} = \frac{\partial Q}{\partial A_d} + \frac{\partial \langle S \rangle}{\partial A_d} = \frac{\partial U}{\partial A_d} = G'$$

Если возникающие повреждения считать квазистатическими, то

$$\frac{\partial K}{\partial V_d} = 0; \quad \frac{\partial K}{\partial A_d} = 0$$

Если скорость повреждений возрастает, то возрастает и кинетическая энергия

$$\frac{\partial^2 K}{\partial (V_d)^2} > 0; \quad \frac{\partial^2 K}{\partial (A_d)^2} > 0$$

Первое неравенство справедливо при появлении только трещин, второе - при расслоении композита. Если одновременно идут оба процесса, то используются оба неравенства. Окончательно суммарный рост повреждений:

$$-\frac{\partial^2 \Pi}{\partial (V_d)^2} - \frac{\partial^2 Q}{\partial (V_d)^2} - \frac{\partial^2 \langle S \rangle}{\partial (V_d)^2} > 0$$

$$-\frac{\partial^2 \Pi}{\partial (A_d)^2} - \frac{\partial^2 Q}{\partial (A_d)^2} - \frac{\partial^2 \langle S \rangle}{\partial (A_d)^2} > 0$$

Данные неравенства аналогичны интерпретации процесса роста трещины по формуле Гриффитса. По мере роста нагрузки растут и трещины или расслоение. Если выполняется первое неравенство, то наиболее активен рост трещин, если второе, то активно происходит деламинация.

Рассмотрим основные характеристики материала (Таблица 1) и результаты, полученные экспериментальным путем (Рис. 3):

Таблица 1 – Исходные основные характеристики материала

Упругие деформации	Появление трещин	Деламинация
$E_{11}=120 \text{ ГПа}$ $E_{22}=10 \text{ ГПа}$ $G_{12}=7 \text{ ГПа}$ $\gamma_{12}=0.3$	$\sigma_{11}^f = -1.2 \text{ ГПа}; \sigma_{22}^f = -0.9 \text{ ГПа};$ $\sigma_{12}^f = 96 \text{ МПа}; \varepsilon_{11}^f = -10 \cdot 10^{-3}$ $\varepsilon_{22}^f = -3 \cdot 10^{-3}; \varepsilon_{12}^f = 14 \cdot 10^{-3}$	$a=1.7 \cdot 10^3$ $b=0.3 \cdot 10^3$ $c=1.5 \cdot 10^3$ $r_{cr} = 0.24$ $\Delta=2.5 \cdot 10^3$

Перед проведением испытаний композитов проводился расчет модели, в которой использовались приведённые в таблице 1 данные.

Как видно из рисунка 3, результаты расчетов, полученные при использовании данной модели, имеют хорошее совпадение и подтверждаются результатами эксперимента.

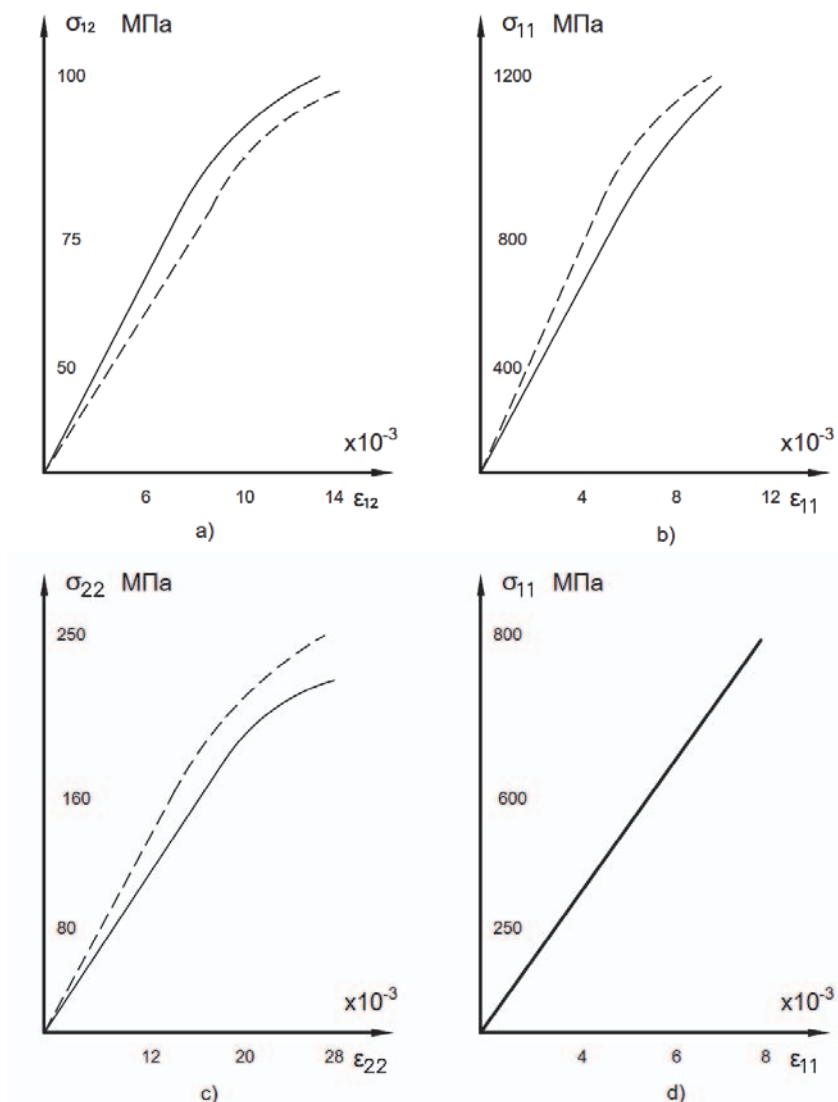


Рисунок 3 – Результаты расчетов и с экспериментальные данные
 (Сплошная линия – результат расчетов, пунктирная – экспериментальные данные.
 (а) – чистый сдвиг, (б) – сжатие поперек волокон, (с) – сжатие вдоль волокна,
 (д) – растяжение вдоль волокна)

Выводы

Таким образом, для прогнозирования поведения многослойного композиционного материала под нагрузкой, а также для получения оптимальной структуры многослойного ортотропного ламината, свойства которого должны определяться условиями его работы, может быть использована данная модель. В качестве многослойных структур могут быть использованы различные многослойные оболочки с ограниченным числом слоев. Предложенная модель позволяет про-

вести оптимизацию укладки волокон с целью получения уникальных свойств конечного материала, также спрогнозировать возможную неудовлетворительную конструкцию, если не учесть все физико-механические свойства волокон и матрицы слоя. Физико-механические характеристики каждого слоя могут иметь достаточно значительный разброс для основных однонаправленных композитов. В данной модели можно учитывать разницу в физических процессах, протекающих внутри слоя и рассматривать все моделирующие их взаимодействия, а также рассматривать слой как границу трехмерной области и учитывать различные граничные эффекты, не позволяющие трещине выходить за пределы слоя.

Литература

1. ГОСТ Р 56684 – 2015. Композиты полимерные. Метод определения стойкости к разрушению «сэндвич»-конструкций. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.
2. Адамс Д.Ф. Упругопластическое поведение композитов. Композиционные материалы. М.: Мир, 1978. 250 с.
3. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: НГТУ, 2002. 381 с.
4. Бубенков И.А. Углерод-углеродные композиционные материалы на основе волокнистых наполнителей. Учебное пособие. Москва: МИСИС, 2010. 156 с.
5. Кербер М.Л., Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. М.: ЦОП Профессия, 2014. 592 с.
6. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
7. Мэттьюс Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Техника и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
8. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. 658 с.
9. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 590 с.
11. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. М.: Профессия, 2010. 224 с.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495) 543-34-31 (доб.138),
E-mail: rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Подписано в печать 18.12.2023
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,8
Тираж 500 экз.
Заказ № 95-04
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail: keyneslab@gmail.com
Site: www.n-ko.ru