

Выходит один номер в год

№ 1, 2023

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
А. В. Косых,
д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Радиотехнические устройства
и системы диагностики» ОмГТУ

Редакционная коллегия:
Е. Г. Андреева, доктор технических наук
А. В. Бубнов, доктор технических наук
А. Г. Козлов, доктор технических наук
В. И. Трушляков, доктор технических наук
А. С. Грицай, кандидат технических наук
Е. В. Миронова, кандидат химических наук

Ответственный секретарь
О. И. Бабенко, начальник
научно-аналитического отдела ОмГТУ

Язык публикаций
русский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания в систему
Российского индекса научного цитирования:
705-11/2013 от 20.11.2013

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=41264

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. Г-209
Контактный телефон:
8 (3812) 65-35-36
e-mail: fap_omsk@omgtu.tech
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2023

Подписано в печать 15.06.2023.
Формат 60×84¹/₈. Усл. печ. л. 6,25.
Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе
в типографии ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Тираж 500 экз. Заказ 280.

Е. Г. Андреева, В. А. Молчалин

Генератор псевдослучайных чисел в игровых механиках3

Е. Г. Андреева, А. С. Татевосян, Н. А. Терещенко

Моделирование и расчет высокоскоростного синхронного
двигателя малой мощности с помощью программного
пакета elcut10

Р. Е. Афурин, В. Г. Чуранкин

Перспектива применения лазерных технологий для очистки
колесных пар на железнодорожном транспорте.....15

Т. М. Баязитов, И. В. Никонов

Моделирование мобильной сети четвертого поколения.....21

**Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Ю. О. Бредгауэр,
А. В. Линовский**

Исследование распространения поля температур
вглубь циркониевой заготовки при проволочно-вырезной
электроэрозионной обработке.....25

**Ю. О. Бредгауэр, А. А. Федоров, Н. В. Бобков,
А. В. Линовский**

Моделирование полей течения диэлектрической жидкости
в процессе проволочно-вырезной электроэрозионной
обработки31

**Е. В. Васильев, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман,
С. В. Михайленко**

Реновация многогранных твердосплавных пластин
по задней поверхности.....38

Д. И. Васина, А. Ю. Горшенин

Предварительная подготовка данных для последующего
краткосрочного прогнозирования солнечной электроэнергии..... 42

О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов

Перспективы применения модифицированного
теплоносителя в солнечных коллекторах..... 46

Н. С. Ганин

Электрический привод насосной станции автоцистерны 51

Д. В. Гаранин, А. А. Федоров, В. Г. Чуранкин

Исследование процесса удаления поддерживающих
структур с помощью проволочно-вырезной
электроэрозионной обработки 54

А. Ю. Горшенин, Д. И. Васина

Значение анализа данных в прогнозировании ветроэнергетики 61

А. А. Меньшикова, А. Холматов, И. Шалин

Организация информационно-цифровой среды рабочего пространства сотрудника современного предприятия 66

А. С. Рукавишникова, В. А. Денисенко

Тенденции развития проектирования одежды с помощью искусственного интеллекта 71

А. С. Серобабов, А. Л. Серобабова, Л. А. Денисова

Разработка и верификация программного обеспечения системы принятия врачебных решений 79

Е. Н. Слободина, И. А. Степашкин, Д. В. Коваленко, А. Г. Михайлов

Особенности создания экспериментального стенда для изучения теплообмена в наножидкостях..... 85

А. Е. Шевченко, А. П. Солоненко, А. А. Жуковская

Некоторые характеристики гранул из трикальция фосфата, волластонита и желатина 91

Д. Н. Шлома

Разработка свёрточной нейронной сети для классификации пищевого поведения крупного рогатого скота..... 96

ГЕНЕРАТОР ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ В ИГРОВЫХ МЕХАНИКАХ

PSEUDORANDOM NUMBER GENERATOR IN GAME MECHANICS

Е. Г. Андреева, В. А. Молчалин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. G. Andreeva, V. A. Molchalin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. На рынке игровой индустрии большой процент занимают жанры, для которых генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) является интегральной частью игровых механик. Получение случайных чисел также называют генерацией случайных чисел, что является процессом, который с помощью устройства или программы генерирует последовательность чисел или символов, которая может быть предсказана разумным образом только на основании случайности. В настоящее время случайные числа используются в данных областях предметных областях. Целью настоящей работы является разработка программного алгоритма, программы для исследования двух ГСПЧ – на основе линейного конгруэнтного метода и метода «Вихрь Мерсенна».

Ключевые слова: случайное число, генератор случайных чисел (ГСЧ), генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ), игра, игровая механика, начальное значение (сид) ГСПЧ, Вихрь Мерсенна, линейный конгруэнтный метод, период ГПСЧ.

Abstract. In the gaming industry, a large percentage is occupied by genres for which the pseudo-random number generator (PRNG) is an integral part of game mechanics. Obtaining random numbers is also called random number generation, which is a process that, using a device or program, generates a sequence of numbers or symbols that can be reasonably predicted based on randomness alone. Currently, random numbers are used in these areas of subject areas. The purpose of this work is to develop a software algorithm, a program for studying two PRNGs - based on the linear congruent method and the Mersenne Vortex method.

Keywords: random number, random number generator (RNG), pseudo-random number generator (RNG), game, game mechanics, initial value (sid) of RNG, Mersenne vortex, linear congruent method, RNG period.

I. ВВЕДЕНИЕ

В игровой индустрии ГПСЧ используются повсеместно. Одним из примеров набирающих популярность игровых механик являются лутбоксы, которые представляют собой виртуальный предмет в компьютерных играх, при использовании которого игрок получает случайные виртуальные предметы различной ценности и назначения [1, 5].

Использование ГПСЧ характерно и для так называемых гача-игр (Gacha game) – это жанр компьютерных игр на основе механики гачапона, которая похожа на механику лутбоксов. Возможно название и гача-игра или гача-механика. Термин пришел из Японии, и эти игры достаточно популярны в Китае и Корее. В Японии гачапон – это торговый автомат с игрушками внутри, в котором игрушку можно выбрать случайным образом. В России аналогом гачапона является барабан с шариками в лотерейных механиках. В Японии же была создана первая игра на основе гача-механики – Dragon Collection [6].

Случайности в играх проявляются и в таком жанре игр как ММОППГ. ММОППГ или массовая многопользовательская ролевая онлайн-игра (Massively multiplayer online role-playing game, MMORPG, ММОППГ) – компьютерная игра, в которой жанр ролевых игр совмещается с жанром массовых онлайн-игр.

Одной из ключевых механик ММОППГ является выпадение предметов, согласно определенному шансу, установленному в генераторе псевдослучайных чисел игры. Предметы в ММОППГ являются особенно важной составляющей игрового процесса, что, из-за случайного выпадения этих предметов с растущей редкостью при повышении уровня игры, создало ценность этих предметов для игроков [5].

Разрабатываемый генератор псевдослучайных чисел может применяться в работе многих игровых механик, основанных на этой игровой технологии.

Случайные числа важны и для научной работы. До создания аппаратных генераторов для получения случайных чисел бросались монеты, игрались кости, вынимались шарики с цифрами из ящика. Но из-за механического характера этих методов генерация большого количества достаточно случайных чисел, что важно в статистических исследованиях, требовала много труда и времени. Электронные генераторы случайных чисел на основе электронных компонентов появились в середине прошлого века, например, предложенный А.М. Тьюрингом.

В настоящее время случайные числа используются в предметных областях: социологические и исследования, математическое моделирование при обработке данных и процессов, криптография и информационная безопасность, принятие решений и оптимизация в экспертных системах, теория игр, и наконец, развлечения и игры [1].

Генераторы случайных чисел подразделяются на аппаратные генераторы случайных чисел, которые генерируют случайные числа в зависимости от текущего значения какого-либо атрибута физической среды, который практически сложно смоделировать, и генераторы псевдослучайных чисел, которые генерируют числа, которые выглядят случайными, но на самом деле являются детерминированными и могут быть воспроизведены, если известна математическая модель, на основании которой работает генератор псевдослучайных значений [8].

Числа, генерируемые с помощью этих ГСЧ, всегда являются псевдослучайными (или квазислучайными), то есть каждое последующее сгенерированное число зависит от предыдущего [1]:

$$r_{i+1} = f(r_{i-k+1}, r_{i-k+2}, \dots, r_i).$$

Последовательности, составленные из таких чисел, образуют петли, то есть обязательно существует цикл, повторяющийся бесконечное число раз. Повторяющиеся циклы называются *периодами*. Такие ГСЧ не требуют больших объемов памяти, обладают достаточным быстродействием, однако основной недостаток – цикличность последовательности чисел генератора.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В большинстве своем, используются генераторы псевдослучайных чисел, которые называются алгоритмическими ГСЧ. Генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) – это алгоритм, порождающий последовательность чисел, элементы которой почти независимы друг от друга и подчиняются заданному распределению, которое чаще всего является равномерным. Формирование последовательности случайных чисел ГПСЧ, начинается с определения начального значения (initial value, seed).

ГПСЧ используют для:

- разнообразия природы видео-игры,
- усложнения поведения мобов (нестатичный объект игры, затрудняющий движение игрока) и персонажей,
- генерации уровней,
- усложнения геймплея.

III. ТЕОРИЯ

1. Способы получения начального значения для ГСПЧ

Все генераторы псевдослучайных чисел являются детерминированными, поэтому для того чтобы выдача чисел не повторялась, их состояние надо инициализировать какой-то уникальной последовательностью чисел. Программная инициализация ГПСЧ разрабатывалась на языке C++ в интегрированной среде Visual Studio. Для формирования базы случайных чисел в C++ можно использовать текущее время системы, например, команду `srand(time(NULL))`.

Также, сид (seed – стартовое число при генерации псевдослучайных чисел) можно выставить своими руками, задав какую-нибудь числовую последовательность.

Другим вариантом является класс `random_device` в C++. Этот класс описывает источник случайных чисел и согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 28640-2012 [2] может быть недетерминированным или криптостойким (но это необязательно). В реализации в VisualStudio полученные значения являются недетерминированными и криптостойкими, но производительность ниже, чем у генераторов, созданных на основе механизмов и адаптеров механизмов.

Результаты выполнения `random_device` равномерно распределены в замкнутом диапазоне $[0, 2^{32}]$. В целом, `random_device` используется для получения начальных значений для других генераторов, созданных с помощью механизмов или адаптеров механизмов. На рис. 1, а приведен пример программного использования класса `random_device`.

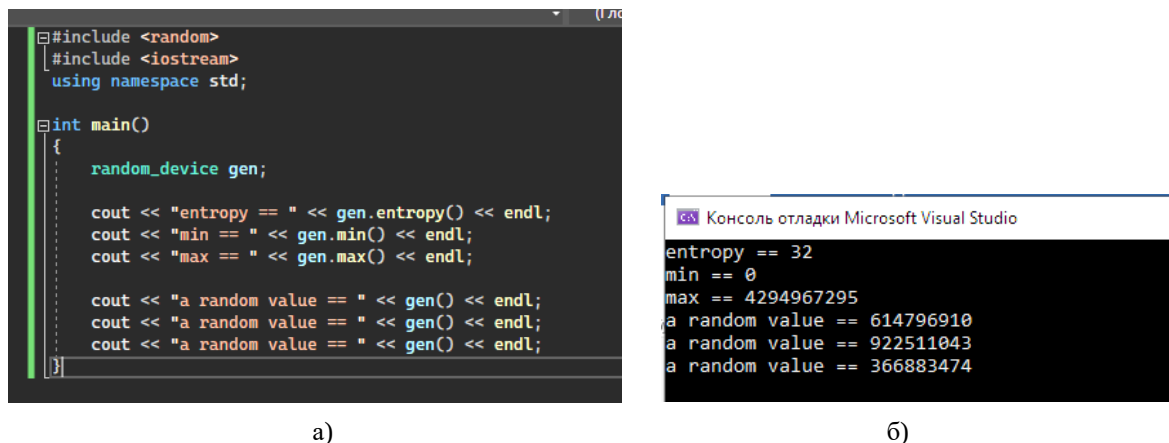


Рис. 1. Пример использования в коде класса `random_device` в C++ (а) и результаты использования кода (б) для генерации сида

На рис. 1,б показан результат работы кода, где `entropy` – это оценка стохастичности источника в битах.

2. Разработка и анализ генераторов псевдослучайных чисел

2.1. Линейный конгруэнтный метод (ЛКМ)

Члены последовательности вычисляются рекуррентно по формуле [1]

$X_{k+1} = (aX_k + c) \bmod m, n \geq 1$ (1) где ключевые целые числа: модуль $m > 0$, множитель $0 \leq a \leq m$, приращение $0 \leq c \leq m$, X_0 – начальное значение или сид, а $\bmod m$ – взятие остатка по модулю некоторого натурального числа m .

```
void LMC(
    int Xo, int m, int a, int c,
    vector<double>& randomNums,
    int noOfRandomNums)
{
    randomNums[0] = Xo;

    for (int i = 1; i < noOfRandomNums; i++) {
        randomNums[i] = ((Xo * a) + c) % m;
        Xo = randomNums[i];
    }
}
```

Рис. 2. Функция, реализующая линейную конгруэнтную последовательность на языке C++

Линейная конгруэнтная последовательность, определенная числами m , a , c и X_0 периодична с периодом, не превышающим m . ЛКМ дает статистически приемлемое распределение псевдослучайных чисел, но не является криптостойким из-за своей предсказуемости [1]. Реализация линейного конгруэнтного метода происходит

на языке C++ (рис. 2), и для нее взяты $X_0 = 0$, где в коде X_0 сохраняется как вектор randomNums, $m = 6075$, $a = 106$, $c = 1283$.

2.2. Вихрь Мерсенна

Вихрь Мерсенна использует свойства простых чисел Мерсенна и обеспечивает быструю генерацию высококачественных по критерию случайности псевдослучайных чисел.

Этот генератор используется во многих играх, среди которых особо примечательна серия игр Pokemon, где в четвертом поколении игр серии используется этот генератор. Из-за своего недостатка в криптостойкости, повсеместном использовании генератора в механиках игры и большом количестве фанатов, это привело к тому что образовался целый пласт игроков, которые создали программы и алгоритмы для манипуляции псевдослучайными числами игры и предсказаниями результатов механик.

Вихрь Мерсенна алгоритмически реализуется двумя основными частями: рекурсивной и заделки.

Необработанные последовательности, генерируемые рекурсией, обладают плохим равномерным распределением на больших размерностях. Чтобы это исправить, используется метод заделки, на выходе которого получается итоговая псевдослучайная последовательность.

```

unsigned long long genrand64_int64(void)
{
    int i;
    unsigned long long x;
    static unsigned long long mag01[2] = { 0ULL, MATRIX_A };

    if (mti >= NN)
    {
        if (mti == NN + 1)
            init_genrand64(5489ULL);

        for (i = 0; i < NN - MM; i++)
        {
            x = (mt[i] & UM) | (mt[i + 1] & LM);
            mt[i] = mt[i + MM] ^ (x >> 1) ^ mag01[(int)(x & 1ULL)];
        }

        for (; i < NN - 1; i++) {
            x = (mt[i] & UM) | (mt[i + 1] & LM);
            mt[i] = mt[i + (MM - NN)] ^ (x >> 1) ^ mag01[(int)(x & 1ULL)];
        }

        x = (mt[NN - 1] & UM) | (mt[0] & LM);
        mt[NN - 1] = mt[MM - 1] ^ (x >> 1) ^ mag01[(int)(x & 1ULL)];

        mti = 0;
    }

    x = mt[mti++];

    x ^= (x >> 29);
    x ^= (x << 17) & 0xD66B5EF5B4DA0000ULL;
    x ^= (x << 37) & 0xFDEDD6BE00000000ULL;
    x ^= (x >> 41);

    return x;
}

```

Рис. 3. Функция ГПСЧ «Вихрь Мерсенна»

В данной работе функция ГПСЧ была создана на языке C++ в 64-разрядной версии генератора. Сам генератор чисел вместе с алгоритмом заделки представлен на рис. 3.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. АНАЛИЗ ГЕНЕРАТОРОВ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

После разработки генераторов нужно удостовериться в их качестве, проанализировав их характеристики. Основные качественные требования к ГПСЧ – это большой период, эффективность, воспроизводимость, насколько близко к случайности выдаются числа. В данной работе анализируются генераторы через список методов [3]:

1. Оценка периода. После анализа периода и работы алгоритмов, будет дана оценка.

2. Скорость работы. Сравнивается скорость работы при генерации 100, а потом 1000 случайных чисел. Эта скорость работы будет считаться с помощью функции clock() и будет измеряться в миллисекундах [4];

3. Гистограмма распределения случайной величины. При построении гистограммы область значений случайной величины (a,b) разбивается на n сегментов, а затем подсчитывается количество попаданий величин в каждый сегмент. Используется MS Excel, где сгенерированные 1000 случайных чисел размещаются на интервале (0,1).

4. Анализ общепринятых недостатков.

5. Вывод по алгоритму.

Линейный конгруэнтный метод.

1. Период $T \leq m$, что очень удобно, и при увеличении периода увеличивается время расчетов.

2. После выполнения кода, были получены результаты:

– скорость генерации 100 чисел для линейного конгруэнтного метода 227 мс;

– скорость генерации 1000 чисел для линейного конгруэнтного метода 2904 мс;

как видно при увеличении количества чисел для генерации, среднее время генерации увеличивается

3. Собрав 1000 чисел была создана гистограмма (рис. 4):

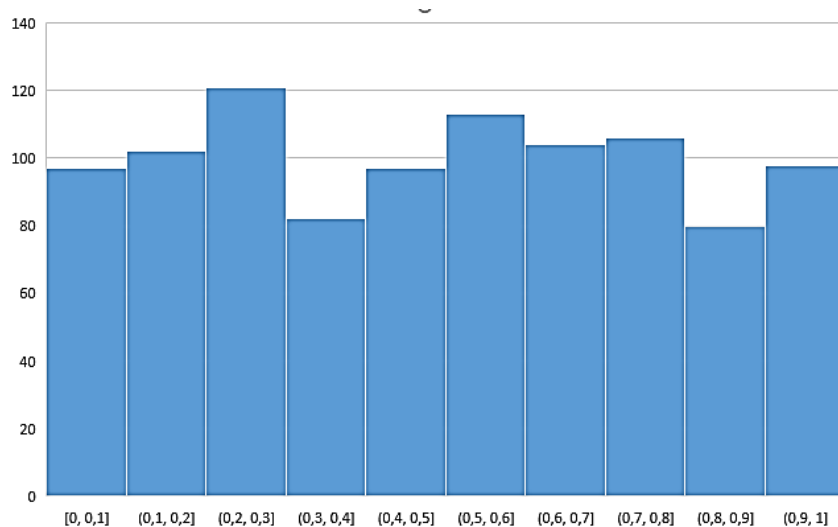


Рис. 4. Гистограмма выпадения случайных чисел
для линейного конгруэнтного метода

На гистограмме видно, что распределение чисел хоть и близко к равномерному, но все же не одинаково случайно.

4. Одним из основных недостатков ЛКМ является наличие операций умножения и деления, из-за чего достаточно простой алгоритм использует много ресурсов. Гистограмма так же показала, что не все биты одинаково случайны.

5. Алгоритм долгое время являлся очень популярным, но все же он является старым и в настоящее время заменен лучшими алгоритмами, которые имеют более высокую скорость или случайность.

Вихрь Мерсенна.

1. Период $T = 2^{19937} - 1$ (для чего и подбирались параметры метода p , w и g так чтоб $p \cdot w - g$ было равно 19937), согласно числам Мерсенна. Размер w матрицы A предпочтительно выбирать равным размеру битового слова для ускорения работы на компьютерах, тем самым задавая диапазон $[0, 2^w - 1]$. Период алгоритма является одним из самых больших среди множества алгоритмов

2. После выполнения кода, были получены результаты:

– скорость генерации 100 чисел для линейного конгруэнтного метода 345 мс;

– скорость генерации 1000 чисел для линейного конгруэнтного метода 2744 мс.

Как видно, хранение битов в памяти позволило увеличить среднюю скорость при выдаче 1000 чисел, т.е. данный

3. Собрав 1000 чисел была создана гистограмма (рис. 5):

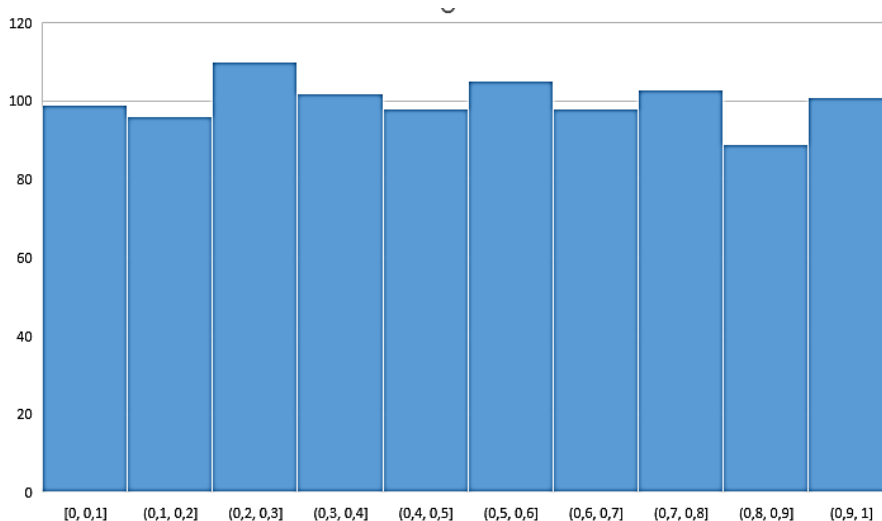


Рис. 4. Гистограмма выпадения случайных чисел для вихря Мерсенна

Распределение является наглядно равномерным, показывая что алгоритм заковки работает и вихрь Мерсенна выдает достаточно случайные числа на каждом интервале.

4. По сравнению с многими новыми алгоритмами вихрь Мерсенна требует относительно много времени на генерацию числа, из-за того свойства, что алгоритм сразу генерирует последовательность, а это не всегда удобно для программ. Также одним из недостатков многие специалисты называют то, что алгоритм излишен для использования в играх из-за огромного размера периода.

5. Вихрь Мерсенна до сих пор является одним из часто используемых алгоритмов, несмотря на свои недостатки, и использовался во множестве популярных играх. Большой период и качество случайности чисел делают его хорошим выбором, если скорость генерации одного числа не так важна.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке алгоритма ГПСЧ необходимо выполнить следующие условия [3, 7]:

- достаточно длинный период, гарантирующий отсутствие закикливания последовательности в пределах решаемой задачи;
- эффективность, т.е. быстрота работы алгоритма и малые затраты памяти;
- желательно одинаковое функционирование на различном оборудовании и операционных системах, т. е. портируемость;

В работе были исследованы два известных алгоритма для генераторов псевдослучайных чисел: линейный конгруэнтный метод и вихрь Мерсенна. Исследования показали, что алгоритм Вихрь Мерсенна показал себя быстрее линейного конгруэнтного метода при генерации большого количества чисел, а также он дает более равномерное распределение, т.е. вихрь Мерсенна выдает достаточно случайные числа на каждом интервале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слеповичев И. И. Генераторы псевдослучайных чисел. Саратов: СГУ, 2017. 117 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2018/07/09/slepovichev_i.i._generatory_psevdosluchaynyh_chisel_2017.pdf (дата обращения: 10.03.2022).
2. ГОСТ Р ИСО 28640-2012. Статистические методы. Генерация случайных чисел. М.: Статинформ, 2014. 40 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096454> (дата обращения: 17.03.2022).

3. Григорьев А. Ю. Методы тестирования генераторов случайных и псевдослучайных последовательностей // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. Электрон. журн. 2017, № 1. С. 22–28. [Электронный ресурс]. URL: <https://ulsu.ru/media/uploads/anako09%40mail.ru/2017/10/14/%D0%93%D1%80%D0%B8%D0%B3%D0%BE%D1%80%D1%8C%D0%B5%D0%B2.pdf> (дата обращения: 14.04.2022).
4. Как найти время работы программы на C++. [Электронный ресурс]. URL: <http://cppstudio.com/post/468/> (дата обращения: 7.04.2022).
5. Что такое ГСЧ? Урок для геймеров. [Электронный ресурс]. URL: <https://gadgets-help.com/razvlecheniia/chto-takoe-gsch-urok-dlia-geimerov/> (дата обращения: 21.04.2022).
6. John Harris How classic games make smart use of random number generation [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gamedeveloper.com/programming/how-classic-games-make-smart-use-of-random-number-generation> (дата обращения: 21.04.2022).
7. Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. [Электронный ресурс]. URL: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-90Ar1.pdf> (дата обращения: 26.04.2022).
8. Кнут Д. Э. Искусство программирования. Получисленные методы. Т. 2. М.: Изд. дом «Вильямс», 2013. 832 с. [Электронный ресурс]. URL: https://www.williamspublishing.com/Books/sci_Knuth2.html (дата обращения: 11.02.2022).

УДК 621.313.17:519.876.5

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-10-14

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ELCUT

MODELING AND CALCULATION OF A LOW-POWER HIGH-SPEED SYNCHRONOUS MOTOR USING THE ELCUT SOFTWARE

Е. Г. Андреева, А. С. Татевосян, Н. А. Терещенко

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. G. Andreeva, A. S. Tatevosyan, N. A. Tereschenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования конструкции и расчета характеристик высокоскоростного синхронного двигателя с постоянными магнитами малой мощности на этапе первоначальной стадии его проектирования согласно техническому заданию. Приведены результаты вычислительных экспериментов. Расчеты проводились в программном пакете Elcut (профессиональный). Проведена оценка структуры геометрической модели и материалов, заданных при имитационном моделировании, и использованных при физическом моделировании конструкции высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ). Получены рекомендации для уточнения имитационной модели следующего этапа проектирования двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель малой мощности, имитационное моделирование, программный пакет Elcut, геометрическая модель.

Abstract. The article discusses the issues of modeling the design and calculating the characteristics of a high-speed synchronous motor with low-power permanent magnets at the initial stage of its design in accordance with the terms of reference. The results of computational experiments are given. Calculations were carried out in the Elcut software package (professional). The structure of the geometric model and materials specified in the simulation modeling and used in the physical modeling of the design of the high-speed synchronous low-power motor with permanent magnets (VDMMPM) were assessed. Recommendations have been obtained to refine the simulation model of the next stage of engine design.

Keywords: low power synchronous motor, simulation simulation, Elcut software package, geometric model.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область применения синхронных электродвигателей весьма обширна [1]. Их используют для поддержания стабильного уровня напряжения (источники реактивной мощности) [2], для вращения установок (станки, компрессоры, вентиляторы) [3–4], в качестве привода для летательных аппаратов [5], а также для других целей. Преимущество данного вида двигателя обусловлено возможностью сохранять постоянную частоту вращения, они обладают более высоким КПД (коэффициент полезного действия), высоким вращающим моментом, имеют большую мощность (до 20000 кВт), сохраняя при этом компактную форму. Для снижения стоимости и улучшения характеристик синхронного двигателя в конструкции используются постоянные магниты [6]. Такие синхронные двигатели часто можно встретить в высокоскоростных конструкциях, благодаря их высокой производительности и удельной мощности [7]. Для достижения наилучших показателей проведен сравнительный анализ конструкций двигателей по их электромагнитным, механическим и тепловым характеристикам [8]. Авторы статьи [9] исследуют вращающий момент синхронных машин с постоянными магнитами из магнитомягких композитов на полимерной основе, которые позволяют снизить затраты на производство машины, уменьшают магнитную проницаемость стали и уровень ее насыщения. При решении задач,

связанных с расчетом оптимизации конструкции, для моделирования используют программные пакеты, например, ANSYS Maxwell [10], Elcut [11]. Таким образом, актуальность данного исследования подтверждается высоким спросом на производство синхронных двигателей малой мощности с постоянными магнитами, а также заинтересованностью научных коллективов в решении задач повышения надежности, упрощения конструкции и пуска двигателя.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные размеры геометрической модели по техническому заданию для проектирования высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ): внешний диаметр корпуса $d = 53$ мм, толщина $l = 20$ мм. Электрические характеристики: потребляемая мощность $P_1 = 20$ Вт, напряжение питания 24 В от источника постоянного тока, потребляемый ток $I_1 = 1$ А, пусковой ток $I_n = 3$ А. Конструкция моделируемого синхронного двигателя – обращенная. Ротор двигателя внешний и вращается вместе с рабочим механизмом с частотой вращения 6000 об/мин, статор неподвижен и находится внутри ротора. Ротор является индуктором, т.е. создает основной магнитный поток, и представляет собой корпус в виде стального проводящего стакана вместе с гибким магнитопластом. Статор имеет явнополюсную конструкцию из шихтованной стали с четырьмя полюсами и является якорем. На обмотку якоря через частотный преобразователь подаются синусоидальное напряжение и ток частотой 200 Гц (амплитудное значение напряжения – 24 В) от источника постоянного тока.

III. ТЕОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На предварительном этапе – проектирование геометрии конструкции синхронного двигателя (ВСДММПМ) и исследование силовых характеристик магнитного поля проводилось на плоской упрощенной геометрической распределенной модели двигателя в декартовой и полярной системах координат с помощью программного пакета инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) – Elcut (профессиональный). На этом этапе моделирования и расчета использовался решатель – «Магнитостатическое поле» для некоторого фиксированного момента времени, когда потребляемый ток равен $I_1 = 1$ А. Приняты следующие условия при решении магнитостатической задачи: плотность тока медной обмотки статора, которая равномерно распределена по сечению обмотки, $J = 10$ А/мм²; относительная магнитная проницаемость стали $\mu_{ст} = 1000 = \text{const}$; относительные магнитные проницаемости меди μ_m и воздуха μ_v равны 1; коэрцитивная сила магнитопласта 955 кА/м. На рис. 1, а представлена геометрическая модель синхронного двигателя, число узлов триангуляционной сети 100788. На рис. 1, б приведена картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции.

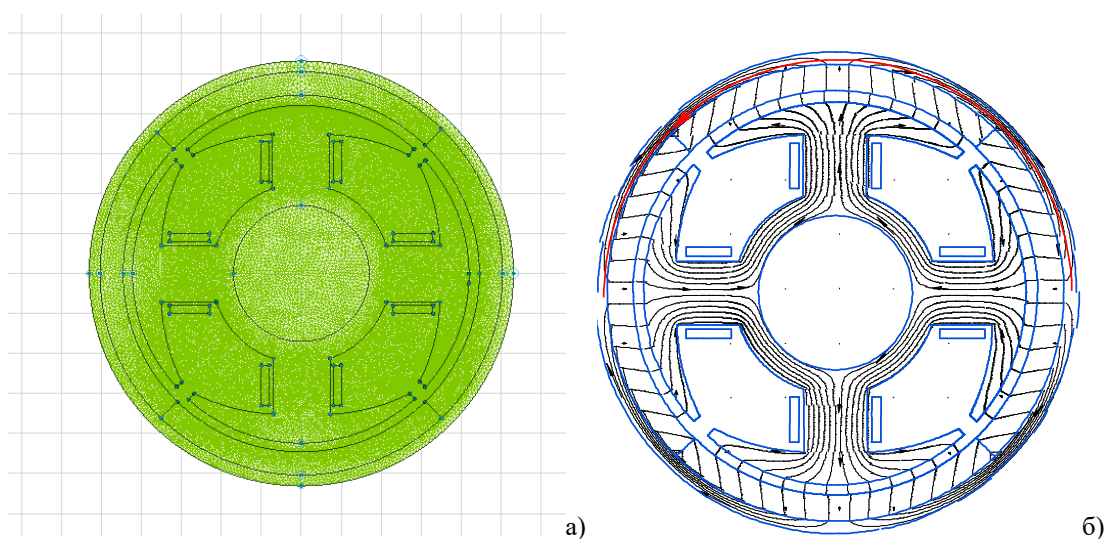


Рис. 1. Геометрическая модель (а) и картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции В (б) на предварительном этапе моделирования синхронного двигателя (ВСДММПМ)

Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий, указанных красным цветом, например, на рис. 1, б (значение результирующего вектора магнитной индукции и составляющих по осям r , Θ) показано на рис. 2, а, б.

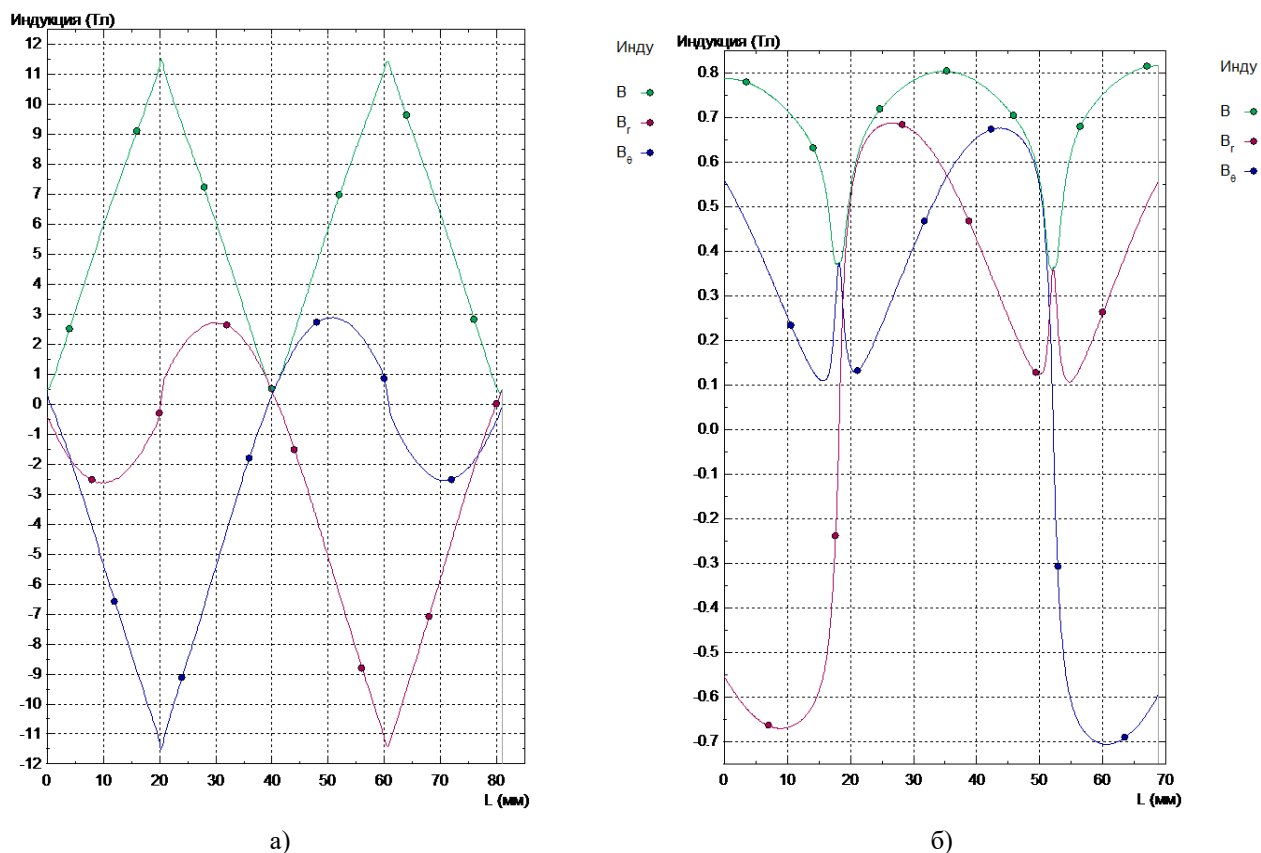


Рис. 2. Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий указанных красным цветом в корпусе-стакане (а), в воздушном зазоре (б) на предварительном этапе моделирования синхронного двигателя (ВСДММПМ)

Итоговая таблица максимальных значений результирующего вектора магнитной индукции магнитного поля обмотки статора и магнита ротора для магнитоэстатической задачи приведены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Моделируемая среда	$B_{\max}$, Тл
В корпусе-стакане	11,5
В воздушном зазоре	0,8
В продольном сечении полюса	3,18
В поперечном сечении полюса	3,6

На следующем этапе моделирования конструкции синхронного двигателя (ВСДММПМ) и исследования силовых характеристик магнитного поля уточнялись геометрия и условия имитационного моделирования и расчета двигателя. На этом этапе исследовалась нелинейная магнитоэстатическая задача, т.е. учитывалась кривая намагничивания стали, а именно электротехнической стали 2412. На рисунке 3,а представлена геометрическая модель синхронного двигателя, число узлов триангуляционной сети 68898. На рисунке 3, б приведена картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции.

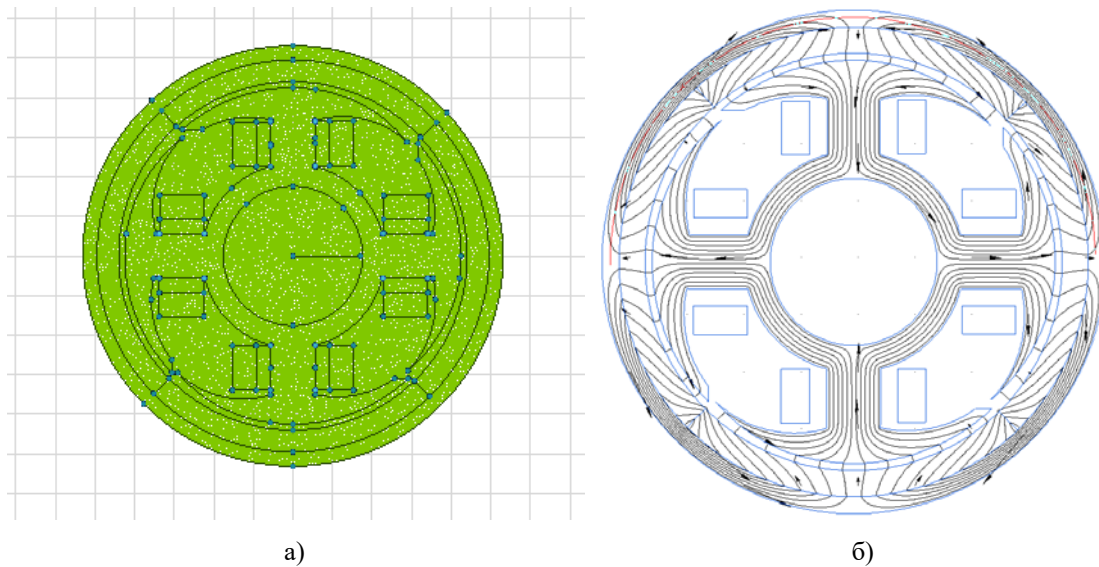


Рис. 3. Геометрическая модель синхронного двигателя (а) и картина распределения силовых линий вектора магнитной индукции B (б) на этапе уточнения модели синхронного двигателя (ВСДММПМ)

Распределение вектора магнитной индукции (Тл) на этапе уточнения модели синхронного двигателя показано на рис. 4, а, б.

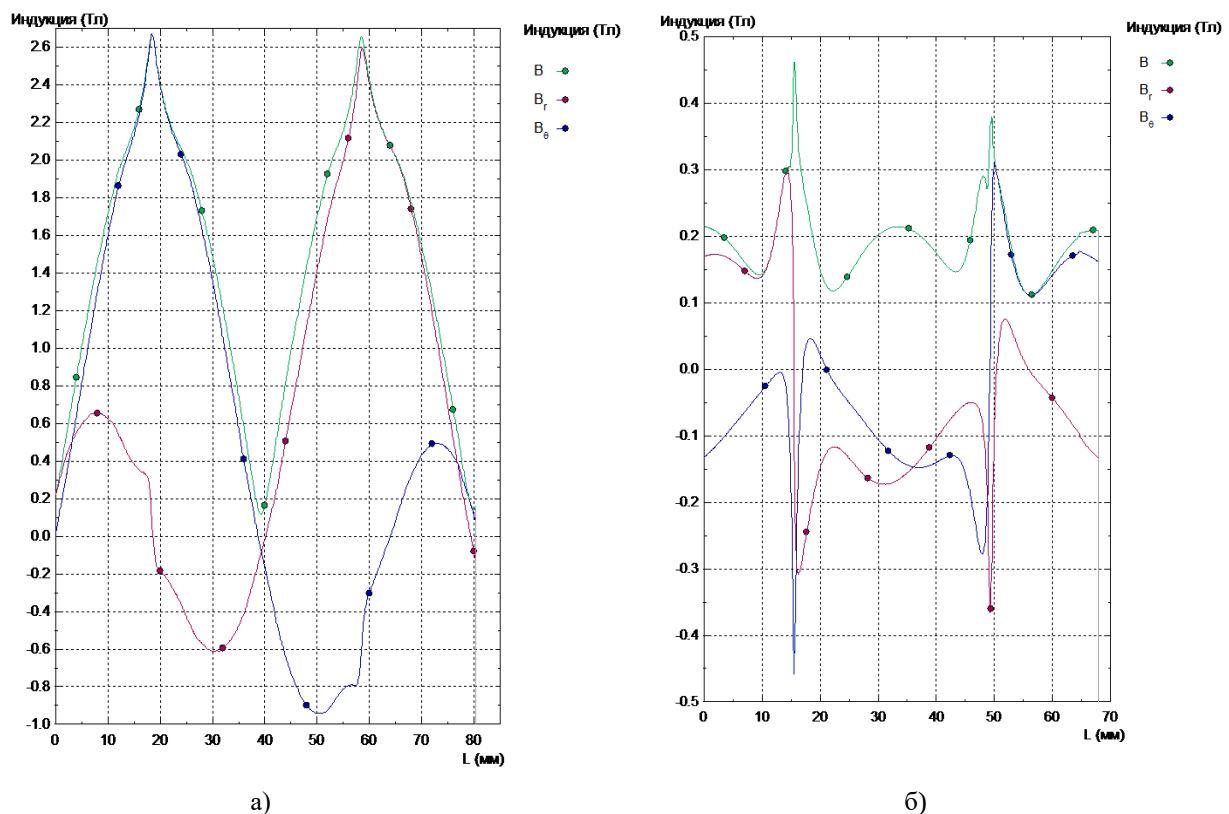


Рис. 4. Распределение вектора магнитной индукции (Тл) вдоль линий указанных красным цветом в корпусе-статоре (а), в воздушном зазоре (б) на этапе уточнения модели синхронного двигателя

Итоговая таблица максимальных значений результирующего вектора магнитной индукции магнитного поля обмотки статора и магнита ротора для магнитоэстатической задачи приведены в Табл. II .

ТАБЛИЦА II
МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Моделируемая среда	B max, Тл
В корпусе-стакане	2,65
В воздушном зазоре	0,46
В магнитоласте	1,02
В поперечном сечении полюса	1,05

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 3,а приведена уточненная по сравнению с рис. 1,а геометрическая модель высокоскоростного синхронного двигателя малой мощности с постоянными магнитами (ВСДММПМ). Кроме того, во второй модели маломощного высокоскоростного синхронного двигателя были учтены магнитные свойства стали марки 2412, т.е. кривая намагничивания, и использовался решатель пакета Elcut «Нелинейная задача магнитостатики». Сравнение результатов, полученных с помощью решателя «Магнитостатическое поле» и приведенные в Табл. I, с результатами Табл. II (решатель «Нелинейная задача магнитостатики») показало, что уточнение геометрии модели и учет нелинейных магнитных характеристик электротехнической стали повышает точность расчетов силовых характеристик магнитного поля синхронного двигателя (ВСДММПМ) более, чем на 100 %. Точность имеется ввиду в сравнении с данными паспортов и прайс-листов, приведенных на сайтах производителей схожих типов двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырин П. А., Макаров Л. Н. Электромашиностроение в России // Электричество. 2022. № 11. С. 4–12.
2. Загуменов, С. К. Способы компенсации реактивной мощности // Наука молодых – будущее России : сборник научных статей 7-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2022 года / Р. Том 5. Курск: Юго-Западный государственный университет. 2022. С. 309–312.
3. Alberti L., Berardi G. Design of a low power synchronous motor for high efficiency applications // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE. 2018. P. 677–682.
4. Башков А. А., Колдаев А. И., Любичский М. В. К вопросу о применении синхронных машин на постоянных магнитах для собственных нужд ГЭС // Повышение эффективности процессов производства, распределения и потребления электроэнергии для устойчивого развития мировой энергетики. 2018. С. 23–26.
5. Аганов В. В. Электрические приводы на летательных аппаратах // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. 2022. С. 168–172.
6. Таначев Г. П., Корнилов В. Ю. Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика. 2022. С. 575–578.
7. Tenconi A., Vaschetto S., Vigliani A. Electrical machines for high-speed applications: Design considerations and tradeoffs // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 61, no. 6. Pp. 3022–3029.
8. Neethu S., Nikam S. P., Fernandes B. G., Pal S. and Wankhede A. K. Radial-and Axial-Flux Synchronous Motors for High-Speed Low-Power Applications // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). IEEE. 2018. P. 1–4.
9. Hieke S., Leidhold R. Torque Capabilities of Permanent Magnet Synchronous Machines Made Up of Polymer-Bonded Soft Magnetic Composites // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE. 2018. P. 297–301.
10. He C., Wu T. Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 94–100.
11. Татевосян А. А., Андреева Е. Г. Разработка, моделирование и экспериментальное исследование синхронного генератора с постоянными магнитами // Промышленная энергетика. 2019. № 4. С. 20–28.

УДК 621.373.8

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-15-20

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ КОЛЕСНЫХ ПАР НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

THE PROSPECT OF USING LASER TECHNOLOGIES FOR CLEANING WHEELSETS IN RAILWAY TRANSPORT

Р. Е. Афури¹, В. Г. Чуранкин²

¹ООО «Научно-производственный центр промышленных технологий», г. Омск, Россия

²Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

R. E. Afurin¹, V. G. Churankin²

¹Limited liability company «Scientific and Production Center of Industrial Technologies», Omsk, Russia

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения лазерных технологий для очистки загрязненных поверхностей колесных пар (КП) железнодорожного транспорта для улучшения их состояния и обеспечения их подготовки к дефектоскопии и обточке с применением лазерного оборудования.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, лазер, лазерное оборудование, лазерная очистка, механическая очистка, дробеструйная очистка деталей, лазерная очистка, совершенствование технологии лазером, колесные пары железнодорожного транспорта.

Abstract. The article discusses a promising method of laser treatment of contaminated surfaces of wheel sets (WS) of railway transport to ensure their preparation for flaw detection and turning using laser equipment.

Keywords: railway transport, laser, laser equipment, laser cleaning, mechanical cleaning, shot blasting of parts, laser cleaning, laser technology improvement, railway wheel pairs.

I. ВВЕДЕНИЕ

Колесные пары железнодорожного подвижного состава считаются один из главных компонентов ходовой части, КП подвергаются значительным нагрузкам и изнашиванию, что может привести к повреждениям и снижению производительности поезда, от технического состояния и исправности которого зависит безопасность движения, надежность вагонов в целом. Для обеспечения безопасности и эффективности движения поездов необходимо регулярно проводить техническое обслуживание колесных пар. Одним из важных этапов является очистка колесных пар от загрязнений и коррозии.

Очистка колесных пар также является важной частью технического обслуживания железнодорожного транспорта, которая помогает улучшить безопасность и надежность работы поездов. Перед любым видом ремонта, колесная пара подвергается очистке от краски, грязи и ржавчины. Очистка обеспечивает подготовку поверхностей колесных пар для выполнения дефектоскопии и обработки их в процессе ремонта. Очистка и осмотр осуществляется после выкатки колесных пар из-под тележки в обмывочном отделении или на специальной площадке.

Загрязнения колесной пары вагонов могут быть различными и зависят от условий эксплуатации. Основными видами загрязнений являются:

1. Грязь и пыль, которые накапливаются на поверхности колесной пары в процессе движения по дороге.
2. Ржавчина, которая образуется на металлической поверхности колесной пары в результате воздействия влаги и кислорода.

3. Масла и жировые отложения, которые могут появляться на поверхности колесной пары в результате работы механизмов и систем смазки.

4. Остатки тормозных накладок и абразивных материалов, которые могут оставаться на поверхности колесной пары после торможения.

5. Загрязнения от железнодорожных путей, такие как камни, песок, гравий и т. д.

6. Химические загрязнения, которые могут попадать на поверхность колесной пары из окружающей среды.

Все эти загрязнения могут приводить к ускоренному износу колесной пары и повышенному расходу топлива. Поэтому очистка и защита поверхности колесной пары являются важными задачами для обеспечения безопасности и эффективности работы железнодорожного транспорта.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И СРАВНЕНИЯ ЕЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ

На долю очистных работ приходится не менее 5-8 % общей трудоемкости ремонта в депо. Очистка поверхности КП от загрязнений и ржавчин выполняется до момента, когда производится визуальный контроль и дефектоскопия для контроля поверхности.

После очистки колесных пар проводится дополнительная проверка на наличие повреждений и износа. Если обнаруживаются какие-либо дефекты, то они устраняются или заменяются новыми деталями.

Существует несколько методов очистки КП:

- Механический;
- Физико-химический;
- Криогенный бластинг.

Механический способ применяется при визуальном освидетельствовании КП, при других способах не гарантировано попадание моющей жидкости внутрь роликовой буксы, даже при постановке защитного кожуха на лабиринтное уплотнение. При полном освидетельствовании механическим способом применяется, как дополнительный к другим способам, для удаления не отслаивающихся загрязнений. При механической очистке есть некоторые затруднения по выявлению дефектов, трещин на ответственных деталях или узлах, а также есть вероятность повреждения очищаемой поверхности.

Физико-химический способ – основан на использовании активных моющих растворов и широко применяется в струйных и мониторных моечных машинах в сочетании с методом гидродинамической очистки. Для обмывки колесных пар применяются моечные машины нескольких типов, в которых используется моющие растворы с последующим ополаскиванием или горячая, либо холодная вода под высоким давлением струи (для мойки колесных пар с буксами), без моющих растворов. При данном методе используются токсичные растворы, что требует создания условия для защиты обслуживающего персонала, и необходима очистка растворов от грязи, строгое соблюдение техники безопасности.

Криогенный бластинг – это метод очистки поверхностей, использующий сжиженный газ (обычно азот или углекислый газ) для создания высокого давления и температуры, которые затем направляются на поверхность, чтобы удалить загрязнения, ржавчину и другие дефекты. Этот метод может быть использован для очистки колесных пар поездов, что позволяет быстро и эффективно удалять накопившийся на них грязь и ржавчину. Криогенный бластинг также может быть использован для удаления краски и других покрытий с поверхностей колесных пар.

Однако, как и любой другой метод технического обслуживания, криогенный бластинг имеет свои ограничения и может не подходить для всех типов повреждений или материалов. Поэтому, перед использованием этого метода необходимо провести тщательную оценку состояния колесных пар и выбрать оптимальный подход к их очистке и обслуживанию.

Лазерные технологии могут быть применены при очистке колесных пар железнодорожного транспорта с целью улучшения их состояния и продления срока службы, а также чистовая обработка поверхности улучшает показания при контроле визуальном и методом проверки дефектоскопии. Очистка колесных пар является важным процессом, так как на них накапливаются грязь, пыль, масла, жировые отложения и другие загрязнения, которые могут привести к снижению сцепления колес с рельсами, увеличению износа и повреждений ко-

лесных пар. Защита от коррозии колесных пар производится с помощью специальных красок и методов, которые обеспечивают высокую стойкость покрытия и защиту от коррозии.

Первым этапом процесса является подготовка поверхности. Колесную пару тщательно очищают от грязи, пыли, ржавчины и старого покрытия. Для этого используются специальные щетки, шлифовальные материалы и растворители. Коррозия колесных пар является одной из основных проблем в эксплуатации железнодорожного транспорта. Коррозия может привести к повреждению металла и снижению надежности и безопасности вагонов. Для защиты от коррозии колесной пары применяются различные методы, в том числе и специальные составы, которые наносятся на поверхность после очистки. Эти составы обладают высокой адгезией к металлу и создают защитную пленку, которая предотвращает проникновение влаги и кислорода на поверхность металла. Также для защиты от коррозии колесной пары могут применяться антикоррозионные покрытия, которые наносятся на поверхность металла и обеспечивают долговременную защиту от коррозии. Важно отметить, что защита от коррозии колесной пары является необходимой процедурой при обслуживании вагонов и позволяет увеличить срок их службы и обеспечить безопасность и надежность работы железнодорожного транспорта.

Для более эффективной очистки и защиты колесной пары вагонов предлагается очистка лазерным оборудованием. Этот метод позволяет снять лакокрасочные покрытия с поверхности колесной пары без повреждения металла и без использования химических растворов. Лазерная очистка осуществляется с помощью специального оборудования, которое генерирует лазерный луч высокой энергии. Лазерный луч позволяет удалить загрязнения с поверхности колесной пары, в том числе и ржавчину, масла и жировые отложения, остатки тормозных накладок и другие загрязнения. После очистки поверхность колесной пары обрабатывается специальными составами для защиты от коррозии и увеличения срока службы. Лазерная очистка является более эффективным и экологически чистым методом очистки колесной пары, который позволяет снизить расходы на обслуживание вагонов и повысить их безопасность и надежность.



Рис. 1. Колесные пары железнодорожного транспорта

Колесные пары, рисунок 1, относятся к ходовым частям и являются одним из ответственных элементов вагона. Они предназначены для направления движения вагона по рельсовому пути и восприятия всех нагрузок, передающихся от вагона на рельсы при их вращении. Работая в сложных условиях нагружения, колёсные пары должны обеспечивать высокую надёжность, так как от них во многом зависит безопасность движения поездов.

К колесным парам предъявляют особые, повышенные требования Госстандарта, Правила технической эксплуатации железных дорог, Инструкция по освидетельствованию, ремонту и формированию вагонных колёсных пар, а также другие нормативные документы при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Конструкция и техническое состояние колёсных пар оказывают влияние на плавность хода, величину сил, возникающих при взаимодействии вагона и пути, и сопротивление движению.

Колёсные пары за время своей службы подвергаются осмотру под вагоном, осмотр включает в себя проверку наличия трещин, износа и других повреждений. Если обнаруживаются какие-либо повреждения, колесные пары заменяются или ремонтируются.

Для своевременного выявления дефектов и принятия мер безопасности железнодорожного транспорта, применяется несколько видов (методов) неразрушающего контроля, оборудование очистки КП должно обеспечить хорошо очищенную поверхность, для достоверного выявления дефектов КП.

Один из таких методов – магнитопорошковый контроль. Он используется для обнаружения трещин и других дефектов на металлических поверхностях. В процессе контроля на поверхность наносится магнитопорошок, который затем распределяется по поверхности. При наличии трещин или других дефектов, магнитопорошок скапливается в этих местах, что позволяет обнаружить их.

Еще один метод – ультразвуковой контроль. Он используется для обнаружения трещин, включений и других дефектов внутри материала. В процессе контроля на поверхность наносится гель, а затем на нее наводятся ультразвуковые волны. Если в материале есть дефекты, то ультразвуковые волны отражаются от них и регистрируются датчиками. Также используются методы визуального контроля, рентгенографии, электромагнитного контроля и другие.

При механической обработке поверхности КП абразив может заполировать скрытые поверхностные дефекты загрязнения, поэтому перед проведением контроля необходимо провести тщательную очистку поверхности от загрязнений и ржавчины. Также важно выбрать правильный метод контроля в зависимости от типа материала и типа дефектов, которые необходимо обнаружить.

Так же при очистке механическим способом приходится очищать труднодоступные места вручную, особенно для неровных поверхностей, с изгибами и углублениями. Это экономически затратно и трудоемко.

В настоящее время технологии лазерной очистки поверхности металла перспективны и лазер заменяет традиционные методы промышленной очистки, такие как механическая, химическая, обработка дробью и химикатами создающие повреждение поверхности, а также необходимая постоянная замена зачистных дисков и химические вещества для комплексов очисток КП.

III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Лазерная очистка позволяет удалить загрязнения и ржавчину с поверхности металла без повреждения самого материала. Это достигается благодаря использованию лазерного луча, который нагревает загрязнения до высокой температуры, что приводит к их испарению или разрушению, а затем они удаляются с поверхности при помощи специального вакуумного оборудования. Лазерная очистка также позволяет проводить контроль качества поверхности металла после очистки, что важно для обнаружения дефектов и предотвращения аварий на железнодорожном транспорте.

Таким образом, использование лазерной очистки поверхности металла является перспективным и эффективным методом, который позволяет обеспечить безопасность железнодорожного транспорта и улучшить качество проводимых работ.

Принцип действия этого лазерного метода для удаления ржавчины и других технических загрязнений заключается в том, что лазерный луч направляется на поверхность колесной пары и создает высокую температуру, которая позволяет удалить загрязнения без повреждения металла. Этот метод является более эффективным и экономичным, чем традиционные методы очистки, такие как пескоструйная обработка или химическая очистка. Кроме того, он не оставляет за собой отходов и не загрязняет окружающую среду.

Физический принцип можно кратко описать следующим образом, луч лазерного оборудования поглощается загрязненным слоем на обрабатываемой поверхности. В результате поглощения большой энергии образуется быстро расширяющаяся плазма (высокоионизированный нестабильный газ) и возникают ударные волны. Ударная волна превращает загрязняющие вещества во фрагменты и удаляет их. Ширина светового импульса должна быть достаточно короткой, чтобы избежать накопления тепла, разрушающего обрабатываемую поверхность.

При усовершенствовании конструкции с лазерным оборудованием в конструкции будут существенные преимущества. Лазерная обработка позволяет достичь более высокой точности и скорости обработки, а также более глубокого проникновения луча в материал. Кроме того, лазерный процесс более экономичен и экологически безопасен, поскольку не требует использования химических растворов и других опасных веществ. Также возможно управление лазерным процессом с помощью компьютерного программного обеспечения, что позволяет достигать более высокой степени автоматизации и повторяемости процесса.

Высокая эффективность и высокий уровень обработки колесной пары. При очистке лазером пользователь не контролирует качество процедуры, как при абразивной обработке производится доработка абразивном вручную, поэтому возможность допущения ошибки исключается. Простота в эксплуатации.

Минусом внедрения лазерного оборудования в очистке колесной пары можно назвать стоимость оборудования и его обслуживания. Кроме того, лазерная очистка может быть неэффективна при удалении некоторых видов загрязнений, таких как масла или смазки, которые могут требовать дополнительной обработки. Также необходимо учитывать возможные опасности для здоровья работников, связанные с использованием лазерного излучения. В целом, необходимо проводить тщательный анализ затрат и выгод от внедрения лазерной очистки перед ее применением.

Но высокотехнологичные лазерные системы окупаются за год при эксплуатации средней интенсивности. Защита от лазерных излучений послужит конструктив для очистки КП, где работник будет вне зоны действия лазерного излучения.

IV. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВЫ ЛАЗЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Были проведены исследования перспективы лазерного оборудования, с применением в очистке колесных пар железнодорожного транспорта, сравнение с другими методами очистки колесных пар, экономическая эффективность, экологические аспекты лазерной обработки и методы очистки поверхностей с использованием лазерных технологий, параметры и качество обработки.

Лазерная очистка – это процесс удаления загрязнений, покрытий, ржавчины и других поверхностных слоев с помощью лазерного излучения. Существует несколько методов лазерной очистки, включая абляцию, фотохимическую реакцию и фототермическую реакцию. Воздействие лазерного импульса на загрязненную металлическую поверхность. В большинстве случаев поверхность металла загрязнена неметаллическими веществами, такими как ржавчина, оксидные пленки, масло и остатки СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость). Лазерный импульс, попадая на загрязненную поверхность, проходит сквозь загрязнение без ослабления и поглощается в приповерхностном слое материала.

Параметры лазерной очистки и их влияние на качество обработки и оптимизация процессов обработки и очистки материалов с использованием лазерной технологии. Параметры лазерной очистки, такие как мощность лазера, длина волны, скорость сканирования и дистанция между лазером и поверхностью, могут оказывать значительное влияние на качество обработки. Например, более высокая мощность лазера может ускорить процесс очистки, но может также повредить поверхность материала.

Исследованы экологические аспекты лазерной обработки и ее сравнение с другими методами очистки по степени воздействия на окружающую среду. В результате исследования было установлено, что лазерная технология является эффективным и экологически безопасным методом очистки поверхностей, который может быть применен в различных отраслях промышленности.

Экономическая эффективность в сравнении с другими методами очистки может быть более дорогостоящей, чем некоторые другие методы очистки, однако это может быть компенсировано более высокой эффективностью и точностью. Кроме того, лазерная очистка может сэкономить время и снизить затраты на обслуживание и ремонт оборудования.

Для оптимизации процессов обработки и очистки материалов с использованием лазерной технологии следует учитывать параметры лазера, тип материала и требуемый уровень очистки. Также следует убедиться в правильном обслуживании и настройке оборудования для достижения наилучшего качества обработки.

Проведение исследований перспективы лазерного оборудования может помочь определить потенциальные области применения лазерной технологии, а также разработать новые методы и приложения для лазерной обработки. Также следует учитывать возможные ограничения и проблемы при использовании лазерного оборудования.

V. ВЫВОД И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение лазерного оборудования в технологический цикл очистки колесной пары увеличит скорость очистки, малая трудоемкость процесса, загрязнения просто испаряются, работать только с вытяжными устройствами. В сравнении с химическим способом очистки колесных пар: при химической очистке поверхности ко-

лесной пары, прежде всего химическая очистка не безопасна, в ней задействованы сильные реагенты и кислоты, которые могут повредить сам металл.

Очистка материала лазерным оборудованием идет на заданную глубину, сама поверхность металла не травмируется и не повреждается как при абразивной чистке, хорошая скорость обработки.

Кроме того, лазерная очистка позволяет удалить различные загрязнения, такие как ржавчина, краска, масла, сажа и другие, что делает ее универсальным методом очистки. Еще одним преимуществом является отсутствие необходимости в химических растворах или других вредных веществах, что делает процесс более экологически чистым.

Однако стоит учитывать, что лазерная очистка может быть дороже по сравнению с другими методами очистки. Кроме того, для достижения наилучших результатов необходимо правильно выбрать параметры лазерного оборудования и настроить его на определенный материал.

Таким образом, использование лазерного оборудования для очистки колесной пары имеет множество преимуществ, но требует соблюдения мер безопасности и правильной настройки оборудования.

Недостатки лазерного оборудования и применение на очистке КП – это высокая стоимость оборудования. Лазерная оптика со временем может загрязниться или повредиться. Лазерному оборудованию так же необходима охлаждающая жидкость. Лазерное оборудование в долгосрочной перспективе рентабельно, не требует частой замены абразивных материалов и химических веществ, менее трудоемко.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова М. М., Карпов А. В. Методы очистки колесной пары подвижного состава // Молодой ученый. 2017. № 10 (144).
2. Кучеренко В. К., Подоляк С. И. Энергетическое оборудование вагоноремонтных предприятий: методические указания к самостоятельной (контрольной) работе / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2011. 18 с.
3. Вейко В. П., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н., Шахно Е. А. Лазерная очистка поверхностей металлов: Физические процессы и применение // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 30–36.
4. Блог Станкофф.RU. Лазерная очистка металла: принцип, характеристики и применение. URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/524?ysclid=la50l0ds23506745009>.
5. Вейко В. П., Кишалов А. А., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 3 (79). С. 50–54.
6. Xing Li and Yingchun Guan. Real-Time Monitoring of Laser Cleaning for Hot-Rolled Stainless Steel by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy // Metals. 2021. Vol. 11.

УДК 621.396

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-21-24

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОБИЛЬНОЙ СЕТИ ЧЕТВЕРТОГО ПОКОЛЕНИЯ

SIMULATION OF THE FOURTH GENERATION MOBILE NETWORK

Т. М. Баязитов, И. В. Никонов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

T. M. Bayazitov, I. V. Nikonov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В работе рассмотрены основные принципы реализации существующих технологий мобильных беспроводных сетей. Проведено моделирование мобильных сетей четвертого поколения с применением пакетов прикладных программ. Рассмотрены современные программные комплексы, применяемые для моделирования реальных сетей.

Ключевые слова: стандарты связи, мобильная сеть, мобильная станция, базовая станция, программный комплекс.

Abstract. The paper discusses the basic principles of the implementation of existing technologies of mobile wireless networks. Modeling of mobile networks of the fourth generation using application software packages is carried out. Modern software complexes used for modeling real networks are considered.

Keywords: communication standards, mobile network, mobile station, base station, software package.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные в последние десятилетия стандарты сетей беспроводной мобильной связи и передачи информации – это стандарт аналоговой связи (1G) и стандарты цифровых видов мобильной связи (2G, 3G, 4G, 5G). Для сетей 6G пока сформулированы лишь общие положения и рекомендации.

Основные положения существующих стандартов следующие [1]:

- в аналоговых сетях стандарта 1G предусмотрена возможность только для голосовой связи. Недостатки сетей 1G: низкая емкость, отсутствие шифрования, отсутствие эффективных методов борьбы с замиранием сигнала при передвижении абонента;

- в цифровых сетях стандарта 2G (GSM, GPRS, EDGE) предусмотрена возможность передачи цифровых данных, шифрование и высокая емкость сети, а также лучшая помехоустойчивость. В стандарте GPRS появилась возможность передавать данные другому устройству в сети интернет и при организации спутниковой связи, а в стандарте EDGE была применена новая система кодирования, позволившая получить большую пиковую скорость передачи данных;

- в цифровых сетях стандарта 3G (CDMA2000, UMTS (или W-CDMA), HSPA, HSPA+) предусмотрена пакетная передача данных. Сеть 3G позволяет устраивать видеоконференции, просматривать кино, видео и другой контент. В сети третьего поколения есть одно весьма важное преимущество – это улучшенная защита от обрывов мобильной связи при движении абонента. В последней версии HSPA+ присутствуют сложные модуляции 16QAM и 64QAM, а также появилась технология MIMO, которая там использовалась только для скачивания при пиковой скорости до 42 Мбит/с;

- стандарты для цифровых сетей 4G (технологии LTE, LTE-Advanced (LTE Release 10), WirelessMAN-Advanced (WiMAX Release 2, т.е. IEEE 802.16m)) были утверждены МСЭ в 2010 году. Из перечисленных стандартов, технология LTE-Advanced теоретически обеспечивает скорость передачи до 1 Гбит/с у неподвижных абонентов и 300 Мбит/с у подвижных объектов. А технология улучшенной версии LTE-Advanced Pro могут быть применены для разработки сетей следующего, пятого поколения мобильной связи.

– мобильные сети 5G в большинстве стран пока развернуты только на сравнительно низких частотах 3-4 гигагерц, но уже и обеспечивают уверенную скорость передачи данных примерно до 1-2 Гбит/с благодаря применению новых технологий (в частности, новых типов антенн). В некоторых странах появились первые тестовые площадки для исследования применения сетей 5G на частотах выше 20 ГГц.

– по применению мобильных сетей 6G, в которых будут использоваться еще более высокие частоты, чем в сетях пятого поколения, в ряде стран проводятся первые исследовательские работы.

В материалах данной работы исследуются задачи, относящиеся только к моделированию (планированию) сети четвертого поколения (объект – поселок городского типа). Проведенные исследования планируется использовать при модернизации существующей сети 4G объекта.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные мобильные сети должны использоваться не только для организации сотовой телефонной связи, но и для передачи видео, телевидения, для работы с интернетом. Это возможно осуществить в сетях четвертого поколения. Современная сеть 4G может быть спроектирована на основе стандарта LTE-Advanced, или на основе WirelessMAN-Advanced (т.е. IEEE 802.16m).

Сравнивая характеристики сетей, которые можно обеспечить при применении этих стандартов, выбираем стандарт LTE-Advanced по следующим критериям [2]:

– для «линии вверх» – в восходящем канале, в LTE предложена технология SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access) – мультиплексирование на одной несущей, т.е. символы передаются параллельно, а не последовательно. Это заметно снижает пик-фактор формируемых на передачу сигналов, а также смягчает требования к динамическому диапазону и степени линейности выходной характеристики усилителя мощности. В результате, усилитель может работать в более эффективном режиме и с более высоким КПД;

– в пределах одного ресурсного блока, 180 кГц, поднесущие коррелированы, что позволяет сократить количество пилот-поднесущих для оценивания канала на приемной стороне;

– реализована более оптимальная техника борьбы с частотно-селективными замираниями: частотно-селективная диспетчеризация ресурсов;

– в архитектуре LTE отсутствует контроллер базовых станций, поэтому резко сократилось время на обработку пакетов (до 10 мс, против 30 мс в IEEE 802.16m);

– в LTE доступны 29 схем помехоустойчивого кодирования MCS для квадратурной амплитудной модуляции и выбирается та, которая в данных условиях распространения радиоволн обеспечивает максимальную пропускную способность;

– в LTE применяется частичное управление мощностью – пороговое отношение сигнал/шум меняется для пользователей в зависимости от их положения внутри соты;

– работа сети LTE осуществляется с коэффициентом переиспользования частот 1 (у стандарта IEEE 802.16m такой коэффициент 3), т.е. все базовые станции работают на одной несущей, но при этом внутрисистемные помехи минимизируются благодаря гибкому частотному плану);

– средняя пропускная способность соты (11,8 Мбит/с – UL (вверх, к базовой станции) и 4,8 Мбит/с – DL (вниз, от базовой станции), примерно в 3 раза больше, чем у IEEE 802.16m;

– возможно применение систем MIMO.

Учитывая проведенное сравнение двух стандартов, выбираем для моделирования (сетевого планирования) технологию стандарта LTE, а не IEEE 802.16m.

Для проведения сетевого планирования необходимо получить или сформулировать исходные данные, отражающие общие характеристики и требования к мобильной сети: число и частоты разрешенных радиоканалов; план сети с указанием желательных пунктов размещения базовых станций; отвечающих требованиям по наличию необходимых линий связи. А при реальном проектировании необходимы также требования по электропитанию, по возможности размещения оборудования, по установке антенн и др. С учетом требований сетевое планирование принято разделять на следующие этапы:

- планирования радиопокрытия;
- планирование емкости;
- частотное планирование;
- оптимизация и оценка работы.

Такое поэтапное деление несколько условно, но полезно для понимания общих принципов сетевого планирования.

Оперативное моделирование сети LTE может быть проведено в программной среде Matlab/Simulink с использованием пакета LTE System Toolbox. Либо же, в программных средах программ-аналогов, например, SimInTech, **Scilab**, Xcos, GNU Octave и других. Общие недостатки подобных пакетов прикладных программ: малый объем программных библиотек, малые вычислительные мощности, а также существенная зависимость результатов от корректной постановки задачи исследования (от корректного учета различных факторов).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оперативное моделирование пропускной способности сети LTE проведено в среде Matlab при различном количестве абонентов в населенном пункте (общее количество жителей 65000 человек, площадь населенного пункта 50 км²). Примененный программный пакет предоставляет функции и инструменты для проектирования, симуляции и верификации систем связи, соответствующих стандартам LTE и LTE-Advanced. Пакет программ позволяет настраивать, моделировать, измерять и анализировать полностью законченные линии связи.

Моделирование проводилось при изменении количества абонентов (до 200 абонентов) и при изменении их территориального расположения. Параметры сети следующие:

- частота – 2.14 ГГц;
- полоса – 20 МГц (максимальная);
- количество приемных антенн для технологии MIMO – 2 (4);
- количество передающих антенн для технологии MIMO – 2 (4);
- скорость передвижения абонентов – 5 км/ч;
- городская среда (возможные потери сигнала – до минус 70 дБ).

Определялось территориальное расположение базовых станций и другие параметры сети, в частности – пропускная способность сети. На рисунке 1, для примера приведен скриншот среды Simulink, где показана имитационная структурная схема канала.

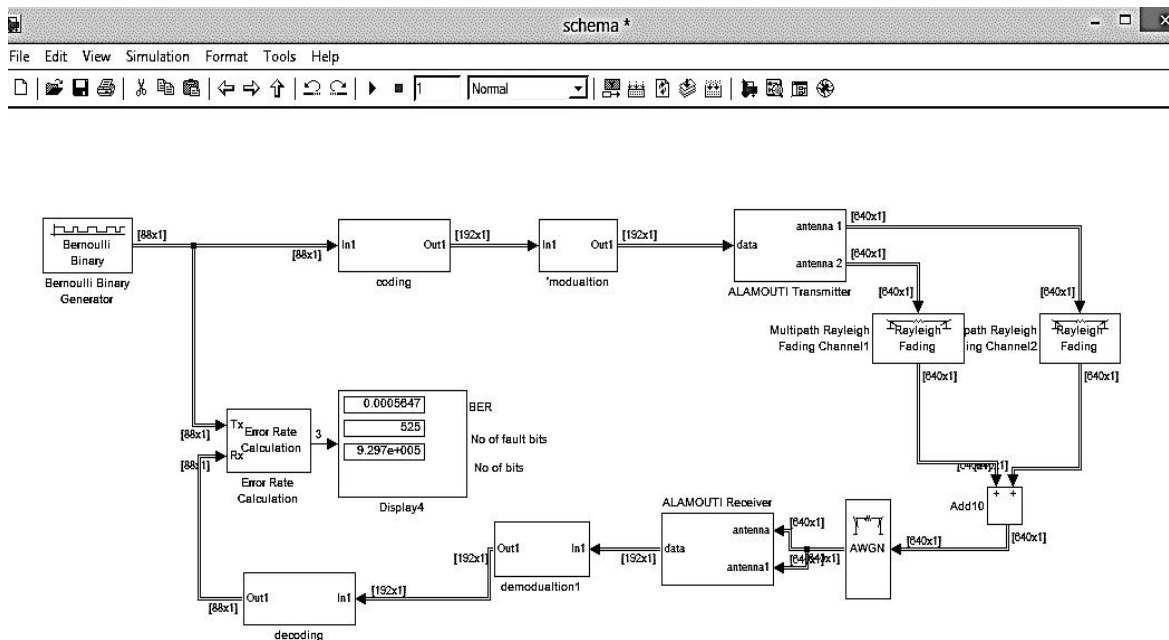


Рис. 1. Скриншот программной среды

Проведенное моделирование для технологии LTE показало, что при изменении количества абонентов на базовую станцию, средняя пропускная способность на одного абонента уменьшается, но средняя пропускная способность соты остается в пределах 60 Мбит/с. Типичный радиус покрытия соты 1-3 км, в зависимости от требуемого соотношения сигнал/шум на входе абонентского терминала. При моделировании отмечено, что

применение технологии ММО увеличивает скорость передачи информации в нисходящем канале в кратное число раз (ММО 2x2 – в 2 раза, ММО 4x4 – в 4 раза). Увеличивает и спектральную эффективность сети.

Моделирование было приближенное, так как не учитывало различные условия реального распространения электромагнитных волн в среде населенного пункта, но, однако оперативное и позволило сформулировать общие выводы по проведенному планированию.

IV. ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАДИОСЕТЕЙ

Задачи моделирования и проектирования беспроводных сетей могут различными. На данный момент не существует универсальных пакетов прикладных программ или программных комплексов, которые позволяли бы решать все возникающие проблемы сетевого планирования и проектирования. Поэтому, в различных странах разработаны и успешно применяются большое количество различных видов программных систем планирования радиосетей [3]:

- программные комплексы частотно-территориального планирования беспроводных сетей;
- программные комплексы, обеспечивающие решение задач электромагнитной совместимости;
- программные комплексы мониторинга качества работы уже существующих сетей;
- системы, предназначенные для оптимизации принципов передачи информации и параметров оборудования разрабатываемых сетей.

В российских центрах сотовых операторов применяются следующие программные комплексы:

- Балтика СПС;
- ONEPLAN RPLS;
- Atoll.

Балтика СПС решает следующие задачи:

- разработка частотно-территориальных планов вновь вводимых сетей радиосвязи и модернизации действующих сетей.
- Комплекс ONEPLAN RPLS позволяет осуществлять планирование новых, а также проводить модернизацию и оптимизацию эксплуатируемых сетей сотовой связи 2-4 поколений.

Atoll содержит современный набор функций для планирования сетей GSM/GPRS/EDGE.

Некоторые задачи планирования сети 4G были выполнены с использованием программного комплекса ONEPLAN RPLS.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом моделирование в среде Matlab (или в других аналогичных пакетах прикладных программ) показало возможность оперативного планирования мобильных сотовых сетей четвертого поколения. Общие недостатки подобных пакетов прикладных программ: малый объем программных библиотек, малые вычислительные мощности, а также существенная зависимость результатов от корректной постановки задачи исследования (от корректного учета различных реальных факторов).

Сетевое планирование с учетом различных реальных факторов выполняется на программных комплексах планирования радиосетей. Возможно, что появится и первый российский программный комплекс планирования сетей на основе дальнейшего развития программы SimInTech,

Научный руководитель Никонов Игорь Валентинович, Омский государственный технический университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишневский В., Красилов А., Шахнович И. Технология сотовой связи LTE – почти 4G // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 1. С. 62–72.
2. Тихвинский В.О., Терентьев С. В., Минаев И. В. Сравнительный анализ спектральной эффективности систем UMTS и LTE // Мобильные Телекоммуникации. 2008. № 2. С. 12–19.
3. Корнилов А., Архипкин А., Кириленко А. Система планирования радиосвязи на базе цифровых карт местности // Беспроводные технологии. 2007. № 2. С. 48–51.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР
ВГЛУБЬ ЦИРКОНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ
ПРИ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

**STUDY OF TEMPERATURE FIELD PROPAGATION INTO ZIRCONIUM BILLET
DURING WIRE-CUT EDM**

Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Ю. О. Бредгауэр, А. В. Линовский
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, Yu. O. Bredgauer, A. V. Linovsky
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Моделирование с помощью программного продукта Ansys V.21 позволяет предсказать максимальную глубину формирования различных фаз внутри заготовки во время электроэрозионной обработки. Основными параметрами режимов обработки являются: время длительности импульса (on), время паузы между импульсами (off) и напряжение межэлектродного зазора (sv). При рассмотрении количества тепла передаваемого при единичном разряде, главную роль играет время длительности импульса (on), поэтому в текущем исследовании рассмотрены различные значения данного параметра и показано влияние времени воздействия на глубину распространения тепловых волн. По результатам моделирования установлено, что для ускорения обработки необходимо увеличивать время длительности импульса (on) до максимально возможного значения, однако при этом снижается качество поверхностного слоя и точность выдерживаемых размеров.

Ключевые слова: распределение тепла, математическое моделирование, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, глубина проникновения.

Abstract. Modeling with the Ansys V.21 software allows you to predict the maximum depth of formation of different phases inside the workpiece during EDM. The main parameters of the processing modes are: pulse duration time (on), pause time between pulses (off) and spark gap voltage (sv). When considering the amount of heat transmitted at a single discharge, the main role is played by the pulse duration time (on), therefore, the current study considers different values of this parameter and shows the effect of the exposure time on the depth of propagation of heat waves. Based on the results of modeling, it was found that to speed up processing, it is necessary to increase the pulse duration time (on) to the maximum possible value, but at the same time the quality of the surface layer and the accuracy of the with-stand dimensions are reduced.

Keywords: heat distribution, math modeling, wire electrical discharge machining, penetration depth.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка различных металлов достаточно широко освещается в научно-технической литературе. В исследовании, проведенном Sharakhovsky L.I. [1], установлена зависимость режимов ЭЭО от теплофизических свойств материала. Главным результатом исследования является выявление зависимости эрозионной стойкости материала от теплопроводности, которая влияет на скорость обработки. Goswami A., и Kumar J. (2014) [2] в своей работе выявили закономерность, исходя из которой, толщина дефектного слоя зависит от энергии и длительности импульса. Более высокое значение времени импульса приводит к большей толщине дефектного слоя. Это указывает на то, что толщина дефектного слоя растет с увеличением пикового тока разряда,

времени протекания импульса, энергии импульса и с уменьшением паузы между импульсами. Для исследований был выбран материал Nimonic 80A (77,05% Ni, 18,39% Cr, 1,92% Ti, 1,05% Al, 0,63% Fe, 0,2% Mn, 0,19% Si) и проволоочный латунный электрод диаметром 0,25 мм. Marashi, H. [3] отмечает, что при внедрении в диэлектрическую жидкость различных порошковых диэлектриков, толщина диффузионного слоя становится меньше. Sharma, P. [4] отмечает, что есть склонность к формированию толстого дефектного слоя при высокоэнергетических импульсах и низком напряжении. С помощью энергодисперсионной спектроскопии выявлено присутствие Cu и Zn, которые диффундировали из латунной проволоки. Из-за значительной термической деградации микротвердость поверхностного слоя была изменена на 80 мкм. Haşçalık, A. [5] рассматривая дефектный слой, выделяет в нем 3 основные зоны с учетом микротвердости и микрофотографий всех образцов. Внешняя поверхность – состоящая из шлама, далее – белый слой. Под ним область, которая нагревалась и охлаждалась медленнее. Это создало отожженную область, более мягкую, чем исходный материал.

Присутствие материала электрода-инструмента на поверхности обрабатываемой заготовки после ЭЭО наблюдали многие исследователи. В частности, Fukuzawa Y. и др. (2009) [6] отмечают у образцов из циркониевой керамики различающийся химический состав по 3 зонам поверхностного слоя. В верхней зоне углерод и цинк, в средней цирконий и углерод, а в нижней цирконий и медь. Исследователи Chow C. K. и др. (1998) [7] в своей работе сообщают о высокой степени насыщения углеродом поверхности циркониевого сплава Zr–2,5Nb при его электроэрозионной обработке в углеводородном диэлектрике, что подтверждает гипотезу о миграции в поверхностный слой обрабатываемой детали не только материала электрода-инструмента, но и диэлектрической жидкости. Huang H. и Yan J. (2015) [8] отмечают, что одним из наиболее важных критериев качества электроэрозионной обработки является оценка толщины и фазового состава дефектного слоя, образующегося за счет переноса материала электрода и продуктов разложения диэлектрической среды, в поверхностный слой изделий. Lee B. E. J. и др. (2016) [9] отмечают, что улучшить биосовместимость протезов, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки, можно путем замены латунного электрода-инструмента на электрод из такого же металла, что и деталь. Такой эффект будет наблюдаться из-за того, что в поверхностный слой не диффундируют частицы инородного материала. В работе Saxena, K. [10] отмечается, что небольшое изменение состава наблюдается между необработанной и обработанной поверхностью из-за образования оксидного и углеродного слоев. Высокое увеличение изображений полученных с помощью растрового электронного микроскопа и имитационное исследование прояснили механизм удаления материала, который должен плавиться и испаряться из-за интенсивного локализованного нагрева. Комбинация РЭМ и рентгеноспектрального анализа показала, что миграция материала является двунаправленной. Для определения процентного содержания меди и цинка в поверхностном слое заготовки, используются два основных метода ЭДС и РФА. Для моделирования процесса теплообмена ученые рассматривают несколько основных вариантов представления источников тепла: дисковые [11–13], точечные [14] и гауссовы [15]. Наиболее популярными считаются цилиндрические, однако наиболее перспективными выглядят стационарные модели нагрева, использующие источники тепла с гауссовым распределением. Модели с гауссовым распределением являются высоко затратными со стороны компьютерных составляющих, однако более точны.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как видно из литературного обзора, моделированию процессов, происходящих во время электроэрозионной обработки, уделено большое внимание со стороны различных исследовательских коллективов по всему миру. В каждом исследовании отмечается зависимость скорости обработки и качества поверхностного слоя от режимов обработки. При этом говоря о качестве поверхностного слоя, подразумевается его чистота, а точнее наличие в нем материала электрода-инструмента и диэлектрической среды, а так же различных фазовых превращений и трещинообразования. Однако экспериментальное исследование качества поверхностного слоя требует больших затрат материальных ресурсов и дорогостоящих материалов, что актуализирует компьютерное моделирование, как малозатратный инструмент для предсказания фазовых превращений по глубине поверхностного слоя циркониевой заготовки. Целью теоретических исследований, является расчёт глубины распространения полей температур, способных влиять на образование различных фаз (более 600°C) в поверхностном слое циркониевой заготовки.

III. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Исследование посвящено аналитическому прогнозированию глубины фазовых превращений в поверхностном слое циркониевой заготовки, с помощью программного продукта Ansys V.21.

Расчет глубины распространения тепловых волн выполнялся в программном продукте Ansys V.21. Ограничения, сформулированные для проведения исследования:

1. Тело заготовки представлено кубом $5 \times 5 \times 5$ мм.
2. Диэлектрическая жидкость задается как дистиллированная вода, которая имеет постоянную температуру 20°C и взаимодействует с другими телами за счет конвекции.
3. Электрод инструмент представлен цилиндрическим телом из латуни, диаметром 0.2 мм и длиной 5 мм.
4. Электрический разряд, проходящий от электрода-инструмента к циркониевой заготовке представлен твердым телом, которое мгновенно нагревается до температуры 5000°C и держит температуру в течении 1–3 мкс, после чего остывает до температуры диэлектрической жидкости.
5. Передача тепла происходит за счет прямого контакта разряда с поверхностью заготовки, с помощью конвекции и с помощью излучения.

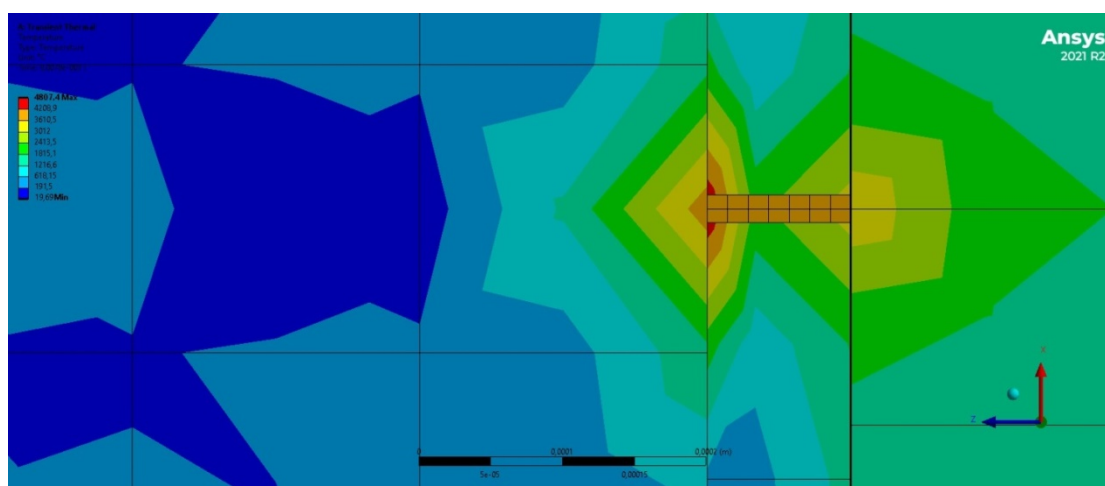


Рис. 1. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при стандартном значении параметра «on», равного 2.5 мкс

Полученные результаты расчетов, отражены на рисунках 1-5, где в разрезе оранжевым цветом отмечено нагретое до 5000°C тело (имитирующее разряд), справа от него электрод-инструмент, слева – заготовка. Благодаря полученному расчету, можно судить о распространении полей температур в поверхностных слоях заготовки в момент пробоя. Данный расчет показывает, что температура необходимая для плавления циркония (2125°C) не распространяется на глубину более 25 мкм, при стандартных режимах обработки (on – 2.5 мкс, off – 11 мкс и sv от 55 В). Так же из расчета следует, что дефектный слой не может залегать глубже 20-25 мкм от поверхности не расплавленного материала или 45–50 мкм от исходной поверхности. Температуры, способные влиять на образование различных фаз (600°C), внутри заготовки из циркониевого сплава, не распространяются на глубину более 150 мкм от исходной поверхности, следовательно, фазовые превращения будут наблюдаться на глубине не более 150 мкм от исходной поверхности. Полученные аналитическим методом данные дают удовлетворительное совпадение с результатами экспериментальных исследований, полученных авторами ранее.

Для выявления наиболее подходящих режимов обработки циркониевого сплава Э110 было решено исследовать результаты распространения полей температур вглубь заготовки при различном времени теплового воздействия. Другими словами, аналитически определить, как влияет различная величина длительности импульса на толщину расплавляемого материала и толщину дефектного слоя.

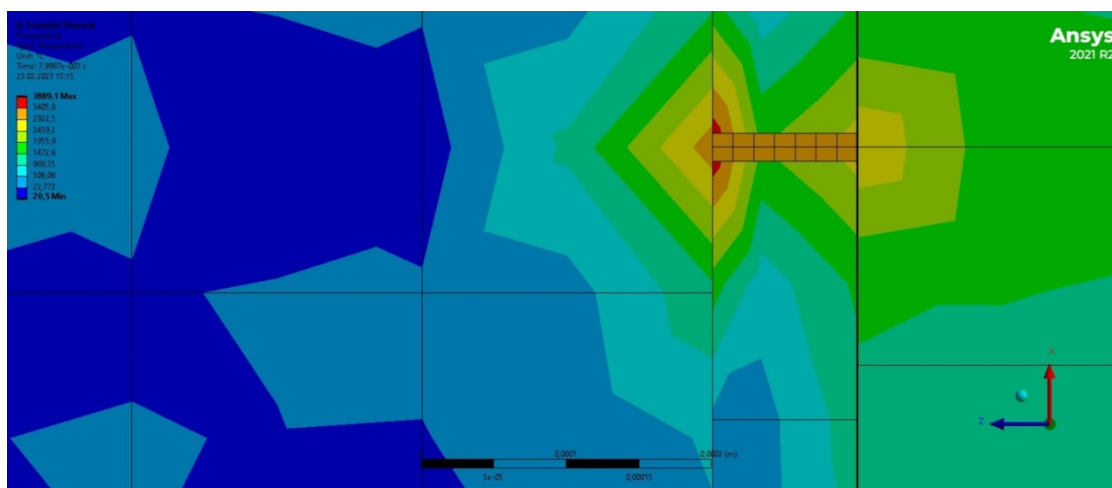


Рис. 2. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 1 мкс

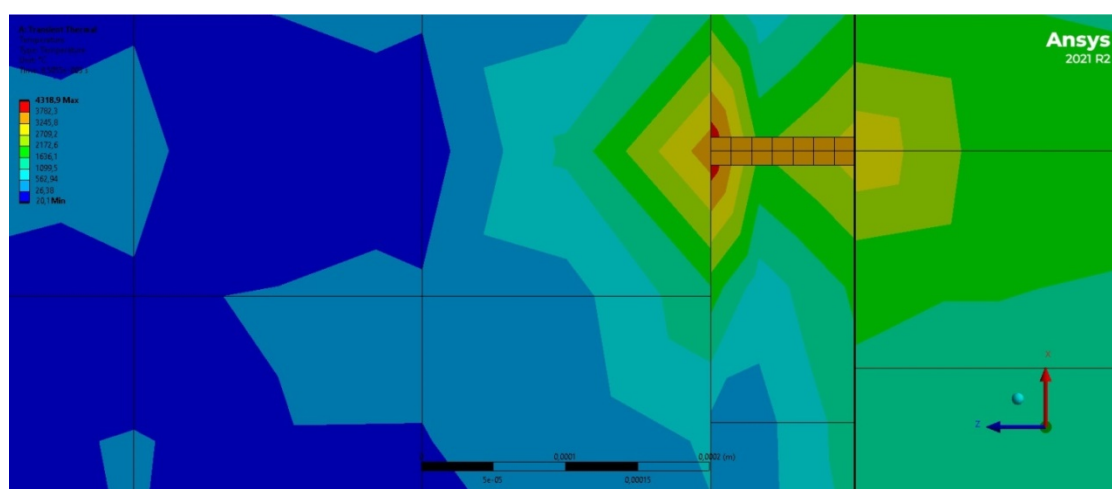


Рис. 3. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 1.5 мкс

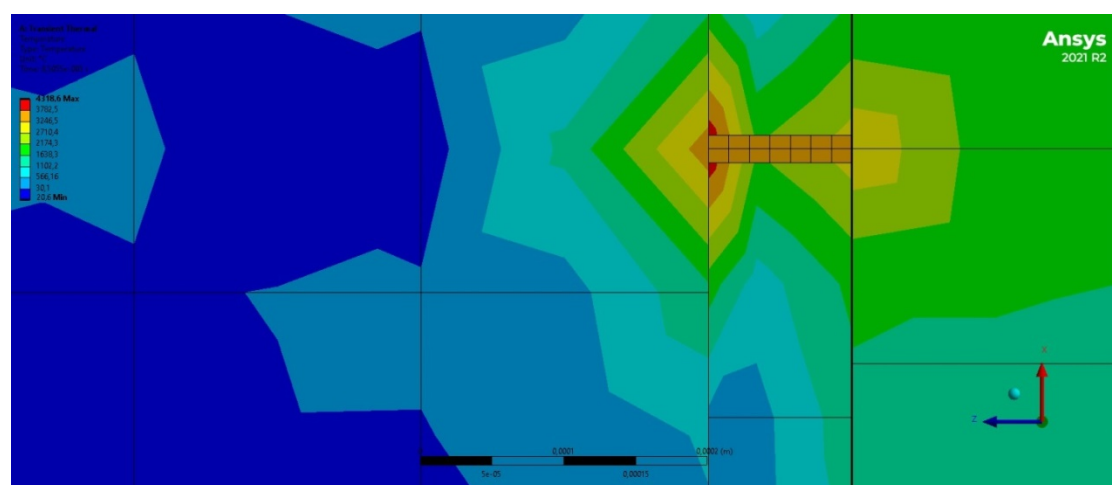


Рис. 4. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 2.0 мкс

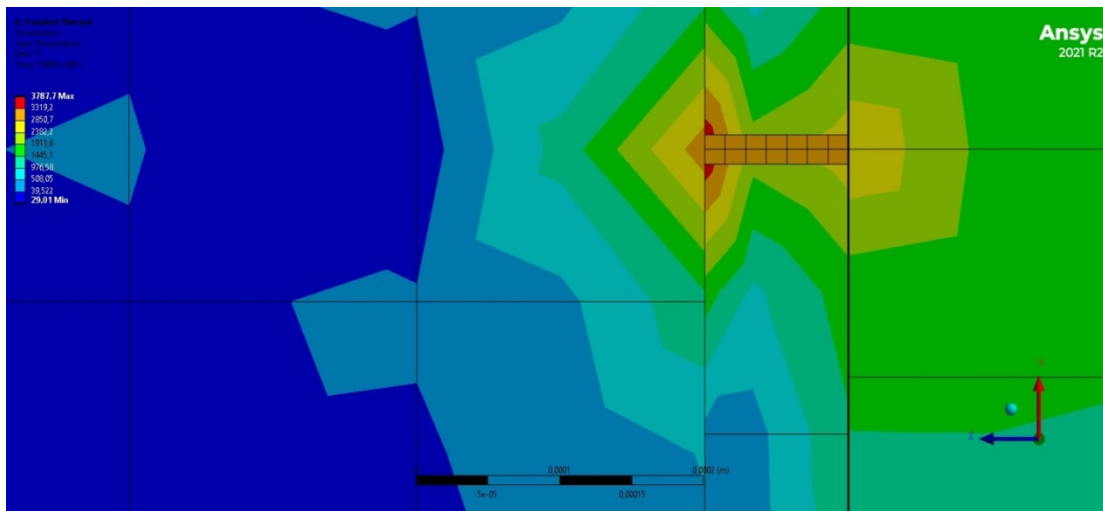


Рис. 5. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on» равного 3 мкс.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных аналитическим методом данных (Рис. 1–5) видно, что при меньшем времени импульса толщина расплавляемого материала, а также толщина дефектного слоя уменьшаются. Однако, как известно, при меньших значениях этого параметра происходит значительное увеличение времени обработки. При времени импульса, равного 1 мкс, глубина расплавляемого слоя составила порядка 13 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 31 мкм от исходной поверхности. При времени импульса, равного 3 мкс, глубина расплавляемого слоя составила порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 62 мкм от исходной поверхности.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении количества тепла передаваемого при единичном разряде, главную роль играет время длительности импульса (on). Данный параметр изменялся в пределах от 1 мкс до 3 мкс, при этом глубина расплавленного слоя составила от 13 мкм до 28 мкм, а глубина дефектного слоя т 31 мкм до 62 мкм. Следует отметить, что с увеличением времени длительности импульса время обработки уменьшается, так как расплавляется больший объем металла, однако снижение времени длительности импульса позволяет улучшить качество обработки. Наиболее оптимальным временем длительности импульса можно считать его значение в 2.5 мкс, при котором температура необходимая для плавления циркония (2125°C) не распространяется на глубину более 25 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 20–25 мкм от поверхности не расплавленного материала или 45–50 мкм от исходной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharakhovsky L. I., Marotta A., Essiptchouk A. M. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process // Applied Surface Science. 2006. Vol. 253. Pp. 797–804. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.013.
2. Goswami A., Kumar J. Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014. Vol. 17, is. 4. Pp. 173–184. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.05.002.
3. Marashi H., Jafarlou D. M., Sarahan, A. A. D., Mardi N. A. Employing severe plastic deformation to the processing of electrical discharge machining electrodes // Precision Engineering. 2016. Vol. 46. Pp. 309–322. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.012.
4. Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S. Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application // Materials and Design. 2015. Vol. 88. Pp. 558–566. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.036.

5. Haşçalýk A., Çaydaş, U. Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 148, is. 3. Pp. 362–367. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.048.
6. Fukuzawa Y., Mohri N., Gotoh H., Tani, T. Three-dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009. Vol. 19. Pp. 150–156. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60263-4.
7. Chow C. K., Brady G. R., Urbanic V. F., Coleman C. E. Hydrogen ingress through EDM surfaces of Zr-2.5Nb pressure-tube material // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 257, is.1. Pp. 35–43. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00436-X.
8. Huang H., Yan J. Applied Surface Science On the surface characteristics of a Zr-based bulk metallic glass processed by microelectrical discharge machining // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 355. Pp. 1306–1315. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.08.239.
9. Lee, B. E. J., Ho, S., Mestres, G., Karlsson, M., Koshy, P., & Grand, K. (2016). Surface & Coatings Technology Dual-topography electrical discharge machining of titanium to improve biocompatibility, 296, 149–156. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.024.
10. Saxena K. K., Agarwal S., Khare S. K. Surface Characterization, Material Removal Mechanism and Material Migration Study of Micro EDM Process on Conductive SiC // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. Pp. 179–184. DOI:10.1016/j.procir.2016.02.267.
11. J. Beck. Large time solutions for temperatures in a semi-infinite body with a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24, is. 1. Pp. 155–164. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90104-6.
12. S. Jilani P. Pandey. Analysis and modelling of edm parameters // *Precis. Eng.* 1982. Vol. 4, is. 4. Pp. 215–221. DOI: 10.1016/0141-6359(82)90011-3.
13. Snoeys R., VanDijck F. Investigation of electro discharge machining operations by means of thermo-mathematical model // *CIRP. Ann.* 1971. Vol. 20, is. 1. Pp. 35–37.
14. A. Erden B. Kaftanoglu. Heat transfer modelling of electric discharge machining. 1981. Pp. 351–358. DOI: 10.1007/978-1-349-05861-7-46.
15. N. Salah, K. Ghanem F., Kaïs Ben Atig. Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46, is. 7–8. Pp. 908–911. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.04.022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

MODELING OF DIELECTRIC FLUID FLOW FIELDS DURING WIRE-CUT ELECTRIC EROSION TREATMENT

Ю. О. Бредгауэр, А. А. Федоров, Н. В. Бобков, А. В. Линовский
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Yu. O. Bredgauer, A. A. Fedorov, N. V. Bobkov, A. V. Linovsky
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Электроэрозионная обработка является высокотехнологичным методом обработки изделий, изготовленных из любых токопроводящих материалов, способным достичь высокого качества и точности поверхности. Однако обрывы проволоки резко снижают ее производительность. В статье рассмотрены гипотезы причин обрыва проволоки. Проведены исследования, позволяющие определить место рециркуляции потоков диэлектрической жидкости. Предполагается, что именно в зоне рециркуляции потоков образуются эффективные частицы и мостики сварки из них.

Ключевые слова: обрыв проволоки, условия прокатки, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, мостик сварки

Abstract. EDM is a high-tech method of processing products made from any conductive materials, capable of achieving high quality and surface accuracy. However, wire breakages drastically reduce its performance. The article discusses the hypotheses of the causes of wire breakage. Studies have been carried out to determine the place of recirculation of dielectric fluid flows. It is assumed that it is in the flow recirculation zone that effective particles and welding bridges are formed from them.

Keyword: wire breakage, flow conditions, wire electrical discharge machining, welding bridge.

I. ВВЕДЕНИЕ

Технические характеристики современных машин постоянно совершенствуются, что способствует развитию существующих и созданию новых методов обработки, которые основываются на различных электрофизических или электрохимических явлениях. В 1943 году Б.Р. и Н.И. Лазаренко [1] был разработан метод удаления припуска с поверхности, основанный на явлении электрической эрозии. Так было положено начало развития электроэрозионной обработки. Последние 40-50 лет электроэрозионная обработка получила широкое распространение, многие ученые объясняют это увеличением количества трудно обрабатываемых материалов и сплавов, используемых в производстве. Технология электроэрозионной обработки занимает особое место при изготовлении штампов и пресс-форм.

Однако явление пробоя в узком зазоре при электроэрозионной обработке сложно для прямого наблюдения и, следовательно, еще не до конца изучено [2]. Внесение точности в процесс возникновения дуговых разрядов даже при стабильных режимах обработки продолжает оставаться сложной задачей. Явление электрического разряда в электроэрозионной обработке происходит в течение очень короткого периода времени в узком зазоре, заполненном диэлектрической жидкостью, и включает в себя процессы плавления и испарения электродов, что делает чрезвычайно трудным как его наблюдение, так и теоретический анализ.

Основное преимущество электроэрозионной обработки – обработка токопроводящих материалов с высокой твердостью без деформации тонкостенных и маложестких деталей. Однако, повышение производительности процесса до сих пор является актуальной задачей [3, 4, 5].

Одним из основных факторов, снижающих производительность проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПЭЭО), являются обрывы проволоки. В настоящее время можно выделить три основных направления в изучении обрывов электрода-инструмента, описывающих причины обрывов: 1) тепловое воздействие; 2) механическое воздействие; 3) короткое замыкание между электродами.

Под тепловым воздействием понимают разрушение электрода-инструмента под воздействием высоких температур, возникающих при пробое межэлектродного промежутка. Локальный перегрев проволоки может произойти при концентрации разряда в одном месте [6]. Позднее было установлено, что максимальная температура латунного провода во время обработки не превышает 100°C, что значительно меньше, чем температура плавления материала проволоки [7]. Группы ученых, в разное время занимавшихся исследованием явления обрыва, обнаружили, что шлам, образующийся при удалении материала с поверхности заготовки, скапливается на границе газовых пузырьков, возникающих при испарении диэлектрика под воздействием высоких температур электрического пробоя, может вызвать концентрацию разрядов в области скопления частиц шлама [7, 8, 9]. Однако в современном оборудовании проблема локальной концентрации разрядов решена с помощью системы контроля и мониторинга состояния межэлектродного промежутка [10].

Обрыв проволоки вследствие воздействия механического напряжения так и не был подтвержден. Было проведено исследование, которое доказало, что сумма термомеханических напряжений (растягивающее усилие проволоки – 23.34 Н, включая максимальные термические напряжения – 7.34 Н и усилие натяжных роликов – 16 Н) не способна вызвать обрыв проволоки [4], так как прочность на разрыв эродированной проволоки составляет 39.1 Н.

Короткое замыкание является наиболее вероятной гипотезой обрыва проволоки, что подтверждается исследованиями [11, 12, 13]. Но оно возможно только при выполнении одного из условий: 1) непосредственный контакт проволоки и заготовки; 2) наличие между электродами проводника. Первое условие имеет слишком низкую вероятность возникновения, так как системы контроля и мониторинга постоянно отслеживают расстояние межэлектродного промежутка [11, 12, 13]. Выполнения условия наличия проводника между электродами более вероятно. Проводником может служить шлам, который является токопроводящим [14].

Образование шлама – процесс, который является неотъемлемой частью электроэрозионной обработки. Сотни частиц шлама образуются только за один импульс тока. При прокачке диэлектрической жидкости через межэлектродный промежуток шлам находится между проволочным электродом и заготовкой. Частицы имеют разнообразную форму и размеры [15], поэтому при недостаточных условиях промывки межэлектродного промежутка, могут застревать между электродами, образуя, так называемый, «мостик сварки» [14, 15, 16].

«Мостик сварки», состоящий из частиц шлама, вызывает короткое замыкание, и, как следствие, обрыв проволоки. Не все частицы способны образовывать «мостик сварки». Их можно разделить на «эффективные» и «неэффективные» [16]. Механизмы образования эффективных частиц не исследовались подробно. Поэтому моделирование условий промывки межэлектродного промежутка является актуальной задачей. Исследователи проводили моделирование условий прокачки и выяснили, что давление жидкости приводит к вибрации проволоки и обрывы проволоки случаются чаще именно при врезе в материал заготовки (т. н. «стартовый врез» – до 2–3 мм), так как условия промывки ухудшаются [17]. Так же с помощью моделирования было обнаружено, что удаляемые частицы могут сталкиваться в зазоре при встрече потоков с верхнего и нижнего сопла [18]. В исследовании не дается пояснение, на каком участке рабочего промежутка это может происходить, однако это важно для понимания места образования «мостика сварки».

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для улучшения понимания механизма обрыва проволоки при ПЭЭО необходимо определить место обрыва проволоки по высоте реза. Для этого необходимо провести исследование обработанной поверхности и моделирование условий прокачки при ПЭЭО.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

1. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка образцов

В качестве заготовок были использованы образцы в форме параллелепипеда с размерами 50×50×150 (Д×Ш×В) мм. Материал образцов – конструкционная легированная сталь 40ХГНМ. В качестве электрода-

инструмента использовалась жесткая латунная проволока со следующим процентным содержанием: 60% меди и 40% цинка. Диаметр проволоки – 0.25 мм. Обработка производилась на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ300L (Япония). В качестве рабочей диэлектрической жидкости использовалась дистиллированная вода. В ходе эксперимента положение сопел менялось в зависимости от выбранного режима (рис. 1):

1) OPEN – режим, в котором оба сопла станка находятся на расстоянии более 0.1 мм от заготовки (данный режим используется для изделий, имеющих различную толщину реза или при обработке в специальных приспособлениях, не позволяющих приблизить сопла к поверхности заготовки);

2) OPEN U – режим, в котором одно из сопел станка (верхнее или нижнее) находится на расстоянии от заготовки более 0.1 мм, а другое – на расстоянии равном 0.1 мм;

3) CLOSE – режим, в котором оба сопла станка находятся от заготовки на расстоянии равном 0.1 мм.

Текущие значения электрических параметров (тока и напряжения), которые были автоматически рассчитаны программным обеспечением станка, во время экспериментов не изменялось вручную и фиксировалось при помощи встроенных вольтметра и амперметра. Сила тока имела среднее значение в 10.5 А, при этом она колебалась в диапазоне от 10.4 до 10.6 А, а среднее значение напряжения было 40 В, при этом диапазон составил от 38 до 42 В.

На рис. 2 представлены образцы поверхности детали после ПЭЭО при различных положениях сопел (рис. 1).

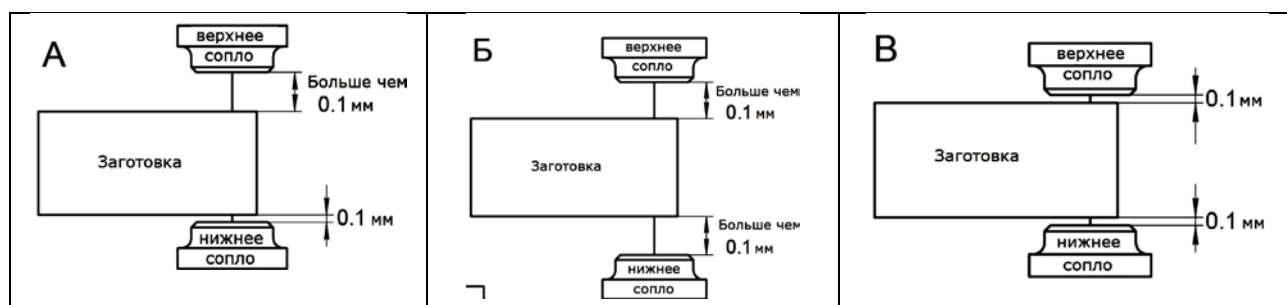


Рис. 1. Схема расположения сопел в процессе электроэрозионной обработки:

А) OPEN U; Б) OPEN; В) CLOSE

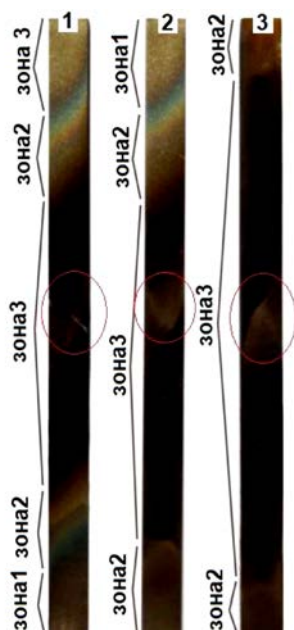


Рис. 2. Поверхности, обработанные с помощью проволочной электроэрозионной обработки при различных положениях сопел:

1) CLOSE; 2) OPEN U; 3) OPEN

2. 3D моделирование потоков диэлектрической жидкости при ПЭЭО

Моделирование условий прокатки при проволочной электроэрозионной обработке осуществлялось с помощью программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. (CFD-анализ).

Исходными данными для проектирования являлись размеры обрабатываемой заготовки, форма электрода-инструмента, его размер и оставляемый им след при обработке, ширина межэлектродного промежутка (рис. 3 параметр r) – 50 мкм, диаметр сопел – 6 мм. Расстояние от заготовки до сопла варьировалось в зависимости от режима обработки (рис. 1). Давление жидкости было пересчитано на скорость по следующим формулам:

Объемный расход сопел равен $W=6$ л/мин или 0.1 л/с

$$\frac{dp}{dt} = F = S, \text{ где } p = mV \quad (1)$$

$$F = m \left(\frac{dV}{dt} \right) = \frac{d(mV)}{dt} \quad (2)$$

$$F = pS = -\eta \frac{dV}{dr} dS \quad (3)$$

Так как в левой и правой части уравнения содержится S , то можно умножить равенство на S

$$pdr = -\eta dV \quad (4)$$

$$V = -\frac{1}{\eta} \int_{r1}^r Pdr \quad (5)$$

По выведенной формуле 1 скорость диэлектрической жидкости на выходе составила 75 м/с.

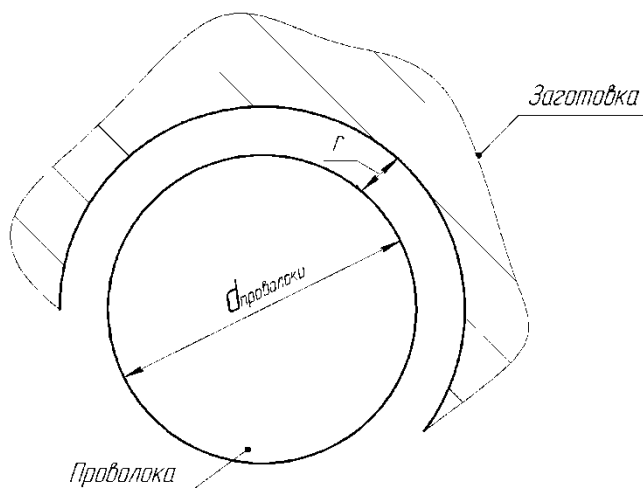


Рис. 3. Схематическое положение проволочного электрода-инструмента и заготовки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке

На рисунке 4 представлена модель, подготовленная с помощью программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. Модель включает в себя сопло верхнее (рис. 4, поз. 1) и сопло нижнее (рис. 4, поз. 2), обрабатываемую деталь (рис. 4, поз. 3) и проволочный электрод-инструмент (рис. 4, поз. 4). Позиция 5 на рисунке 4 указывает потоки диэлектрической жидкости, вырывающиеся из верхнего и нижнего сопла на встречу друг другу. Они являлись граничными условиями при моделировании. Скорость потока равна 75 м/с. Таким образом, обеспечивается промывка межэлектродного промежутка, в котором находится проволока. Во время обработки сопла неподвижны, и обработка по контуру обеспечивается движением стола, заданным по программе, проволока постоянно проматывается через рабочую зону со скоростью 13 м/с. Однако этими перемещениями при моделировании пренебрегали для упрощения модели, так как они не существенно влияют на прокатку жидкости во время обработки.

Опыт работы авторов на электроэрозионном оборудовании в качестве операторов станка показывает, что обрывы проволоки чаще возникают в режиме OPEN. Они возникают из-за сложных условий прокатки диэлектрической жидкости на большую глубину, отклонений потока прокатки из-за геометрии детали и элементов

приспособлений и других факторов. Перечисленные факторы сложно прогнозируемы и зависят от конкретных параметров настройки станка. Поэтому для моделирования в представленном исследовании был выбран режим CLOSE, при котором сопла удалены на 0.1 мм от детали с обеих сторон и влияние внешних факторов сведено к минимуму, а производительность обработки деталей максимальна.

Так же исходными данными для моделирования являлась рабочая жидкость. В библиотеке ПО SolidWorks Flow Simulation была выбрана диэлектрическая жидкость – Water, плотность которой соответствует 997 кг/м^3 .

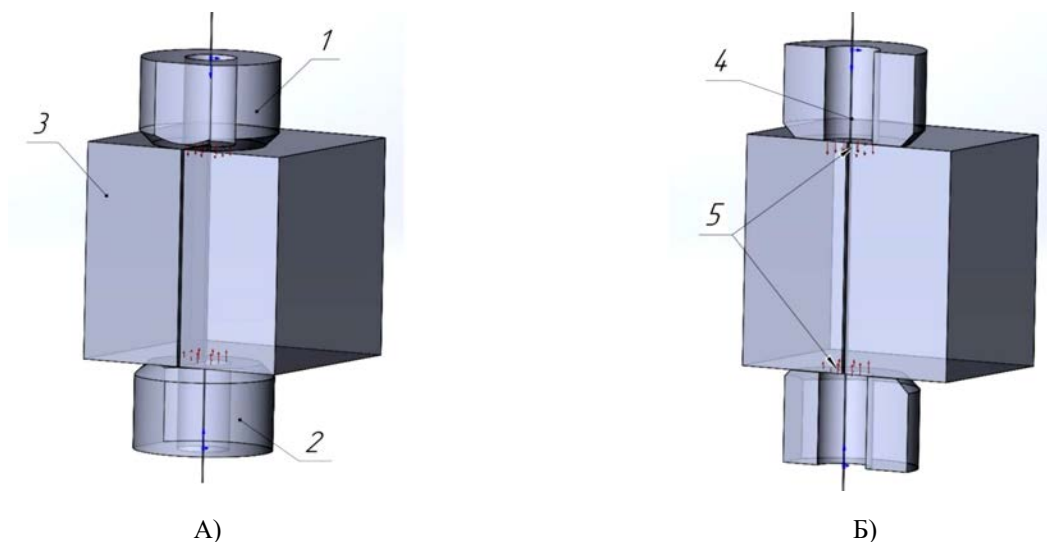


Рис. 4. Спроектированная модель в ПО SolidWorks Flow Simulation:

А) общий вид: 1 – верхнее сопло; 2 – нижнее сопло; 3 – обрабатываемая деталь;

Б) в сечении: 4 – проволочный электрод-инструмент; 5 – направление потоков диэлектрической жидкости

Результаты моделирования представлены на рисунке 5. Направление потоков жидкости обозначены стрелками.

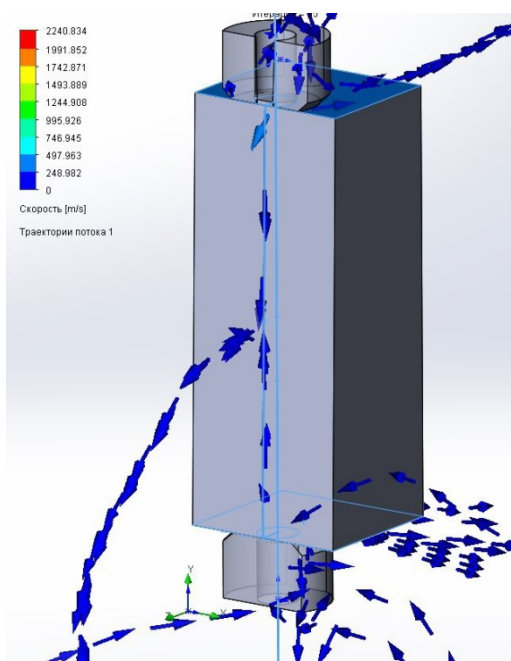


Рис. 5. Результаты моделирования потоков жидкости при ПЭЭО в ПО SolidWorks Flow Simulation

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При электроэрозионной обработке материал оплавляется под действием импульсов электрического тока. При пробое межэлектродного промежутка из-за высоких температур рабочая среда испаряется, тем самым, образуемая, так называемый, газовый пузырь. Под действием давления внешней среды и газового пузыря, расплавленный материал выплескивается частями, направления движений которых весьма разнообразны.

Так, часть материала может двигаться перпендикулярно поверхности обработки, проходя при этом через газовый пузырь. Существуют исследования, в которых утверждается, что расплав материала проходит через пузырь, попадая в диэлектрическую среду, металл охлаждается, застывая в сферической форме под воздействием сил поверхностного натяжения [19]. Другая часть расплавленного материала может двигаться совершенно иначе – не перпендикулярно обработанной поверхности, а под углом.

При взрыве газового пузыря расплавленный металл попадает в рабочую среду. Так как вода постоянно прокачивается через межэлектродный промежуток, то шлам вымывается из зоны обработки. Спроектированная CFD модель процесса удаления мусора из межискрового промежутка, основывается на предположении о том, что частицы мусора переносятся потоками диэлектрической жидкости [20]. Удаление материала из зоны обработки происходит постоянно, поэтому при вымывании частиц может произойти их столкновение.

Три стальных образца были обработаны при одинаковых параметрах процесса, но на разных режимах обработки. При исследовании полученных продольных поверхностей образцов было обнаружено, что каждую поверхность можно условно разделить на 3 зоны (рис. 2): зона 1 – зона хороших условий промывки, характеризуется светлым металлическим оттенком, зона 2 – средние условия промывки, характеризуется более темным цветом, что говорит о большем количестве налипшего шлама, и зона 3 – зона плохих условий промывки шлама, характеризуется темным цветом, который указывает на то, что в этой зоне большое количество «пригоревшего» шлама. Эти зоны хорошо согласуются с условиями промывки при различных режимах, так в режиме CLOSE сопла приближены на 0.1 мм к заготовке, давление струи хорошо вымывает шлам в верхней и нижней частях, но по мере удаления от сопла, поверхность становится более темной.

Однако на всех трех образцах в середине можно обнаружить более светлые полосы, которые обведены на рисунке 2 красными окружностями. Эти светлые участки могут свидетельствовать о наличии зоны рециркуляционного потока, который образуется при встрече верхнего и нижнего потоков. Это подтверждается исследованиями, приведенными в литературном обзоре. Китайские ученые при моделировании процесса ПЭЭО обнаружили рециркуляционный поток, который образуется примерно в середине реза за проволокой при столкновении нижнего и верхнего потоков [21]. Так же исследования, подтверждающие столкновение потоков в середине реза, доказывают это и на эксперименте [16].

Результаты моделирования с помощью ПО SolidWorks Flow Simulation представлены на рисунке 5. Направление движения диэлектрической жидкости при промывке обозначено стрелками. Распределение потока происходит по заготовке, при этом часть потока разбивается по верхней и нижней поверхностям заготовки, находящихся у верхнего и нижнего сопел соответственно. Это можно объяснить тем, что струя потока жидкости не попадает в межэлектродный промежуток, так как диаметр сопла равен 6 мм, а межэлектродный промежуток составляет 50 мкм. Потоки диэлектрической жидкости, попавшие в рабочую зону, встречаются примерно в середине продольного реза, а после выходят из зоны обработки. Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными при исследовании обработанной поверхности. Зона, обозначенная красной окружностью на рисунке 2, также находится в середине реза, именно там встречаются нижний и верхний потоки. Можно предположить, что рециркуляционный поток на модели так же может присутствовать, но так как он имеет небольшую величину относительно размеров заготовки, он может быть не отображен при моделировании.

Все эти результаты говорят о том, что образование эффективных частиц шлама наиболее вероятно именно в зоне рециркуляции, так как потоки диэлектрика могут сталкивать частицы между собой, что будет приводить к образованию более крупных частиц, способных перекрыть межискровой промежуток, тем самым вызывая короткое замыкание и обрыв проволоки.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы было выполнено 3D моделирование потоков диэлектрической жидкости при ПЭЭО и экспериментальное исследование поверхности, прошедшей ПЭЭО при различных режимах. Было об-

наружено, что потоки диэлектрической жидкости встречаются примерно в середине реза. Это подтверждается экспериментальными данными и результатами моделирования. Предполагается, что именно в этой зоне большая вероятность образования эффективных частиц, которые способны образовать «мостик сварки».

В дальнейшем планируется провести моделирование для режимов OPEN и OPEN U, а так же подробнее описать механизм образования мостика сварки при ПЭЗО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lazarenko B. R. To invert the effect of wear on electric power contacts // Diss. All-Union Inst. Electro Tech. Moscow / USSR. 1943.
2. Habib S., Okada A. Study on the movement of wire electrode during fine wire electrical discharge machining process // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 227. Pp. 147–152.
3. Wang J., Sánchez J.A., Izquierdo B. [et al.]. Effect of discharge accumulation on wire breakage in WEDM process // Int J Adv Manuf Technol. 2023. Vol. 125. Pp. 1343–1353. DOI: 10.1007/s00170-022-10786-z.
4. Fedorov A. A., Linovsky A. V., Blesman A. I. [et al.]. Investigation of the impact of Reh binder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 256. Pp. 131–144. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002.
5. Xu Y., Guo X. H., Liu C. Study on wire breakage in WEDM by 3D technology // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2011. Vol. 44. Pp. 1442–1448.
6. Obara H. Detection of Discharging Position in Wire EDM // Proc. Of ISEM-10. 1992. Pp. 404–409.
7. Obara H. An attempt to detect wire temperature distribution during wire EDM // Proc. Of ISEM-11. 1995. P. 67.
8. Kunieda M. [et al.]. Advancing EDM through fundamental insight into the process // CIRP annals. 2005. Vol. 54, no. 2. Pp. 64–87.
9. Dekeyser W., Snoeys R., Jennes M. A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting // Journal of Manufacturing Systems. 1985. Vol. 4, no. 2. Pp. 179–190.
10. Shoda K. Adaptive Control of Wire EDM with On-line Detection of Spark Locations // Proc. of 10 th Int. Symp. of Electro-Machining. 1992. Pp. 410–416.
11. Obara H., Abe M., Ohsumi T. Control of Wire Breakage during Wire EDM-1st Report: Monitoring of Gap Signals According to Discharged Location // International Journal of Electrical Machining. 1999. Vol. 4. Pp. 53–58.
12. Rajurkar K. P., Wang W. M., Lindsay R. P. On-line monitor and control for wire breakage in WEDM // CIRP annals. 1991. Vol. 40. № 1. Pp. 219–222.
13. Fu X. et al. MRR analysis on technology of piezoelectric self-adaptive micro-EDM // Procedia Engineering. 2011. Vol. 16. Pp. 477–485.
14. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric // Journal of electrostatics. 1979. Vol. 7. Pp. 123–144.
15. Li D. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining // Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 53, no. 200. Pp. 10.3901.
16. Fedorov A. A. [et al.]. Investigation of welding bridge occurrence and short circuit impact on wire breakages during WEDM // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1210, no. 1. Pp. 012045.
17. Okada A. [et al.]. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM // CIRP annals. 2015. Vol. 64, no. 1. Pp. 233–236.
18. Yue X., Yang X. Study on the distribution of removal material of EDM in deionized water and gas with molecular dynamics simulation // Procedia CIRP. 2016. Vol. 42. Pp. 691–696.
19. Hockenberry T. O., Williams E. M. Dynamic evolution of events accompanying the low-voltage discharges employed in EDM // IEEE Transactions on Industry and General Applications. 1967. No. 4. Pp. 302–309.
20. Tanjilul M. [et al.]. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 255. Pp. 263–274.
21. Okada A. [et al.]. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM // CIRP Annals. 2015. Vol. 64. No. 1. Pp. 233–236.

УДК 621.923.6

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-38-41

РЕНОВАЦИЯ МНОГОГРАННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ПО ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

RENOVATION OF MULTIFACETED HARD-ALLOY INSERTS ON THE REAR SURFACE

Е. В. Васильев, Ю. А. Блохина, М. М. Лакман, С. В. Михайленко
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. V. Vasiliev, Yu. A. Blokhina, M. M. Lakman, S. V. Mikhailenko
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Рассмотрены способы шлифования задней поверхности режущих многогранных твердосплавных пластин с восстановлением вершин. Произведен анализ наиболее эффективной схемы шлифования. Осуществлена технологическая наладка для реновации многогранных твердосплавных пластин. Разработана управляющая программа для обработки режущих пластин на шлифовально-заточном станке с ЧПУ модели ВЗ-750Ф4. Произведен анализ результатов реновации многогранных твердосплавных пластин выбранным методом шлифования по геометрическим параметрам и стойкости режущих пластин относительно новых.

Ключевые слова: восстановление режущего инструмента, затачивание, переточка, реновация, твердосплавные пластины, схемы шлифования.

Abstract. The methods of grinding the rear surface of cutting multifaceted hard-alloy inserts with the restoration of the vertices are considered. The analysis of the most effective grinding scheme was made. Technological adjustment for the renovation of multifaceted hard-alloy plates has been carried out. A control program has been developed for processing cutting inserts on a grinding machine CNC model V3-750F4. The analysis of the results of the renovation of multifaceted hard-alloy inserts by the selected grinding method in terms of geometric parameters and tool life of cutting inserts relative to new ones was carried out.

Keywords: restoration of cutting tools, sharpening, regrinding, renovation, hard-alloy inserts, grinding schemes.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное производство невозможно представить без широкого ассортимента режущего инструмента. Однако, актуальной остается проблема глобального импорта необходимого инструмента. На данный момент на производстве используется более 90% режущих инструментов импортного производства [1].

Влияние импорта на жизнеспособность отечественных предприятий можно сократить путем осуществления переточки (реновации) режущего инструмента [2], [3], [4], [5].

Стоимость инструмента может составлять до 20% от стоимости готовой продукции [6]. В связи с этим важно, чтобы восстановленный инструмент был дешевле нового зарубежного. Однако, переточенный режущий инструмент также должен обладать рядом необходимых параметров для работы в определенных условиях. В массовом производстве не допускается снижение стойкости режущего инструмента и существенное изменение его геометрии, влияющее на условия резания. Из этого вытекает ряд требований к переточенному инструменту, что осложняет его реновацию.

На практике чаще всего встречаются два вида износа режущего инструмента: выкрашивание по передней поверхности и по задней поверхности пластины. В зависимости от вида износа, условий резания и условий базирования пластины в гнезде инструмента подбирается подходящая схема шлифования [7], [8], [9].

Затачивание многогранных твердосплавных пластин по передней поверхности не меняет размеры их контуров, в данном случае происходит изменение только высоты вершин, условий стружкоотвода и стружколомания [7].

Реновация режущих пластин по задней поверхности изменяет конфигурацию, размеры их контуров и, как следствие, последующие условия резания и базирования пластины в гнезде инструмента.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данном научном труде сформулированы следующие задачи:

1. Осуществление технологической наладки для шлифования многогранных твердосплавных пластин выбранным методом.
2. Написание управляющей программы для осуществления перетачивания многогранных твердосплавных пластин на шлифовальном станке с числовым программным управлением (ЧПУ) ВЗ-750Ф4.
3. Производство анализа результата реновации многогранных пластин.

III. ТЕОРИЯ

Существует два способа шлифования задней поверхности режущей пластины с восстановлением вершины: методом копирования и методом обката (рис. 1) [10].

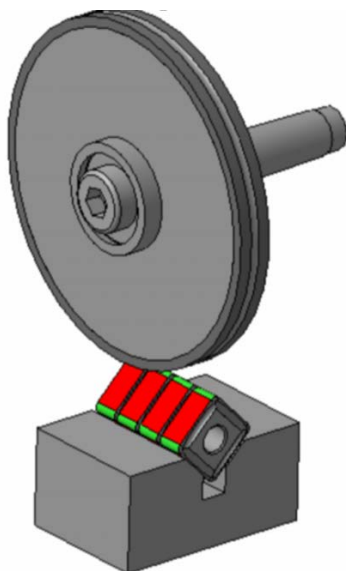


Рис. 1. Схема шлифования многогранной твердосплавной пластины методом копирования

Существенным недостатком метода копирования является повышенный контроль за износом алмазного шлифовального круга и частая его правка, что замедляет и усложняет переточку пластины.

Перетачивание методом обката можно осуществить двумя разными схемами шлифования. Первая схема шлифования осуществляется в специальном приспособлении с базированием резца с обрабатываемой пластиной по боковым опорным поверхностям резца. Вторая схема отличается креплением пластины с базированием по центральному отверстию пластины. Опытные испытания показали эффективность применения схемы шлифования многогранной твердосплавной пластины методом обката с базированием по центральному отверстию пластины [7].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании приведенных выше исследований осуществлена технологическая наладка для шлифования многогранной твердосплавной пластины методом обката с базированием по центральному отверстию (рис. 2).



Рис. 2. Технологическая наладка для переточки многогранной пластины

Для осуществления шлифования на станке с ЧПУ ВЗ-750Ф4 была разработана управляющая программа.

V. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Перетачивание производилось по задней поверхности пластины с притуплением режущей кромки. Результат шлифования представлен на рис. 3.



Рис. 3. Результат переточки многогранных твердосплавных пластин:
а) изношенная пластина, б) переточенная пластина

Внешне очевидно, что после переточки выбранным методом сколы изношенной пластины устранены и геометрические параметры пластины сохранены.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Произведена технологическая наладка и разработана управляющая программа для обеспечения переточки многогранных твердосплавных пластин по задней поверхности методом обката с базированием пластины по центральному отверстию.

Стойкость переточенных многогранных твердосплавных пластин не уступает стойкости новых зарубежных пластин. Стоимость переточки не превышает 20% от стоимости новой пластины, что позволяет существенно сократить расходы предприятия на инструментальное обеспечение.

Список литературы

1. Vasil'ev E. V., Popov A. Yu., Bugai I. A., Nazarov P. V. Manufacture and Design of Special Hard-Alloy Mills // Russian engineering research. 2014. Vol. 34, no. 8. Pp. 522–533. DOI: 10.3103/S1068798X14080140.
2. Медведева О. И., Янюшкин А. С., Лобанов Д. В. [и др.]. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании // Механики XXI века. 2013. № 12. С. 104–106.
3. Лобанов Д. В., Янюшкин А. С., Кирпикова Е. И. [и др.]. Сравнительный анализ методов комбинированной алмазной обработки твердых сплавов // Механики XXI века. 2012. № 11. С. 155–159.
4. Васильев Е. В., Блохина Ю. А., Лакман М. М. Схема формообразования задней поверхности пятигранных твердосплавных пластин на станках с ЧПУ // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 10–13.
5. Vasil'ev E. V., Popov A. Y., Lyashkov A. A., Nazarov P. V. Developing a Machining Strategy for Hard-Alloy Polyhedral Inserts on CNC Grinding and Sharpening Machines // Russian engineering research. 2018. Vol. 38, no. 8. Pp. 642–644.
6. Васильев Е. В., Попов А. Ю. Определение рациональной геометрии режущей части переточенных твердосплавных пластин, предназначенных для чернового точения // СТИН. 2014. № 2. С. 16–20.
7. Васильев Е. В., Попов А. Ю., Васильева М. В., Назаров П. В. Реновация многогранных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов // Вестник современных технологий. 2016. № 3. С. 10–15.
8. Васильев Е. В., Попов А. Ю., Валова В. А. [и др.]. Исследование влияния режимов обработки и характеристики алмазного круга на точность обработки при затачивании режущей части многогранных твердосплавных пластин // Ученые Омска – региону: материалы IV Регион. науч.-техн. конф. 2019. С. 8–13.
9. Назаров П. В., Черных И. К., Матушко Е. Н. [и др.]. Анализ схем крепления режущих пластин для затачивания по задней поверхности // Омский научный вестник. 2017. № 1 (151). С. 30–33.
10. Палей М. М., Дибнер Л. Г., Флид М. Д. Технология шлифования и заточки режущего инструмента. Москва: Машиностроение, 1988. 288 с.

УДК 519.23+004.8

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-42-45

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

PRELIMINARY PREPARATION OF DATA FOR SUBSEQUENT SHORT-TERM FORECASTING OF SOLAR ELECTRICITY

Д. И. Васина, А. Ю. Горшенин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. I. Vasina, A. Y. Gorshenin

Omsk state technical university, Omsk, Russia

Аннотация. В статье обсуждается важность точного прогнозирования выработки солнечной энергии при управлении солнечными электростанциями и интеграции солнечной энергии в электрическую сеть. В статье представлен алгоритм программы, предназначенной для оптимизации форматов данных с целью сокращения использования памяти в больших наборах данных, особенно для данных, собранных с двух солнечных электростанций. Программа выполняет разведочный анализ данных (EDA) для оптимизации формата данных и сравнения эффективности двух установок. Результаты показывают, что оптимизированные форматы данных могут сократить использование памяти и повысить производительность моделей машинного обучения.

Ключевые слова: солнечная энергия, прогнозирование, машинное обучение, оптимизация данных, анализ данных, эффективность памяти, солнечные электростанции, электросети, разведочный анализ данных, производство солнечной энергии

Abstract. The article discusses the importance of accurate forecasting of solar energy generation in the management of solar power plants and the integration of solar energy into the electric grid. The article presents an algorithm of a program designed to optimize data formats in order to reduce memory usage in large datasets, especially for data collected from two solar power plants. The program performs exploratory data analysis (EDA) to optimize the data format and compare the efficiency of two installations. The results show that optimized data formats can reduce memory usage and improve the performance of machine learning models.

Keyword: solar energy, forecasting, machine learning, data optimization, data analysis, memory efficiency, solar power plants, power grids, exploratory data analysis, solar energy production

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование выработки солнечной энергии является важной областью исследований в области возобновляемых источников энергии [1]. С растущим внедрением солнечной энергии в качестве жизнеспособного источника энергии точное прогнозирование выработки солнечной энергии стало решающим для эффективного управления солнечными электростанциями и интеграции солнечной энергии в электрическую сеть [2].

Прогнозирование солнечной энергии предполагает использование математических моделей и алгоритмов для оценки количества солнечного излучения, которое будет получено солнечными панелями за данный период времени. Обычно это делается с использованием данных прогнозов погоды, спутниковых снимков и исторических данных о производстве солнечной энергии [3].

Точное прогнозирование производства солнечной энергии имеет ряд преимуществ. Во-первых, это позволяет операторам солнечных электростанций лучше управлять производством энергии, оптимизируя свою деятельность и снижая затраты [4]. Кроме того, точное прогнозирование солнечной энергии может помочь операторам электросетей управлять колебаниями выработки солнечной энергии, обеспечивая лучшую интеграцию солнечной энергии в электрическую сеть [5].

Существует несколько проблем, связанных с прогнозированием солнечной энергии, включая изменчивость солнечной радиации из-за облачного покрова и других погодных условий, а также потребность в точных данных [6]. Однако достижения в области машинного обучения и методах анализа данных показывают многообещающие результаты в повышении точности прогнозов солнечной энергии [7, 8].

II. ТЕОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основной проблемой в прогнозировании выработки солнечной энергии определяется – неточные данные, или вовсе их отсутствие в свободном доступе для проведения исследований и дальнейшего изучения. Для последующего прогнозирования выработки необходимо проанализировать входные данные, а также провести их оптимизацию.

Оптимизация данных – важный процесс в анализе данных и машинном обучении, поскольку он может помочь уменьшить размер данных и сделать их более управляемыми, что особенно важно при работе с большими наборами данных. Оптимизация данных может повысить эффективность обработки данных, снизить требования к хранилищу и повысить производительность моделей машинного обучения. Кроме того, оптимизированные данные легче визуализировать и анализировать, и они могут быть более надежными, поскольку уменьшают вероятность ошибок и несоответствий в данных.

Поскольку размер наборов данных растет экспоненциально, объем памяти становится решающей проблемой, которую необходимо учитывать при выполнении анализа данных. Неэффективность памяти может не только замедлить время обработки, но и сделать невозможным выполнение анализа на определенных машинах или системах. В статье будет описан алгоритм программы, которая оптимизирует форматы данных для уменьшения объема памяти в больших наборах данных.

Программа специально разработана для анализа данных о выработке солнечной энергии двумя установками.

Эти данные были собраны на двух солнечных электростанциях в Индии в течение 34 дней. Он содержит две пары файлов – каждая пара содержит один набор данных о выработке электроэнергии и один набор данных о показаниях датчиков. Наборы данных о выработке электроэнергии собираются на уровне инвертора.

Первым шагом является загрузка данных из CSV-файлов и выполнение разведочный анализа данных (EDA) для этих данных. EDA выполняется с использованием библиотеки `pandas` на Python. Программа загружает данные для установки 1 и выполняет различные операции для оптимизации формата данных.

Первое наблюдение, сделанное в EDA, заключается в том, что данные очень чистые, без нулевых значений, отрицательных или бесконечных. Второе наблюдение заключается в том, что названия столбцов написаны в верхнем регистре и будут изменены на строчные. Третье замечание заключается в том, что столбец `DATA_ВРЕМЯ` находится в текстовом формате и будет преобразован в временную метку. Четвертое заключается в том, что `СИЛА_ПОСТОЯННОГО_ТОКА` и `ПЕРЕМЕННАЯ_МОЩНОСТЬ`, по-видимому, имеют проблему с масштабированием, поскольку `СИЛА_ПОСТОЯННОГО_ТОКА` должен быть схожим на `ПЕРЕМЕННАЯ_МОЩНОСТЬ`, но вместо этого кажется в 10 раз больше. Наконец, столбец `ПАНЕЛЬ_ID` содержит единственное значение во всем наборе данных, и этот столбец будет удален, а значение сохранено во внешней переменной, чтобы уменьшить объем памяти фрейма данных.

Результирующая гистограмма на рис. 1 обеспечивает визуальное представление распределения ненулевых значений в каждом столбце отфильтрованного фрейма данных, что может помочь выявить закономерности и тенденции в данных.

Следующий шаг – оптимизация форматов. Функция `optimize_formats(df)` предназначена для оптимизации форматов набора данных. Функция принимает фрейм данных `pandas` в качестве входных данных и возвращает новый фрейм данных с оптимизированными форматами и словарем, содержащим дополнительные данные. Функция проверяет, написаны ли названия столбцов в верхнем регистре, и если да, то приступает к процессу оптимизации. Затем функция создает словарь для хранения данных, которые должны быть удалены из фрейма данных. Функция изменяет имена столбцов на строчные, кодирует "ИДЕНТИФИКАТОР" в целые числа, сохраняет исходный "ИДЕНТИФИКАТОР" в отдельной переменной, удаляет столбец "ПАНЕЛЬ_ID" и сохраняет его значение во внешней переменной. Функция также изменяет столбец 'DATA_ВРЕМЯ' со строки на `pd`. Отметка времени. Наконец, функция выводит начальный и конечный размер фрейма данных и процентное сокращение объема памяти.

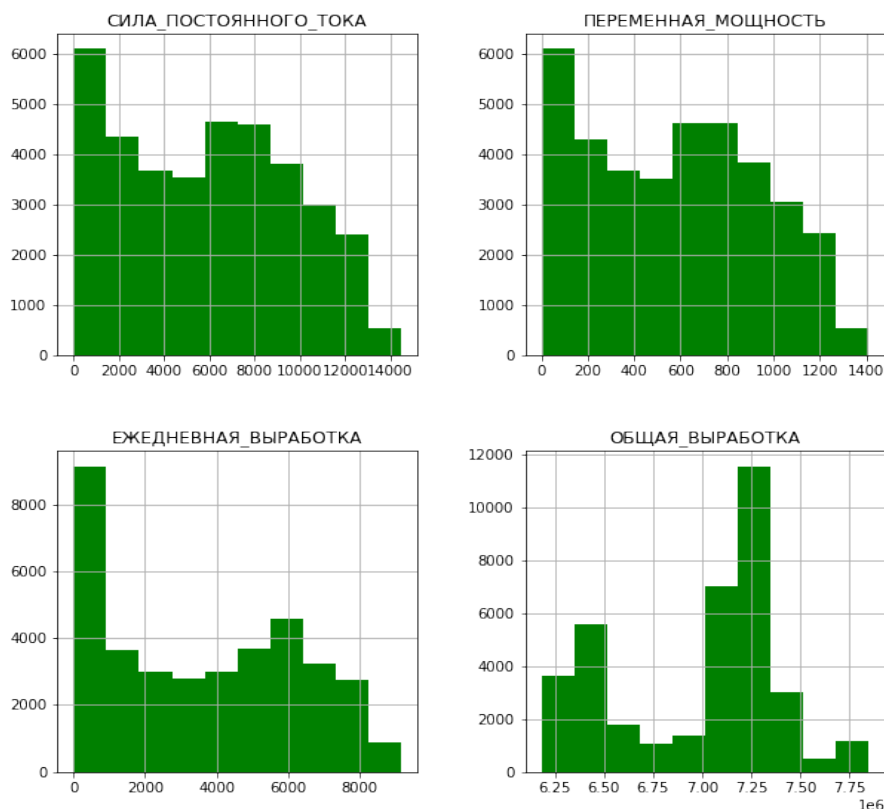


Рис. 1. Распределение ненулевых значений

Мы отфильтровываем строки, в которых значения ЕЖЕДНЕВНАЯ_ВЫРАБОТКА и ПЕРЕМЕННАЯ_МОЩНОСТЬ равны нулю, поскольку они представляют периоды, когда солнечная установка не вырабатывает никакой энергии, и, таким образом, они не предоставляют никакой полезной информации для анализа. Затем мы строим гистограммы для всех оставшихся столбцов в `sample_df`, чтобы визуализировать распределение значений в каждом столбце. Это позволяет нам получить представление о данных и выявить любые закономерности или аномалии, которые могут присутствовать. Устанавливая цвет гистограмм на зеленый, мы просто меняем внешний вид графиков.

После оптимизации форматов данных программа выполняет дополнительный анализ для сравнения эффективности двух установок. Программа визуализирует шкалы мощности переменного и постоянного тока без нулей и сравнивает соотношение мощности постоянного и переменного тока (КПД) между двумя установками на рис. 2 и 3. Программа использует блок-схемы для сравнения масштабов мощности переменного и постоянного тока для обеих установок. На диаграмме показано, что существует значительная разница в масштабах мощности переменного и постоянного тока для обеих установок. Затем программа вычисляет эффективность обеих установок, используя максимальные значения мощности переменного и постоянного тока. Эффективность установки 1 сравнивается с эффективностью установки 2, и рассчитывается соотношение.

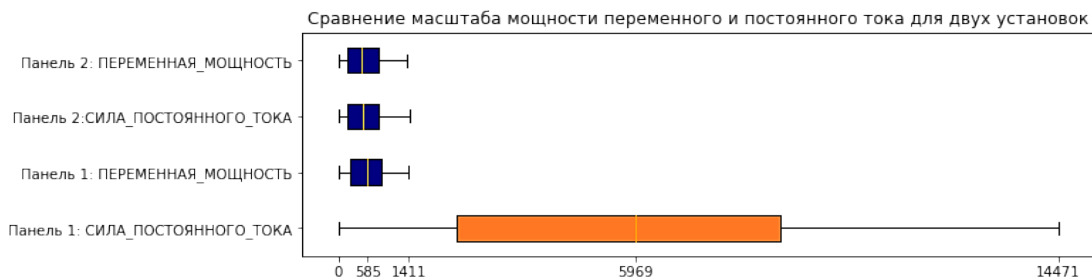


Рис. 2. Шкала мощности для двух установок

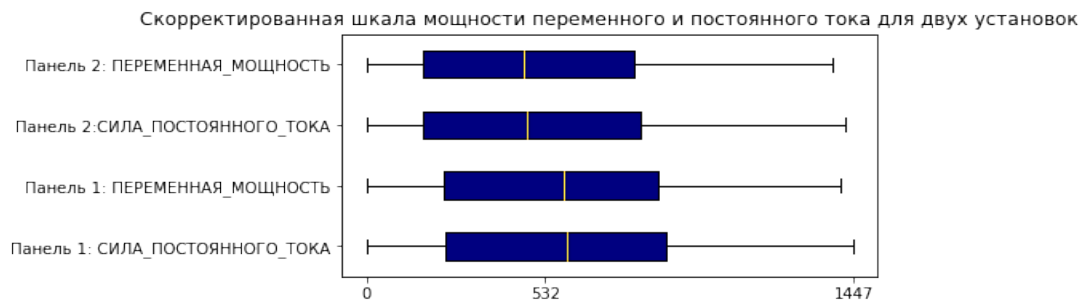


Рис. 3. Скорректированная шкала мощности для двух установок

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация форматов данных имеет решающее значение для сокращения объема памяти в больших наборах данных. Эта программа предоставляет пример того, как оптимизировать форматы данных набора данных о производстве солнечной энергии, чтобы уменьшить объем памяти. Программа выполняет предварительный анализ данных, оптимизирует форматы данных и выполняет дополнительный анализ для сравнения эффективности двух установок. Программа может быть использована в качестве шаблона для оптимизации форматов данных других больших наборов данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gorshenin A., Vasina D. Study of Methods for Forecasting Wind Power Generation Based on the Processing of Meteorological Data // 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russian Federation. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014925.
2. Тюньков Д. А., Грицай А. С., Сапилова А. А. [и др.]. Нейросетевая модель для краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4(80). С. 145–158. DOI 10.17212/1814-1196-2020-4-145-158.
3. Тюньков Д. А., Сапилова А. А., Грицай А. С. [и др.]. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 4–10. DOI 10.18503/2311-8318-2020-3(48)-4-10.
4. Pérez-Romero J., Lujano-Rojas J. M., Bremen L. Solar power forecasting: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. Pp. 10–28.
5. Zhang J., Li X., Yan W., Yang Y. A novel hybrid model for solar power forecasting using deep learning and auto-regressive integrated moving average // Renewable Energy. 2020. Vol. 146. Pp. 677–692.
6. Azaza O. S., Khiari M. Prediction of photovoltaic system performance using machine learning algorithms: A review // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 227. P. 113737.
7. Hong T., He W., Zeng Q. Solar power prediction based on machine learning and its application in energy internet // Energy. 2018. Vol. 153. Pp. 990–999.
8. Shuai Y., Shu L., Xu C., Li J. Deep Learning-Based Solar Power Forecasting Models: A Survey // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 13955–13967.

УДК 621.6.03

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-46-50

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

PROSPECTS FOR THE USE OF MODIFIED COOLANT IN SOLAR COLLECTORS

О. В. Вдовин, Е. Н. Слободина, А. Г. Михайлов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

O. V. Vdovin, E. N. Slobodina, A. G. Mikhailov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье представлен обзор работ, по изучению влияния использования наножидкостей в концентрирующих параболических солнечных коллекторах, за последние годы. Описано устройство солнечного коллектора, его особенности и принцип работы. Представлены основные уравнения для нахождения тепловых характеристик параболического солнечного коллектора, модели для нахождения основных теплофизических свойств наножидкости таких как: плотность, теплоемкость, вязкость и теплопроводность. Проведен анализ исследований в области использования различных наножидкостей в концентрирующих параболических солнечных коллекторах.

Ключевые слова: концентрирующий, параболический, солнечный коллектор, наножидкости, эффективность, теплопередача, теплофизические свойства

Abstract. The article presents an overview of the work on the study of the influence of the use of nanofluids in concentrating parabolic solar collectors in recent years. The device of a solar collector of this type, its features and principle of operation are described. The basic equations for finding the thermal characteristics of a parabolic solar collector are presented, as well as models for finding the main thermophysical properties of a nanofluid such as density, heat capacity, viscosity and thermal conductivity. The analysis of research in the field of the use of various nanofluids in concentrating parabolic solar collectors is carried out.

Keyword: concentrating, parabolic, solar collector, nanofluids, efficiency, heat transfer, thermophysical properties.

I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный рост спроса на энергию приводит к неизбежному истощению ресурсов ископаемого топлива, увеличению загрязнения окружающей среды и повышению затрат на производственные нужды. Поэтому, за последние два десятилетия, непрерывно растет и спрос на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Возобновляемые источники энергии включают в себя солнечную энергию, геотермальную энергию, энергию биотоплива, энергию морских волн и т.д.

Солнечная энергия является одной из самых чистых форм возобновляемых источников энергии и наиболее актуальной темой, когда речь заходит о ВИЭ, из-за ее простоты, доступности и незначительного технического обслуживания. В отличие от других возобновляемых источников энергии, она может быть использована напрямую.

Методы преобразования солнечной энергии, в основном, можно разделить на фотоэлектрические и тепловые. Тепловые системы преобразуют солнечную энергию в тепловую, а фотоэлектрические в электрическую. Тепловые системы могут поглощать более 95% поступающего солнечного излучения.

Солнечный коллектор – это особый тип теплообменника, в котором происходит теплообмен между лучистой энергией от удаленного источника и рабочей жидкостью, протекающей в коллекторе. Солнечные кол-

лекторы подразделяются на концентрирующие и не концентрирующие. Параболический солнечный коллектор является одним из видов концентрирующих солнечных коллекторов и преобразует лучистую энергию солнца в тепловую посредством концентрации солнечных лучей на трубе с рабочей жидкостью.

Обычно в качестве теплоносителей используют такие жидкости как: вода, моторное масло, этилен/пропиленгликоль, высокотемпературные органические и синтетические теплоносители. Однако эти «обычные» рабочие жидкости имеют очень низкие тепловые свойства по сравнению с твердыми телами (низкий коэффициент теплопроводности), поэтому скорость теплопередачи в тепловых процессах сравнительно невелика. Решением данной проблемы может послужить применение наножидкости в качестве теплоносителя.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наножидкость представляет собой жидкость, в которой содержатся частицы нанометрового размера, называемые наночастицами. Наночастицы, используемые в наножидкостях, обычно изготавливаются из металлов, оксидов, карбидов или углеродных нанотрубок. Это относительно новый вид жидкостей, теплофизические свойства которых активно изучаются многими исследователями всего мира. Эффективность и компактность теплового оборудования повышается за счет улучшения теплопередающих свойств рабочих жидкостей, что также приводит к снижению капитальных и эксплуатационных затрат [1].

В данной работе представлено обобщение исследований, проведенных в области концентрирующих параболических солнечных коллекторов с использованием различных наножидкостей, отличающихся концентрацией, формой и материалом наночастиц. Выполнен анализ полученных результатов относительно производительности, теплообмена и тепловой эффективности концентрирующих параболических солнечных коллекторов, при использовании наножидкостей в качестве теплоносителя.

III. ТЕОРИЯ

Концентрирующий параболический солнечный коллектор используется для нагрева теплоносителя. Устройство солнечного коллектора данного типа представлено на рис. 1. Коллектор состоит из параболического желоба и, закрепленной над ним, поглощающей трубки. Солнечные лучи падают на параболический желоб, отражаются и преломляются, концентрируясь на поглощающей трубке. Поглощающая трубка имеет очень важную роль в солнечном коллекторе, поскольку является основным теплообменным элементом. В основном эти трубки изготавливают из меди и нержавеющей стали. Производительность концентрирующего параболического солнечного коллектора может быть улучшена путем нанесения некоторых селективных материалов на поглощающую трубку. Одним из методов минимизации тепловых потерь от солнечного коллектора является создание вокруг поглощающей трубки вакуума. Такая трубка получила название – вакуумная трубка солнечного коллектора.

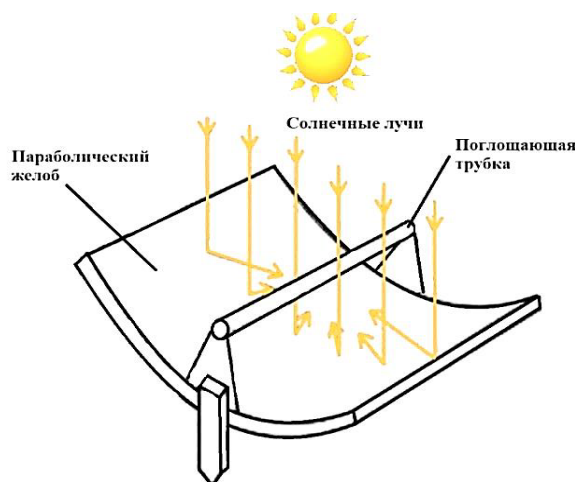


Рис. 1. Схематичное устройство концентрирующего параболического солнечного коллектора

В основе расчета характеристик солнечного коллектора таких, как теплопроизводительность и коэффициент полезного действия, лежит энергетический баланс. Располагаемая солнечная энергия (Q_c) для параболического солнечного коллектора определяется как произведение площади параболического желоба ($F_{п.ж}$) и интенсивности солнечного излучения (G_u) в соответствии с уравнением (1).

$$Q_c = F_{п.ж} \cdot G_u \quad (1)$$

Полезная энергия (Q_n), поглощенная солнечным коллектором, может быть рассчитана двумя способами – используя уравнение (2) для нахождения количества теплоты при нагревании теплоносителя и с помощью уравнения (3) описывающего теплоотдачу от поглощающей трубки к теплоносителю.

$$Q_n = m \cdot c_p \cdot (T_{вых} - T_{вх}) \quad (2)$$

$$Q_n = \alpha_{жс} \cdot F_{ст} \cdot (T_{ст} - T_{жс}) \quad (3)$$

В общем случае, коэффициентом полезного действия солнечного коллектора можно считать отношение полезной энергии, поглощенной солнечным коллектором, к располагаемой солнечной энергии, и выразить уравнением (4):

$$\eta = \frac{Q_n}{Q_c} \quad (4)$$

В уравнении (3) используется коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{жс}$) между трубкой и теплоносителем. Этот параметр определяется характеристиками потока и свойствами теплоносителя. Расчет коэффициента теплоотдачи через число Нуссельта является наиболее привычным методом и выражен уравнением (5).

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (5)$$

Традиционная критериальная зависимость для нахождения числа Нуссельта для турбулентного течения теплоносителя в трубе выражается уравнением (6), в котором используются числа Рейнольдса и Прандтля.

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (6)$$

Числа Рейнольдса и Прандтля находятся с помощью уравнения (7) и уравнения (8), которые включают в себя скорость теплоносителя (w), характерный размер (d), кинематическую вязкость (ν), динамическую вязкость (μ), теплоемкость (c_p) и теплопроводность (λ) теплоносителя.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (8)$$

Как видно из выше представленных уравнений большую значимость на эффективность солнечного коллектора оказывает режим течения теплоносителя и его теплофизические свойства, входящие в состав этих уравнений.

Наножидкости получают путем диспергирования твердых частиц размером 1-100 нанометров в базовой жидкости. Базовыми жидкостями могут быть вода, этиленгликоль, пропиленгликоль, различные органические и синтетические масла и т.д. При использовании наножидкостей в качестве теплоносителя, большое влияние на теплообмен оказывают их теплофизические свойства. Важнейшими теплофизическими свойствами наножидкостей являются – плотность, удельная теплоемкость, удельная теплопроводность и динамическая вязкость, которые могут быть оценены с помощью существующих моделей или экспериментов.

Основные существующие модели определения основных теплофизических свойств наножидкости описаны в работе [2].

Как можно увидеть из представленных моделей, теплофизические свойства наножидкости зависят от концентрации и характеристик наночастиц (размер и форма) и от изначальных теплофизических свойств базовой жидкости и материала наночастиц.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Интерес к модифицированным теплоносителям с каждым годом растет, поэтому имеются многочисленные исследовательские работы по повышению эффективности солнечных коллекторов с использованием наножидкостей.

Bellos и Tzivanidis в своем исследовании [3] отметили увеличение эффективности солнечного коллектора на 0,34 % и 0,341 % при использовании двух наножидкостей на основе Syltherm 800 с наночастицами Al_2O_3 и TiO_2 . В работе [4] Kasaiean и соавторы использовали в параболическом солнечном коллекторе наножидкости на основе термального масла с наночастицами МУНТ, и обнаружили увеличение конвективной теплопередачи на 15% по сравнению с базовой жидкостью. Vijayan и соавторы в своей работе [5] исследовали применение наножидкости на основе деионизированной воды с наночастицами Al_2O_3 в параболическом солнечном коллекторе и наблюдали возрастание эффективности коллектора с увеличением массовой скорости потока, концентрации наночастиц в наножидкости. Эффекты температурного профиля, типа наночастиц и характеристик теплопередачи исследованы Fahim и соавторами [6] для трехразличных наножидкостей (все на основе термального масла с различными наночастицами – Cu , Al_2O_3 и TiO_2), в данной работе зафиксировано улучшение теплопередачи в солнечном коллекторе с увеличением концентрации наночастиц в термальном масле, а наножидкость с наночастицами Cu имеет наибольшее число Нуссельта. Экспериментальное исследование [7] по применению наножидкости на основе воды с углеродными нанотрубками и поверхностно активным веществом Triton X-100 провели Gautam и Chudasama и установили, что наножидкость, при определенном массовом расходе и концентрации наночастиц, обеспечивает максимальную тепловую эффективность коллектора, которая на 22% выше, чем у воды.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех рассмотренных исследованиях наблюдается улучшение тепловых характеристик, концентрирующих параболических солнечных коллекторов, при использовании наножидкостей в качестве теплоносителя. В большинстве работ в качестве базовой жидкости использовали термические масла и воду, а в качестве наночастиц Al_2O_3 , CuO , Cu , TiO_2 и МУНТ. Увеличение эффективности солнечных коллекторов варьируется в широком диапазоне от 0,34 % до 22 %. Большой разбег в полученных результатах можно объяснить различными условиями исследований. В представленных трудах использовались наножидкости с различной концентрацией, формой и материалами наночастиц. Во многих работах исследователи выявляли зависимость интенсивности теплообмена от таких параметров, как температура наножидкости и скорость движения теплоносителя в солнечном коллекторе.

В большинстве работ исследователи придерживались небольшой концентрации наночастиц (до 1 %), что довольно хорошо повышает эффективность параболического солнечного коллектора, не создает излишней нагрузки на насос, перекачивающий теплоноситель.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ исследований применения наножидкостей в концентрирующих параболических солнечных коллекторах показал, что тепловые характеристики коллектора улучшаются в зависимости от свойств и характеристик наножидкости.

Рассмотренные работы показывают потенциал использования наножидкостей в качестве теплоносителя, как высокоэффективного и довольно простого средства повышения производительности и эффективности солнечных коллекторов и необходимость дальнейших исследований.

Эти результаты служат предпосылками к созданию высокоэффективного солнечного коллектора с модифицированным теплоносителем с улучшенными теплофизическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Efsthios E. (Stathis) Michaelides. *Nanofluidics. Thermodynamic and Transport Properties*. Springer International Publishing, 2014. 335 p. ISBN 978-3-319-05620-3.
2. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободина Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-73-78.
3. Bellos E., Tzivanidis C. Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018. Vol. 26. Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.seta.2017.10.005.
4. Kasaiean A., Sameti M., Daneshazarian R., Noori Z., Adamian A., Ming T. Heat transfer network for a parabolic trough collector as a heat collecting element using nanofluid // *Renewable Energy*. 2018. Vol. 123. P. 439–449. DOI: 10.1016/j.renene.2018.02.062.
5. Vijayan G., Shantharaman P. P., Senthil R., Karunakaran R. Thermal performance analysis of a low volume fraction Al₂O₃ and deionized water nanofluid on solar parabolic trough collector // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. DOI: 10.1007/s10973-020-10313-w.
6. Fahim T., Laouedj S., Abderrahmane A., Alotaibi S., Younis O., Ali H.M. Heat Transfer Enhancement in Parabolic through Solar Receiver: A Three-Dimensional Numerical Investigation // *Nanomaterials*. 2022. Vol 12. P. 419. DOI: 10.3390/nano12030419.
7. Gautam P. M., Chudasama M. K. An Experimental Investigation of Parabolic Trough Collector using Industrial-grade Multiwall Carbon Nanotube-H₂O Based Nanofluid // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2022. Vol. 35. Pp. 112–120. DOI: 10.5829/ije.2022.35.01a.10.

УДК 621.313

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-51-53

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД НАСОСНОЙ СТАНЦИИ АВОЦИСТЕРНЫ

ELECTRIC DRIVE OF THE TANK TRUCK PUMPING STATION

Н. С. Ганин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

N. S. Ganin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В процессе транспортировки жидкостей, установка насосной станции на автоцистерне является обязательной. Электродвигатель привода насосной станции питается от генератора, установленного на двигателе автомобиля. Исходя из поставленной задачи повышения энергоэффективности электрической системы привода насосной станции, рассматривается возможность использования более совершенных электродвигателей. Один из перспективных вариантов это замена коллекторного электромотора на бесколлекторный. Бесколлекторный электродвигатель обладает высоким коэффициентом полезного действия, что позволяет добиться значительного увеличения энергоэффективности системы. Если в распоряжении нет дополнительных источников питания, переоснащение насосной станции более совершенным электродвигателем является важным критерием для обеспечения энергоэффективной работы системы.

Ключевые слова: насосная станция, электрический привод, коллекторный электродвигатель, бесколлекторный электродвигатель, перекачивание жидкостей.

Abstract. In the process of transporting liquids, the installation of a pumping station on a tank truck is mandatory. The pumping station drive electric motor is powered by a generator installed on the vehicle engine. Based on the task of increasing the energy efficiency of the electric drive system of the pumping station, the possibility of using more advanced electric motors is being considered. One of the promising options is to replace the collector electric motor with a brushless one. The brushless motor has a high efficiency, which allows to achieve a significant increase in the energy efficiency of the system. If additional power sources are not available, retrofitting the pumping station with a more advanced electric motor is an important criterion for ensuring the energy efficient operation of the system.

Keyword: pumping station, electric drive, commutator electric motor, brushless electric motor, pumping liquids.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроприводом перекачивающих насосов зачастую выступают доступные и дешевые коллекторные (щёточные) электродвигатели (рис. 1).



Рис. 1. Коллекторный электродвигатель постоянного тока

В современном автомобильном производстве широко применяются агрегаты, основанные на электродвигателях постоянного тока, для перекачки топлива. Это обусловлено, прежде всего, высокой производительностью таких устройств, а также возможностью точного подбора мощности двигателя в зависимости от требований конкретного процесса.

Однако, при использовании электродвигателей в качестве привода для насосов в автомобилях существуют ограничения по питанию, связанные с техническими особенностями механизма. Часто автомобильный генератор может выдавать постоянное напряжение 12–24 В, которое подается на электродвигатель. В связи с этим, основным типом рассматриваемых электродвигателей являются двигатели постоянного тока. Несмотря на то, что на рынке существуют электродвигатели разной мощности, выбор конкретной модели должен учитывать требования и целевые задачи насосов в конкретном автомобиле. В целом, использование электродвигателей постоянного тока в автомобилях для перекачки топлива является эффективным и перспективным решением, которое продолжит широкое применение в будущем

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время увеличение энергоэффективности и мощности систем является одной из важнейших задач промышленности. Одним из возможных способов ее решения является замена коллекторных электродвигателей, которые характеризуются низкой энергоэффективностью, на бесколлекторные (бесщеточные) электродвигатели.

Бесколлекторные электродвигатели отличаются от коллекторных тем, что не требуют установки дополнительных источников питания и обеспечивают более высокий уровень энергоэффективности и мощности системы. Они позволяют существенно снизить издержки на энергопотребление и повысить эффективность работы устройств.

Выбор бесколлекторных электродвигателей, вместо коллекторных, является рациональным решением для повышения энергоэффективности систем без необходимости установки дополнительных источников питания. Это позволит увеличить мощность системы и снизить затраты на энергопотребление (рис. 2).

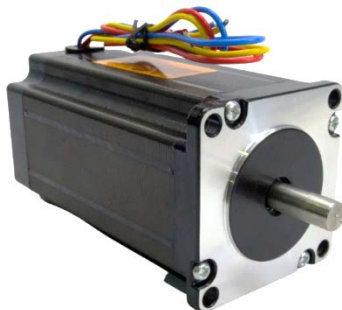


Рис. 2. Бесколлекторный электродвигатель

Такие двигатели встречаются в основном в устройствах с мощностью до 5 кВт, в более мощной аппаратуре их применение нерационально [1]. В данном случае мощность агрегата не будет превышать 500 Вт, что позволяет рассматривать такой вариант в работе.

III. ТЕОРИЯ

С постоянной уверенностью можно сообщить о растущем количестве бесколлекторных электромоторов на рынке, их привлекательной особенностью является высокий коэффициент полезного действия (КПД) около 90%, что превосходит коллекторные моторы со своими 60% КПД. Бесщеточные двигатели производят больше мощности, и при одинаковом источнике тока, они создадут более высокий крутящий момент на валу, по сравнению с коллекторными моторами. Благодаря отсутствию потерь на трение и искрообразования в электроприводе, насосы способны работать длительное время без перегрева в непрерывном режиме [2]. Особенно это ценно с учетом невысокой производительности шестеренных насосов, которые затрачивают больше времени на

перекачивание жидкостей. Таким образом, бесперебойная работа бесколлекторных электромоторов рассматривается как одно из главных достоинств, которое привлекает к себе внимание.

Инновационный вид электродвигателей, который не использует щетки, не только обеспечивает высокую энергоэффективность, но и имеет ряд других преимуществ. Такие двигатели гораздо легче и компактнее традиционных, что позволяет значительно уменьшить габаритные размеры и сделать их более удобными в использовании. Кроме того, за счет отсутствия искрообразования, они более безопасны при работе с горючими материалами, так как риск воспламенения сведен к минимуму. Один из ключевых показателей бесщеточных двигателей – это низкий уровень шума, что обеспечивает комфорт при их эксплуатации [3]. Эти факторы делают бесколлекторные электродвигатели более привлекательными для широкого спектра промышленных приложений и отмечены в ряде исследований.

Бесщеточные электродвигатели являются эффективным выбором для перекачивания вязких жидкостей благодаря высокому и стабильному моменту, который они выдают на валу. Особое внимание следует уделить тому факту, что вязкость масел увеличивается при понижении температуры, что приводит к ещё большим усилиям при перекачке. В то же время, такие двигатели обладают высокой энергоэффективностью и мощностью. Учитывая работу с маломощным источником питания, таким как автомобильный генератор, их энергоэффективность играет важную роль [4].

IV. Выводы и заключение

В настоящее время бесколлекторные электромоторы, несмотря на свой более высокий ценник по сравнению с коллекторными, получают все большее распространение. Это объясняется тем, что основной задачей при использовании подобного оборудования является оптимизация использования энергии генератора без использования дополнительных источников питания.

Также следует отметить, что бесколлекторные электромоторы демонстрируют более высокую производительность при перекачивании особо вязкой жидкости, что, в свою очередь, позволяет снизить затраты на энергию. Важным аспектом также является повышенная нагрузка при таком процессе, что увеличивает энергетические затраты установки. Однако замена коллекторных электромоторов бесколлекторными является успешным решением задачи оптимизации энергопотребления в таких условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Научный руководитель: Нестеренко Григорий Анатольевич, доцент, кандидат технических наук, Омский государственный технический университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двигатели постоянного тока. Строение и принцип действия приборов [Электронный ресурс] // svet202.ru: сайт. URL: <https://svet202.ru/kabeli/besshchetochnyj-motor.html> (дата обращения: 28.02.2023).
2. Коллекторные и бесколлекторные электродвигатели [Электронный ресурс] // dzen.ru: сайт. URL: <https://dzen.ru/a/XMK7VioVuwCzCYXI> (дата обращения: 01.03.2023).
3. Коллекторные и бесколлекторные электродвигатели. Плюсы и минусы сравниваемых двигателей. [Электронный ресурс] // samelectrik.ru: сайт. URL: <https://samelectrik.ru/sravnenie-kollektornogo-i-beskollektornogo-dvigatelya.html#beskollektornye-dvigateli> (дата обращения: 02.03.2023).
4. Ганин Н. С. Увеличение энергоэффективности электрического привода насосной станции автоцистерны для перекачивания вязких жидкостей // WORLD OF SCIENCE 2023: сборник статей III Междуна. науч.-исслед. конкурса. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2023. С. 11–14.

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-54-60

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF REMOVAL OF SUPPORTING STRUCTURES BY WIRE-CUT EDM

Д. В. Гаранин, А. А. Федоров, В. Г. Чуранкин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. V. Garanin, A. A. Fedorov, V. G. Churankin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований по удалению поддерживающих структур, полученных в процессе аддитивного производства методом селективного лазерного плавления. Удаление поддерживающих структур осуществлялось на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L. Главной целью исследования являлось снижение обрывов проволочного электрода-инструмента при удалении поддержек. Методом оптической микроскопии показано, что решетчатое строение поддерживающих структур имеет различные дефекты и варьирующуюся толщину, что является одной из причин выбора неоптимальных режимов резания. По результатам исследования предлагается алгоритм выбора оптимальных режимов резания.

Ключевые слова: поддерживающие структуры, удаление поддерживающих структур, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, аддитивные технологии, аддитивное производство

Abstract. This paper presents the results of studies on the removal of supporting structures obtained during additive production by selective laser melting. Removal of supporting structures was carried out on the Sodick VZ 300L wire-cut electric erosion machine. The main purpose of the study was to reduce the breakage of the wire electrode-tool when removing supports. By optical microscopy, it is shown that the lattice structure of the supporting structures has various defects and varying thickness, which is one of the reasons for choosing suboptimal cutting modes. Based on the results of the study, an algorithm for choosing optimal cutting modes is proposed.

Keyword: remove support, wire electrical discharge machining, additive technology.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии получают распространение в самых различных областях производства – от медицинских имплантатов до деталей, являющихся компонентами авиационных двигателей [1-3]. Аддитивные технологии представляют значительный интерес благодаря тому, что позволяют создавать изделия, которые классическими субтрактивными методами получить невозможно или крайне сложно. Одной из особенностей аддитивных технологий является необходимость создания поддерживающих структур (т.н. поддержек) в процессе создания изделия, которые затем необходимо удалять. При создании поддержек необходимо рассматривать удобство и возможность их последующего удаления, поскольку в ряде случаев они генерируются в крайне труднодоступных местах. Помимо удобства, так же необходимо учитывать положение ответственных поверхностей относительно генерируемых поддержек. Удаление поддержек производится различными методами: механическим, слесарным, ЭХО, ЭЭО и т.д. [4].

Механическое удаление поддержек применимо, когда полученное изделие является полуфабрикатом и дальнейшая механическая обработка детали и поддержек не приведет к возникновению дефектов в готовом изделии. Удаление поддержек слесарным методом в значительной степени зависит от человеческого фактора.

Кроме того, может вызывать появление микротрещин и вырывание части поверхностного слоя деталей вместе с поддержкой.

При удалении поддержек на тонкостенных и маложестких деталях возникающие силы резания при обработке могут деформировать деталь. Поэтому возникает необходимость разработки и совершенствования технологий, в основе которых лежат электрофизические или электрохимические методы и отсутствуют силы резания. Одним из эффективных бездеформационных способов обработки является проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПЭЭО). При использовании ПЭЭО силы резания отсутствуют, что приводит к отсутствию деформации детали при обработке и сохранению исходных геометрических параметров [5]. Однако при удалении поддержек методом ПЭЭО возникает проблема обрывов проволочного электрода инструмента и увеличению времени обработки. Данная проблема требует научного подхода при ее решении, поскольку прямая корректировка режимов обработки не приводит к снижению количества обрывов проволоки.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для понимания процесса ПЭЭО удаления поддержек, необходимо установить причины выхода маркера стабильности обработки в режим HARD и возникновения обрывов проволочного электрода инструмента.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА

3. Печать образцов методом селективного лазерного плавления

В данном исследовании проводилось удаление поддержек с образцов, напечатанных из порошка, ПР-12X18Н10Т. Порошок соответствует ТУ 14-123-261-2020. Размеры частиц порошка от 20 до 63 мкм. Образцы были напечатаны на аддитивной установке SLM 280HL. Размеры образцов 10×10×30 мм, количество образцов 3 штуки. Напечатанные образцы имели различные параметрами поддержек: сетка поддержки 0.7×0.7 мм, 1.2×1.2 мм и 1.5×1.5 мм. Высота напечатанных поддержек - 5 мм. На рисунке 1а изображены модели напечатанных образцов с поддержками в программном обеспечении для подготовки печати Materialise Magics 24.1, а на рисунке 1б – напечатанные образцы. Для печати были выбраны следующие режимы: мощность лазерного излучения – 295 Вт, скорость сканирования лазерного луча – 705 мм/с, расстояние между треками – 130 мкм, высота порошкового слоя – 30 мкм, печать производилось в атмосфере азота с постоянным подогревом платформы до 90°C. Отжиг образцов производился по при температуре 700°C в течении 2-х часов.

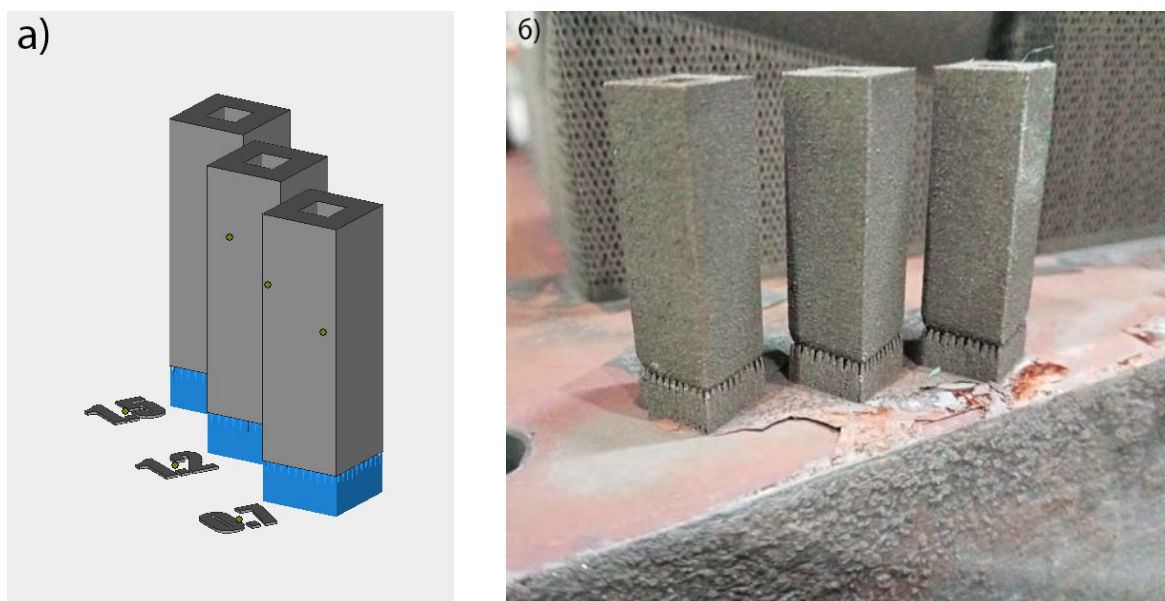


Рис. 1. Внешний вид образцов:

- а) подготовленных для печати в ПО Materialise Magics;
- б) Напечатанные образцы из стали 12X18Н10Т после стабилизирующего отжига

4. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка напечатанных образцов

Удаление поддержек производилось на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ 300L. В качестве электрод-инструмента использовалась твердая латунная проволока (Cu-60%; Zn-40%) диаметром 0.2 мм. Обработка производилась в среде деионизированной воды, в режиме “Close” со следующими параметрами: ON 4.5 мкс; OFF 7.5 мкс; IP 2215; MAO 270; SV +055.0; V8.0; SF 0085; WK 020; WT120; WS 130; WP 050. Удаление поддержки производилось за 1 рабочий проход, в процессе обработки маркер стабильности обработки постоянно находился в зоне HARD, что говорит о нестабильной обработке и повышенной вероятности обрыва проволоки. Данная проблема потребовала дополнительного исследования структуры поддержек на микроуровне для понимания процесса их формирования и последующего удаления с оптимальными режимами.

Для проведения исследования из отрезанных фрагментов поддерживающих структур были изготовлены поперечные микрошлифы (рис. 2).

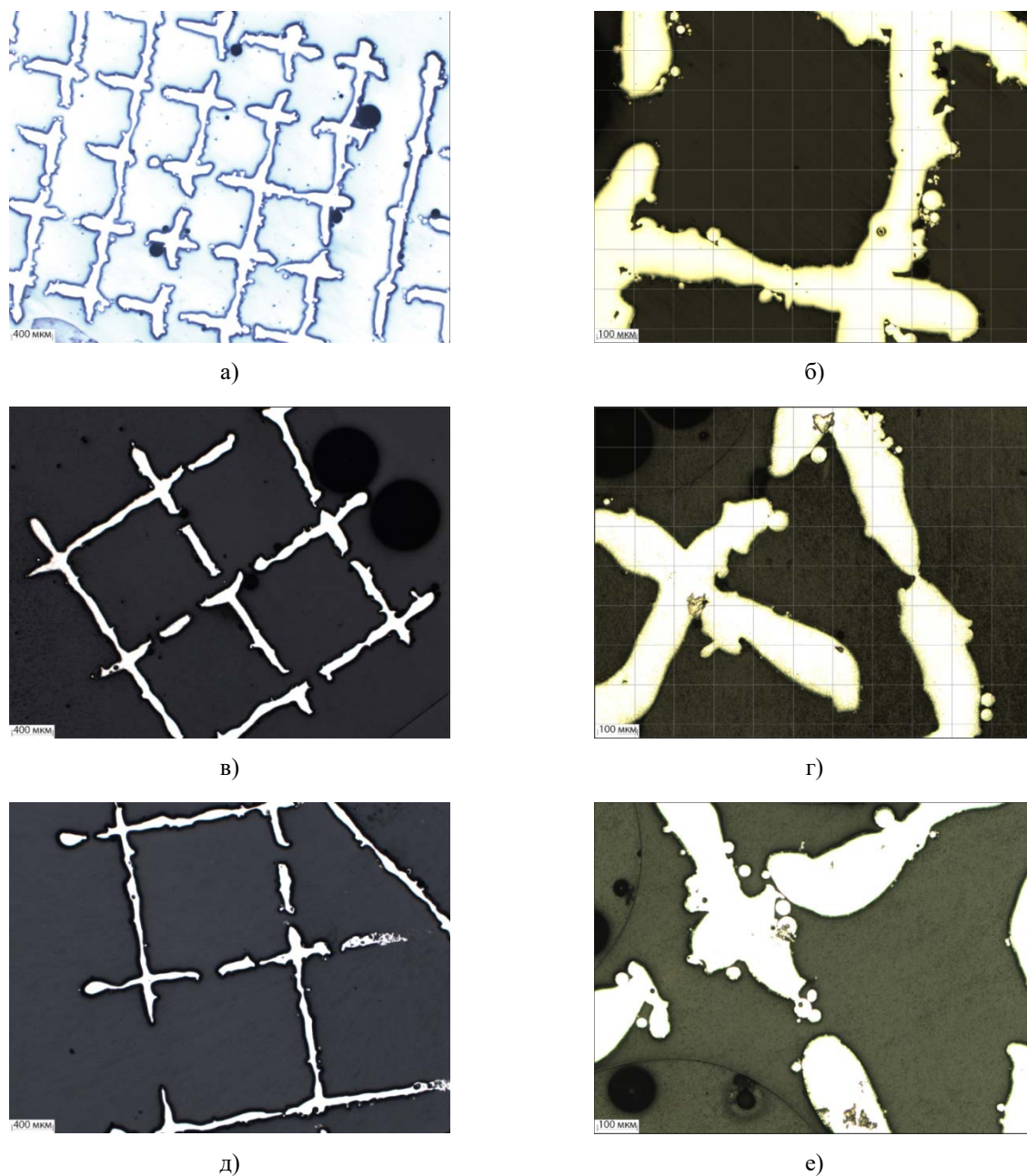


Рис. 2. Микрофотографии поддерживающих структур с различным периодом:

а) 0.7 мм, 25×; б) 0.7 мм, 100×; в) 1.2 мм, 25×; г) 1.2 мм, 100×; д) 1.5 мм, 25×; е) 1.5 мм, 100×

Для заливки образцов использовалась двухкомпонентная эпоксидная смола EpoхAmite HT. Приготовление смолы и заливка проводились при температуре 20°C. После смешивания компонентов, в форму заливало 5 грамм смолы, затем образцы укладывались в форму и заливалась остальная часть смолы. Такой порядок приготовления был обусловлен хрупкостью образца и наличием у него замкнутых контуров, которые смола не способна заполнить. Полимеризация смолы осуществлялась в вакуумной камере при давлении вакуума -0.8 кгс/см² в течение 24 часов.

Дальнейшее изготовление микрошлифов производилось по нестандартной методике в виду хрупкости образцов. На первом этапе шлифование образцов с выведением плоскости шлифа производилось на шлифовальной водостойкой бумаге SiC P400. На втором этапе образец проходил процедуру шлифования на водостойкой шлифовальной бумаге SiC P800 с выдерживанием перпендикулярного направления шлифования по отношению к предыдущему этапу. Далее производили полирование образцов 9 мкм поликристаллической двухкомпонентной алмазной суспензией АТМ (Германия), затем 3 мкм поликристаллической двухкомпонентной суспензией Microdiamant (Швейцария). Последний этап представлял доводку 50 нм суспензией оксида алюминия Al₂O₃ в течение 2 минут с добавлением дистиллированной воды в последние 30 секунд полирования.

Исследование нетравленных микрошлифов проводилось методом оптической микроскопии с использованием микроскопа AxioObserver A1 (Carl Zeiss) при увеличении 25-100×

В процессе ЭЗО существенное влияние оказывают режимы обработки. Одним из важнейших параметров является толщина обрабатываемого изделия. В зависимости от заданной толщины обработки система ЧПУ станка рассчитывает остальные режимы резанья. Так как поддержки представляют собой решетчатую структуру, необходимо рассчитать фактическую среднюю толщину обрабатываемого материала. Для измерения толщины на снимки микрошлифов была нанесена сетка 100×100 мкм, затем была измерена толщина поддержки в месте каждого пересечения с вертикальной линией сетки (рисунок 3).

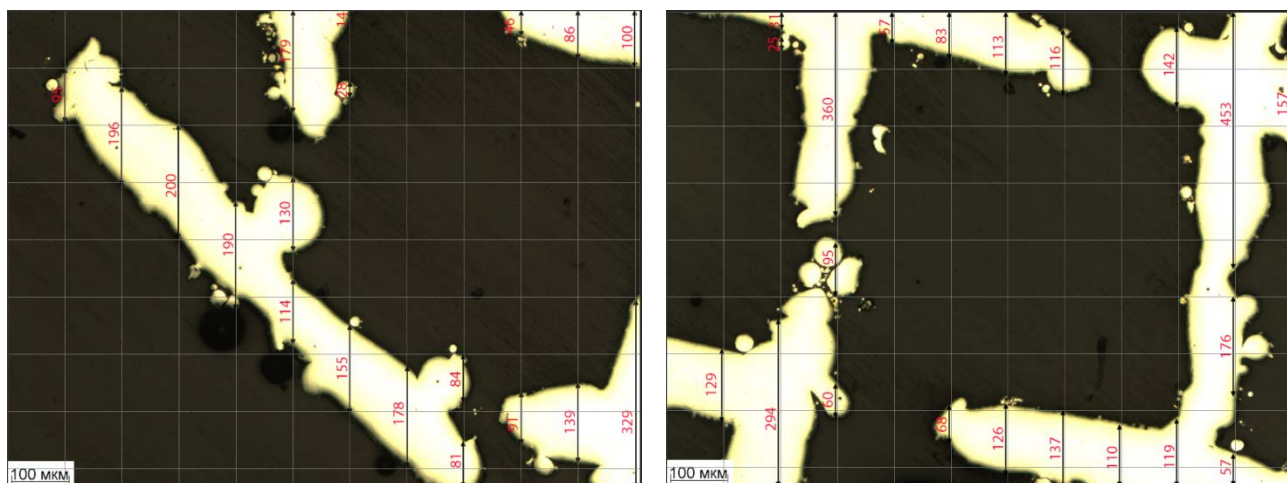


Рис. 3. Микрофотографии поддерживающих структур 0.7×0.7 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

Результаты измерений срезаемого слоя на образце с сеткой 0.7×0.7 мм на каждой из линий были занесены в таблицу 1. В таблице по горизонтали представлены номера снимков микрошлифов, а по вертикали номера линий слева направо в порядке измерений. Измерения показывают, что средний размер срезаемого слоя составляет 256-257 мкм при полной высоте снимка 0.836 мм. Так как общая толщина сплошного образца составляет 10 мм, то в среднем на всей высоте образца суммарная толщина срезаемых поддержек составляет 3.06 мм.

Образцы с шагом поддержек 1.2×1.2 мм, 1.5×1.5 мм были проанализированы аналогичным образом. На снимки также была нанесена сетка и расставлены размеры толщин срезаемого слоя в местах пересечения вертикальных линий сетки с поддержками (рисунок 4, 5).

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 0.7×0.7 мм (мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение по линиям, мкм
1	349	636	437	501	95	427	129	557	440	588	416
2	382	432	245	76	196	745	350	120	479	375	340
3	314	250	65	65	200	243	515	137	98	130	202
4	46	130	105	198	190	100	57	78	117	153	117
5	111	87	161	250	423	70	151	89	105	159	161
6	167	121	161	298	197	167	239	156	152	200	186
7	163	394	465	385	178	171	253	396	138	354	290
8	395	370	526	485	165	414	110	782	586	225	406
9	338	159	131	223	137	540	261	282	293	325	269
10	262	–	139	88	225	140	686	126	183	224	230
11	125	–	–	–	429	102	157	149	386	30	197
Среднее по снимкам, мкм	241	287	243	257	221	284	264	261	271	251	256-257

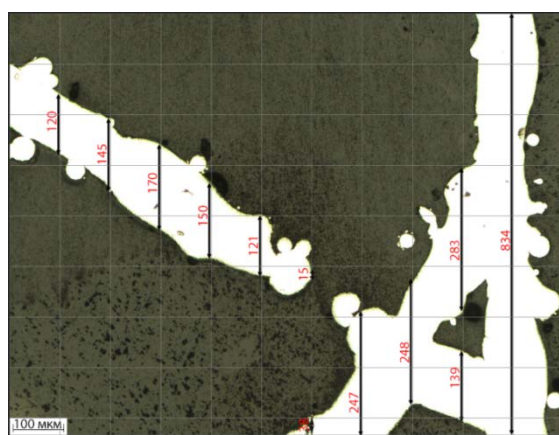
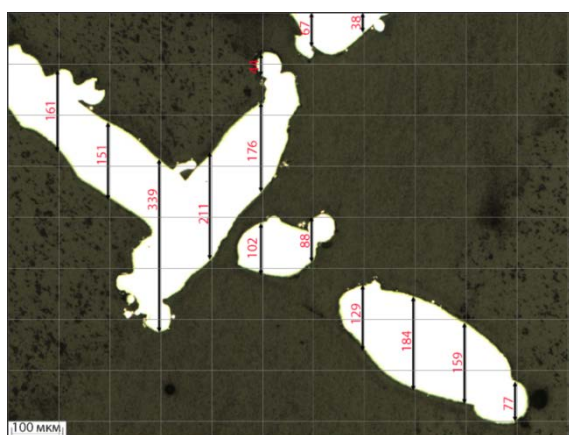


Рис. 4. Микрофотографии поддерживающих структур 1.2×1.2 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

В таблице 2 представлены сводные данные по измерениям всех снимков для образца с сеткой 1.2×1.2 мм. Толщина срезаемого слоя в пределах одного снимка составила 206-207 мкм, а при пересчете на высоту всего образца толщина обрабатываемого материала – 2.46 мм.

ТАБЛИЦА 2
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 1.2×1.2 мм

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
1	410	365	161	155	335	120	149	144	149	103	209
2	389	302	151	53	217	145	155	156	87	113	177
3	233	317	339	63	131	170	143	137	62	149	174
4	140	214	211	88	79	150	333	270	371	155	201
5	118	322	322	243	199	121	439	368	345	136	261
6	90	238	155	228	319	53	155	411	277	144	207

Окончание табл. 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
7	121	315	167	27	226	247	105	133	154	360	185
8	134	310	184	264	244	249	108	151	—	561	248
9	142	335	159	86	135	422	97	101	—	482	218
10	125	45	77	—	275	834	95	121	—	113	211
11	123	—	—	—	320	—	143	124	—	—	178
Среднее по снимкам, мкм	184	276	193	134	226	251	175	192	206	232	206-207

В таблице 3 представлены значения для третьего образца с сеткой поддержки 1.5×1.5 мм. Всего для каждого образца было проанализировано по 10 снимков. На рисунке 5 представлены снимки с размерами для третьего образца.

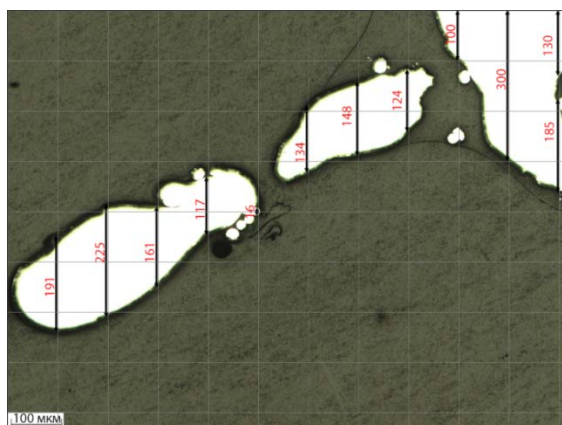


Рис. 5. Микрофотографии поддерживающих структур 1.5×1.5 мм с нанесенной сеткой и значениями толщины (мкм) в месте пересечения

ТАБЛИЦА 3
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОБРАЗЦА С СЕТКОЙ 1.5×1.5 ММ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее по линиям, мкм
1	123	129	86	191	107	198	141	155	155	154	144
2	73	290	44	225	139	197	166	84	84	238	154
3	61	145	105	161	282	240	148	422	422	157	214
4	98	138	122	117	278	215	156	201	201	251	178
5	175	174	177	16	34	194	324	285	285	200	186
6	233	120	129	134	235	101	264	425	425	315	238
7	706	148	207	148	437	21	219	304	304	335	283
8	121	95	130	124	271	112	188	125	125	374	167
9	122	—	146	100	85	113	—	34	34	153	98
10	106	—	71	300	149	111	—	14	14	187	119
11	122	—	—	315	125	129	—	542	542	—	296
Среднее по снимкам, мкм	176	155	122	166	195	148	201	235	235	236	187-189

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Так как система ЧПУ проволочно-вырезного станка Sodick VZ300L имеет встроенную базу режимов обработки, то их необходимо откорректировать в нестандартных ситуациях, таких как удаление решетчатых поддерживающих структур. Система ЧПУ не имеет возможности задать конкретную толщину обрабатываемого материала, в наличии имеется только возможность выбора ближайшего значения из стандартного ряда. Стандартный ряд имеет ограничение в виде минимальной высоты заготовки в 5 мм. Проведенные измерения суммарной толщины поддерживающих структур показывают, что при их удалении с помощью ПЭЭО, фактическая толщина срезаемого слоя может быть значительно меньше 5 мм, что требует корректировки параметров обработки станка.

Для повышения стабильности обработки необходимо исследовать влияние занижения параметров ON, OFF и EPA минимум на 30%. Также необходимо провести исследования по удалению поддержек, суммарная толщина которых будет превышать минимальные 5 мм, заданные в ЧПУ, вероятно в таком случае маркер стабильности не будет переходить в зону HARD и количество обрывов проволоки снизится.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе удаления поддержек методом проволочной электроэрозионной обработки на стабильность процесса могут оказывать различные факторы. Одним из них может являться несоответствие реальной толщины обрабатываемого материала той, которая указана в системе ЧПУ станка. Анализ микрошлифов удаленных поддержек показал, что при их удалении фактически материал составляет 20-30% от планируемой толщины реза. Таким образом, для того, чтобы устранить проблему обрывов проволоки необходимо: 1) ввести поправочный понижающий коэффициент, позволяющий пересчитать реальное количество срезаемого материала, или 2) вручную корректировать режимы резания, такие как ON, OFF и EPA.

Кроме указанных причин выхода маркера стабильности обработки в зону HARD, при удалении поддержек, могут быть и другие причины. Одна из них может быть связана с тем, что кроме образования стандартного шлама в процессе обработки, дополнительные коррективы в процесс могут вносить частицы порошка, которые не были удалены в результате постобработки изделий после печати, а также частицы, которые были приплавлены к основным частицам поддержки, но тем не менее, были оторваны высоким давлением прокачиваемой жидкости или газового пузыря в процессе обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leary M., Mazur M., Elambasseril J., McMillan M., Chirent T., Sun Y., Qian M., Easton M., Brandt M., Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures // Mater. Des. 2016. Vol. 98. Pp. 344–357. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.02.127.
2. Günther J., Leuders S., Koppa P., Tröster T., Henkel S., Biermann H., Niendorf T. On the effect of internal channels and surface roughness on the high-cycle fatigue performance of Ti-6Al-4V processed by SLM // Mater. Des. 2018. Vol. 143. Pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.01.042.
3. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A, Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties // Prog. Mater. Sci. 2018. Vol. 92. Pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
4. Cao Q.[et al.]. Removability of 316L stainless steel cone and block support structures fabricated by Selective Laser Melting (SLM) //Materials & Design. 2020. Vol. 191. P. 108691.
5. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M. Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process // CIRP Annals. 2005. Vol. 54. Pp.64–87. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60020-1.

ЗНАЧЕНИЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ

THE SIGNIFICANCE OF DATA ANALYSIS IN WIND POWER GENERATION FORECASTING

А. Ю. Горшенин, Д. И. Васина

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

A. Y. Gorshenin, D. I. Vasina

Omsk state technical university, Omsk, Russia

Аннотация. В статье обсуждается важность анализа данных при прогнозировании выработки энергии ветром. Изменчивость выработки энергии ветром создает проблемы для операторов электросетей, и точное прогнозирование имеет важное значение для эффективных решений по управлению энергопотреблением. В статье подчеркивается важность анализа данных для выявления тенденций, закономерностей и выбросов в данных, которые являются важнейшими исходными данными для моделей прогнозирования. В нем также подчеркивается важность разделения выборочных данных на соответствующие обучающие и тестовые наборы на основе ежемесячных выборок для повышения точности. В статье подчеркивается важность надлежащего анализа данных для повышения точности и надежности прогнозируемых результатов.

Ключевые слова: энергия ветра, возобновляемые источники энергии, анализ данных, прогнозирование, производство электроэнергии, управление энергопотреблением, точность, надежность, изменчивость.

Abstract. This article discusses the importance of data analysis in wind power generation forecasting. The variability of wind power generation creates challenges for power grid operators, and accurate forecasting is essential for effective energy management solutions. The article emphasizes the significance of data analysis for identifying trends, patterns, and outliers in the data, which are crucial inputs for forecasting models. It also emphasizes the importance of dividing the sample data into appropriate training and test sets based on monthly samples to improve accuracy. The article highlights the significance of proper data analysis in improving the accuracy and reliability of predicted results.

Keyword: wind power, renewable energy, data analysis, forecasting, power generation, energy management, accuracy, reliability, variability

I. ВВЕДЕНИЕ

Возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра, приобретают все большее значение по мере того, как мы стремимся к более устойчивому будущему. Однако изменчивость выработки энергии ветром создает проблему для операторов энергосистем, которые должны балансировать спрос и предложение электроэнергии в режиме реального времени [1]. Точное прогнозирование выработки энергии ветром может предоставить операторам сетей ценную информацию, позволяющую им лучше управлять сетью и снизить зависимость от невозобновляемых источников энергии [2].

Прежде чем приступить к прогнозированию выработки энергии ветром, крайне важно провести тщательный анализ данных [3]. Этот шаг включает в себя обработку, очистку и изучение имеющихся данных для обеспечения их точности, полноты и непротиворечивости. Без надлежащего анализа данных результаты прогнозирования могут быть ненадежными и неточными, что приводит к неоптимальным решениям по управлению энергопотреблением [4].

Анализ данных позволяет идентифицировать тенденции, закономерности и выбросы в данных, которые являются важнейшими исходными данными для моделей прогнозирования [5]. Это также помогает в обнару-

жении недостающих или ошибочных точек данных, которые могут быть исправлены или вменены, чтобы избежать влияния на результаты прогноза [6].

Кроме того, анализ данных позволяет выявить потенциальные проблемы с качеством данных, которые могут возникнуть в процессе прогнозирования, такие как пробелы в данных или ошибки, вызванные неисправным оборудованием [7]. Решив эти проблемы до начала прогнозирования, можно значительно повысить точность и надежность прогнозируемых результатов [8].

Таким образом, анализ данных является важным шагом, который не следует упускать из виду при прогнозировании выработки энергии ветра. Это обеспечивает качество и точность данных, предоставляет ценную информацию и исходные данные для моделей прогнозирования и повышает общую эффективность решений по управлению энергопотреблением [9].

II. ТЕОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для прогнозирования выработки электроэнергии требуется предварительная обработка и анализ данных. Расчеты, построение и визуализация производились с помощью программы написанной на языке программирования Python.

Исходные данные содержат в себе значения объема выборки – 8760 записей; дату и время с интервалом записи в 1 час на протяжении года; значение выработки электроэнергии, скорости ветра, направления ветра, давления и температуры воздуха в соответствии с датой и временем.

Первый набор диаграмм на рис. 1 представляет собой прямоугольные диаграммы, которые отображают распределение каждой переменной в наборе данных. Каждое поле представляет распределение значений для одной переменной, причем поле содержит медианное значение, а верхняя и нижняя границы представляют межквартильный диапазон. «Усы» простираются до минимального и максимального значений распределения, в то время как любые выбросы отображаются в виде отдельных точек. Переменные отображаются разными цветами для облегчения визуального распознавания.

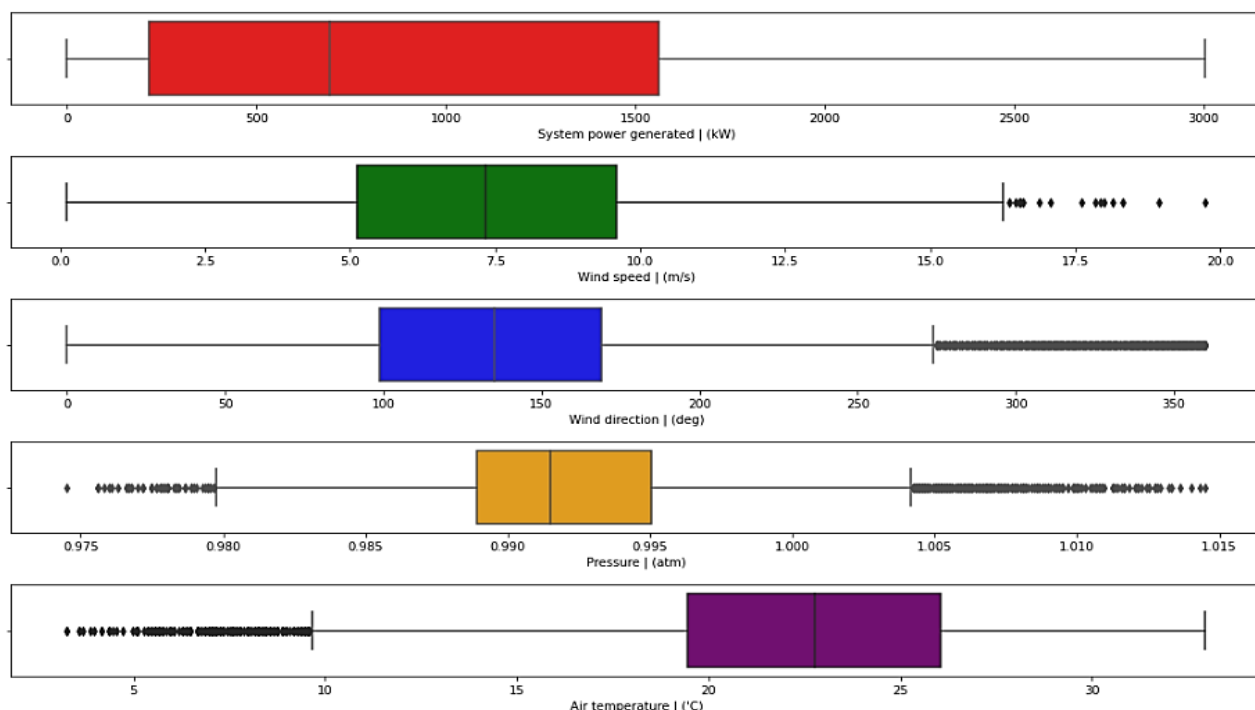


Рис. 1. Распределение переменных

Графики показывают, что вырабатываемая мощность в основном находится в диапазоне 250–1600 кВт, ветер в основном 5–10 м/с и в основном с юго-востока (100–170 градусов). Данные также выводятся на график ежечасно, ежемесячно и ежедневно, чтобы выявить закономерности в данных.

На рис. 2 показана прямоугольная диаграмма почасовой разбивки выработки электроэнергии в кВт. Ось x показывает время суток, в то время как ось y показывает вырабатываемую мощность. График прямоугольника и «усов» показывает распределение мощности, вырабатываемой за каждый час дня, причем прямоугольник представляет межквартильный диапазон, а «усы» показывают диапазон значений, в 1,5 раза, превышающий межквартильный диапазон. Любые точки за пределами этого диапазона отображаются как отдельные точки.

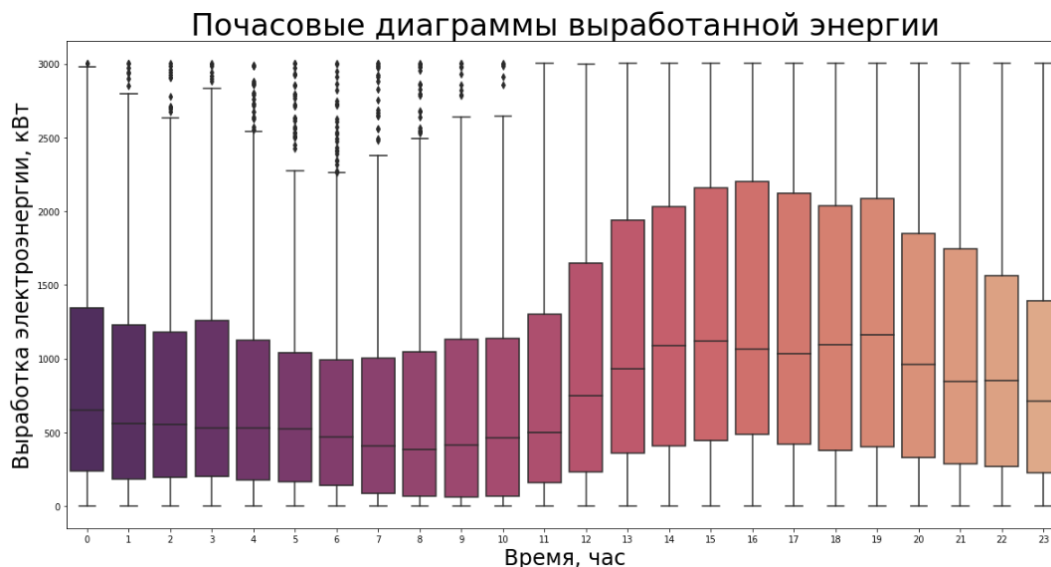


Рис. 2. Почасовая разбивка выработки электроэнергии

На диаграмме (рис. 3) показан объемный график ежемесячной выработки электроэнергии системой в кВт. Ось x показывает месяц года, в то время как ось y показывает вырабатываемую мощность. График прямоугольника и «усов» показывает распределение мощности, вырабатываемой за каждый месяц года, причем прямоугольник представляет межквартильный диапазон, а «усы» показывают диапазон значений, в 1,5 раза, превышающий межквартильный диапазон. Любые выбросы за пределами этого диапазона отображаются как отдельные точки.

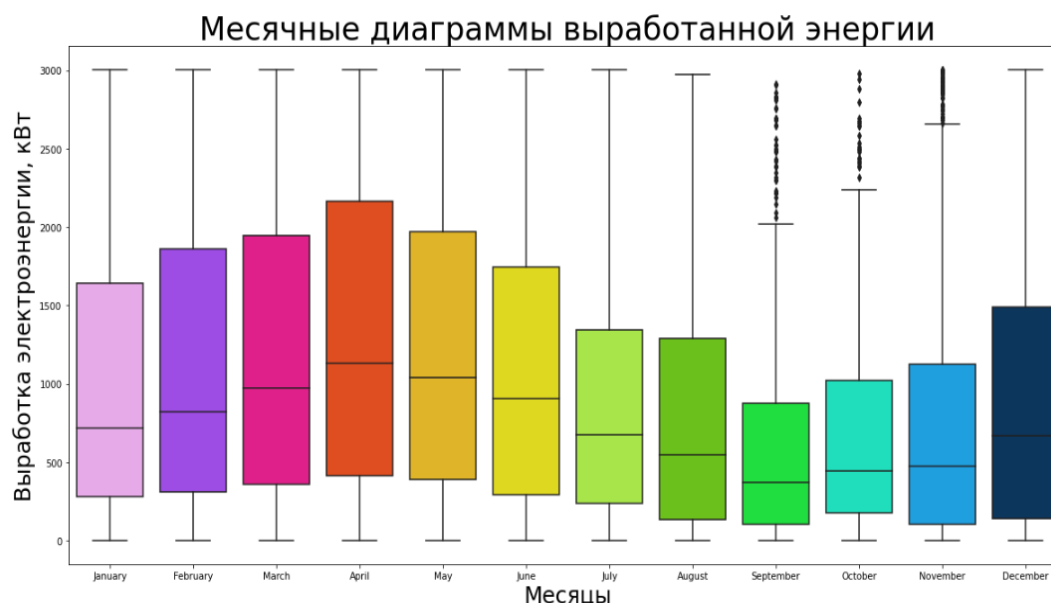


Рис. 3. Ежемесячная выработка электроэнергии

На рис. 4 показан линейный график суточной выработки электроэнергии в кВт. Ось x показывает период времени, в то время как ось y показывает генерируемую мощность. Линейный график показывает суточное изменение вырабатываемой мощности с течением времени.

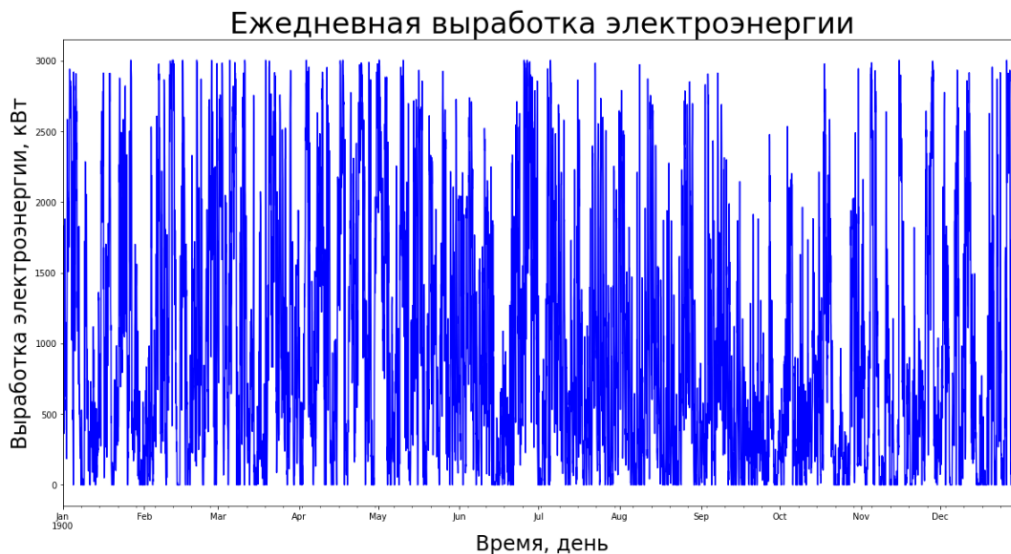


Рис. 4. Линейный график суточной выработки электроэнергии

Для того чтобы точно спрогнозировать выработку энергии ветром, важно соответствующим образом разделить выборку. Выработка энергии ветра значительно варьируется в зависимости от месяца, что делает необходимым использование варианта разделения теста на стратифицированные поезда, который гарантирует использование выборки за каждый месяц. Такой подход позволяет избежать риска искажения или предвзятости результатов за счет разделения обучения и тестирования на основе периодов высокой или низкой генерации.

Также важно проверить размер данных и убедиться, что в каждом месяце содержится одинаковое количество записей. Посмотрев на ежемесячное количество функций, можно подтвердить, что обучающие и тестовые наборы были созданы с использованием значений за каждый месяц. Этот процесс разделения данных на соответствующие обучающие и тестовые наборы на основе ежемесячных выборок имеет решающее значение для точного прогнозирования выработки энергии ветром.

Таким образом, правильная стратегия разделения тестов поездов, основанная на ежемесячных выборках, жизненно важна для эффективного прогнозирования выработки энергии ветром. Такой подход обеспечивает непредвзятые и точные результаты, принимая во внимание различия в выработке энергии ветра в разные месяцы. Следуя этой методологии и обеспечивая одинаковое количество записей за каждый месяц, можно значительно повысить точность прогнозов выработки энергии ветром.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование выработки энергии ветра является важнейшим аспектом в отрасли возобновляемых источников энергии в связи с растущей зависимостью от энергии ветра. Точные прогнозы позволяют операторам электросетей эффективно управлять спросом на электроэнергию, предотвращать отключения электроэнергии и обеспечивать стабильность сети. Однако перед началом процесса прогнозирования важно провести тщательный анализ данных, чтобы убедиться, что данные, используемые в модели прогнозирования, являются точными и репрезентативными для анализируемой системы. Используя соответствующие аналитические методы для предварительной обработки и анализа данных, исследователи могут выявлять и удалять выбросы, учитывать недостающие значения и оценивать качество данных. Это гарантирует, что модель прогнозирования основана на надежных данных, что приводит к более точным и достоверным прогнозам. Таким образом, сочетание точных методов анализа данных и эффективных моделей прогнозирования имеет жизненно важное значение в стремлении к устойчивому энергетическому будущему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшенин А. Ю., Блохин А. В., Грицай А. С. Исследование параметров, влияющих на выработку электроэнергии ветроэлектростанций // Информационные технологии в науке и производстве : материалы IX Всерос. молодеж. науч.-техн. конф., Омск, 19–20 апреля 2022 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 110–116.
2. Gorshenin A., Vasina D. Study of Methods for Forecasting Wind Power Generation Based on the Processing of Meteorological Data // 2022 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Омск, Russian Federation. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics56256.2022.10014925.
3. Горшенин А. Ю., Денисова Л. А. Прогнозирование энерговыработки ветроэлектростанций с использованием искусственной нейронной сети // Информационные технологии и автоматизация управления : материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, работников образования и промышленности, Омск, 27–28 мая 2022 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 63–69.
4. Хомутов С. О., Хамитов Р. Н., Грицай А. С., Серебряков Н. А. Методика формирования обучающей выборки в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 227–233.
5. Stein M., Pinson P. Renewable energy forecasting: From physics-based models to data-driven approaches // Annual Review of Environment and Resources. 2019. Vol. 44. P. 1–36. DOI: 10.1146/annurev-environ-101718-033212.
6. Ruiz-Arias J. A., Sánchez-Navarro J. T., Antón P., López A. G. Wind energy forecasting: A review of state-of-the-art models and techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 26. Pp. 216–256. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.012.
7. Salcedo-Sanz J., Pinson P., Gómez-Lázaro E. Short-term wind power forecasting using artificial intelligence techniques: A review // Applied Energy. 2018. Vol. 211. P. 1123–1140. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.11.057.
8. Liu R., Liu W., Ma Y., Lv Y. Comparison of different neural network models for wind speed prediction in wind power plants // Renewable Energy. 2019. Vol. 132. P. 1317–1333. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.084.
9. Moro S., Pinson P., Gómez-Lázaro E. A hybrid methodology based on machine learning for short-term wind power forecasting // Renewable Energy. 2016. Vol. 85. Pp. 1371–1380. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.070.

УДК 004.942

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-66-70

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ЦИФРОВОЙ СРЕДЫ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА СОТРУДНИКА СОВРЕМЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

DIGITAL ENVIRONMENT PROJECT FOR A MODERN ENTERPRISE

А. А. Меньшикова, А. Холматов, И. Шалин

Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск, Россия

A. A. Menshikova, A. Kholmatov, I. Shalin
Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

Аннотация. В целях оптимизации информационного рабочего пространства сотрудника предприятия и повышения производительности труда предложен проект организации информационно-цифрового рабочего пространства, предусматривающий новейший принцип динамики обработки информации, системообразующую позицию сотрудника предприятия в информационной среде, исключающий инертность информационных страниц, учитывающий принцип прагматического предиката при постановке алгоритма обработки информации и расположения ссылок в информационном цифровом пространстве. Подобные принципы распространяются на систему документооборота в цифровой информационной среде.

Ключевые слова: предприятие, информационно-цифровая среда, планирование, проектирование, рабочее пространство, принцип субъектоцентризма.

Abstract. In order to optimize the information workspace of an enterprise employee and increase labor productivity, a project for organizing an information and digital workspace is proposed, providing for the latest principle of information processing dynamics, a system-forming position of an enterprise employee in the information environment, eliminating the inertia of information pages, taking into account the principle of a pragmatic predicate when setting an algorithm for information processing and the location of links in the information digital space. Similar principles are applied to the document management system in the digital information environment.

Keyword: enterprise, information and digital environment, planning, design, workspace, the principle of subjectocentrism.

I. ВВЕДЕНИЕ

Организация и логистика управления информационной среды некоторых современных крупных предприятий (в том числе университетов) в настоящее время находится в неудовлетворительном состоянии. Проблемы вызваны устаревшим подходом к организации системы управления на уровне планирования и построения системных элементов для осуществления операций в среде информационного пространства. В настоящее время информационная среда крупного предприятия формируется в соответствии со стандартами построения сайтов [1; 2]. По сути, информационная карта предприятия повторяет картину инфраструктуры отделов предприятий, представляет собой информационные страницы с программой архивирования. Личный кабинет, личная корпоративная почта, корпоративная почта отделения, другие элементы цифровой инфраструктуры функционируют на разных серверах. Инфраструктура внешней связи в информационном пространстве продумана профессионально, что находит воплощение в успешном проектировании официальных сайтов, однако внутренняя организация информационного пространства требует изменений для удобства сотрудников.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существует проблема неконтролируемого увеличения структурных элементов, в результате чего сотруднику становится доступно избыточное количество информационных каналов.

Некорректное проектирование функционирования концептуальной схемы ссылок цифровой инфраструктуры приводит к значительному снижению производительности труда сотрудника предприятия – рабочее время уделяется изучению содержания информационных страниц. Из личного опыта следует заключение о том, что сотрудник большого предприятия в данном случае уделяет в среднем 25 мин. рабочего времени на изучение информационных порталов предприятия.

В целом, проектирование цифрового управления современным предприятием требует значительного совершенствования, либо революционных изменений.

Требуется изменения сам подход к организации инфраструктуры цифровой среды. В настоящее время данный аспект определяется структурой предприятия и преобладанием прагматических информационных сообщений, организующих большое пространство информационной среды, тогда как при проектировании информационно-цифрового пространства предприятия рекомендуется применить принцип субъектоцентризма.

III. ТЕОРИЯ

Вместо разветвленной концептуальной схемы размещенных в цифровом пространстве предприятия информационных страниц (см. рис. 1) требуется ввести более динамичный принцип представления информации, согласованный с оперативностью работы сотрудника (см. рис. 2).

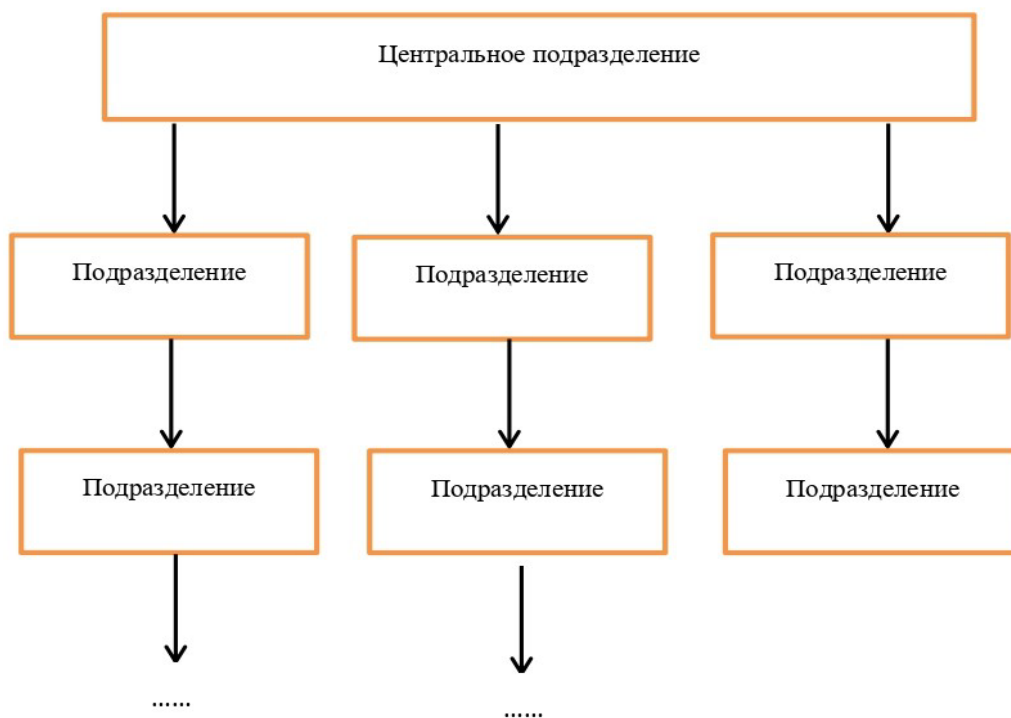


Рис. 1. Стандартная модель организации информационно-цифрового пространства в форме концептуальной схемы.

Организация информационно-цифровой среды рабочего пространства сотрудника с учетом принципа субъектоцентризма способствует изменению приоритета управления цифровой средой со структурной на системную. При таком подходе актуализируется динамика передачи информации, пропозиция диалогического взаимодействия, превращающая рабочее информационное пространство в динамическую цепь субъектоцентричных операций (см. рис. 3).

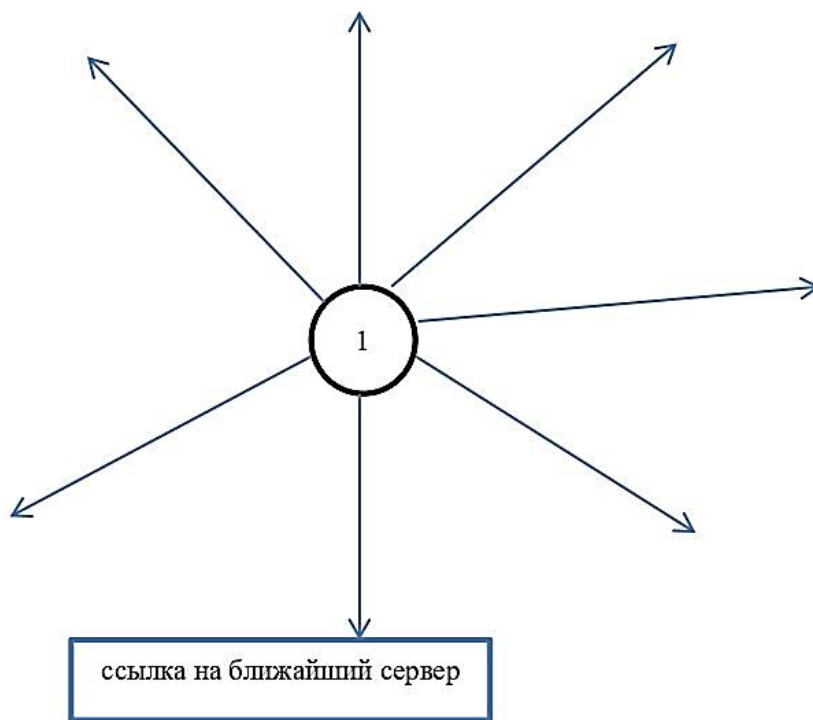


Рис. 2. Структурная организация информационно-цифрового пространства с позиции субъектоцентризма

Пояснения к рисунку:

1 – позиция сотрудника, первая ссылка на информационной странице, стрелками показано распространение ссылок к другим информационным ресурсам и подразделениям



Рис. 3. Модель линейных динамичных операций доступа сотрудника к информации

Пояснения к рисунку:

1 – условное изображение первой страницы рабочего пространства сотрудника, начальная позиция сотрудника в цифровом пространстве

2, 3 – последующие ссылки в информационном пространстве (стрелочками указано направление движения информационных потоков)

Поставленная цель решается с помощью унификации личного рабочего информационного пространства сотрудника. Соответственно, современная информационно-цифровая среда в системе управления предприятием должна представлять собой управленческие операции и сеть динамичного взаимодействия сотрудников, построенная в соответствии с принципом оптимизации. Принципы оптимальной организации информационно-цифрового пространства предполагают сокращение эксплицированной концептуальной схемы в пользу развития информационно-предикативных функций. Необходимо произвести проектировочные изменения – сократить количество структурно-информационных порталов до одного, одной ссылки, выводящей к одной цифровой странице. Дальнейшие проектировочные изменения должны иметь отношения к дизайну информационной страницы – по меньшей мере, расположить ссылки на сайт корпоративной почты и личного кабинета на одной странице, сократить последовательность переходов к этим страницам. Ключевым условием эффективной рабо-

ты предприятия является оптимизация цифровой среды документооборота. Оповещение сотрудников о правилах цифрового делопроизводства, представленных изменениях необходимо производить структурированно, через специальные ссылки, представляя главные идеи и правила в форме тезисов, емко располагая их в информационной среде. На той же странице необходимо расположить ссылки для связи с другими подразделениями.

Инженерная модель измененного проекта цифровой информационной среды допускает вариации. Можно организовать работу информационной среды сотрудников в виде форума с частичным выводом персонализированных данных, представить новостную информационную среду в форме ленты. Формы и общие правила организации, структурирования информационного пространства должны быть запротоколированы в организации на уровне профессиональной этики и правил документооборота в информационном пространстве.

Идентичный принцип проектирования информационной среды имеет отношения к управлению информационной средой университетов, в производственном плане которых отводится время обучающим цифровым ресурсам. Необходимо сократить проект цифровой обучающей программы до одной страницы и соответствующей ссылки. Требуемую со стороны сотрудника последовательность действий описать в форме алгоритма, исходя из рациональной картины последовательности действий.

В целях организации оперативной связи между сотрудниками возможен ввод единой базы данных, построенной в соответствии с лентой новостей (не таблицами).

Отдельные операции при таком подходе может выполнять программа искусственного интеллекта – автоматически оповещать о деловой повестке дня, запланированных встречах, отчетных периодах. Необходимо, чтобы принцип диалога способствовал интенсификации процессов, по замечанию ряда исследователей, определяющих сущность современной реальности [3, 4].

В случае невозможности объединить ссылки для связи между структурными подразделениями по причинам ограничений прав доступа оптимальный проект цифровой среды, организующий отношения между ними, представляет собой корпоративную электронную почту.

Идентичные требования предъявляются к системе делопроизводства в цифровой среде. Достаточно утвердить механизм электронной подписи, ввести оптимизированные карты на бумажном носителе с QR-кодом, удостоверяющим факт существования электронного документа, отказаться от объемных документов на материальном носителе.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате проведенного исследования установлена оптимальная модель организации рабочего пространства в информационно-цифровой среде предприятия, способствующая оперативной работе сотрудника, интенсификации обмена информации и принятия решений. Результаты представляют собой модель последовательности операций – перехода по ссылкам в цифровом информационном пространстве, при котором системообразующее значение приобретает процесс обработки информации, оперативность связи, не концептуальная схема инертной структуры. Приведен результат проекта с максимально упрощенной логистикой – постановки центральной ссылки или информационной страницы и упрощенным выводом связи с другими подразделениями (серверами) (см. рис. 2).

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целях улучшения функционирования рабочего пространства необходимо предоставить сотруднику возможность самостоятельно проектировать дизайн персональной страницы, определять приоритет связи с тем или иным подразделением.

Представленный проект проектирования информационного пространства имеет важное значения для разработки актуальных в настоящее время стратегий эффективного управления цифровым обществом [5] – сообществом, организованным по принципу цифровой сети.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате предложенного проекта принцип эффективного управления определяется оперативностью связи между сотрудниками, основанной на принципе оптимизации, субъектоцентризма, сокращения объемов

информационного пространства и разветвленной концептуальной схемы в пользу операционализма с последовательным сокращением логики операций благодаря центральному положению сотрудника в системе информационной среды предприятия. Дизайн информационного пространства также претерпевает изменение в связи с установленными приоритетами – сокращается до одной информационной страницы или ссылки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вязилов Е. Д. Архитектура, методы и средства Интернет-технологий. М.: Каскад, 2009. 510 с.
2. Создание официальных сайтов учреждений культуры и образования: теория и практика : сборник научных трудов / под ред. Н. И. Гендиной, Н. И. Колковой. СПб.: Профессия, 2015. 383 с.
3. Дашян М. С. Право информационных магистралей: вопросы правового регулирования в сфере Интернет. М.: Волтерс Клувер, 2007. 118 с.
4. Черникова И. В. Постнеклассическая наука и философия процесса. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2007. С. 23–46.
5. Попов Е. В. Эконотроника // Экономика региона / под ред. Ю. Г. Лавриковой. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. Т. 14. Вып. 1. С. 14.

УДК 687.01

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-71-78

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОДЕЖДЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CLOTHING DESIGN USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

А. С. Рукавишникова, В. А. Денисенко

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

A. S. Rukavishnikova, V. A. Denisenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются тенденции развития создания дизайна костюма в цифровой виртуальной среде с помощью нейронных сетей. Раскрыто понятие “нейросеть” и целесообразные возможности её использования на этапах проектирования моделей одежды. Представлена информация о цифровых ресурсах, которыми пользуются дизайнеры костюма. С помощью двух нейросетей сгенерированы модели по заданным параметрам и эскизам.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационные технологии, нейросеть, цифровые технологии, нейронные связи, Artbreeder, Midjourney.

Abstract. The article discusses the trends in the development of design creation in a digital virtual environment using neural networks. The concept of “neural network” and the appropriate possibilities of its use at the stage of sketching clothing models are also considered. Information is provided about the sites that designers use and the stages of their use. With the help of two neural networks, models were generated according to the specified parameters and sketches.

Keywords: artificial intelligence, information technologies, neural network, digital technologies, neural connections, Artbreeder, Midjourney.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время цифровые технологии всё больше поглощают различные сферы нашей жизни, в том числе это касается и fashion индустрии [1]. В социальных сетях регулярно встречается информация об искусственном интеллекте, но никто не догадывается, что известные нам бренды могут их использовать для проектирования своих будущих коллекций. Несмотря на огромный интерес к новому витку информационных технологий, практически отсутствует информация об их применении и работе в сфере моды. Задачей данного исследования является анализ возможностей использования нейросетей для проектирования одежды, а также обзор модных брендов, которые уже используют в создании своей продукции виртуальную среду. Итог работы представлен в виде моделей, разработанных с помощью нейронной сети на основе перспективных направлений моды. Результаты анализа покажут, насколько удобно и эффективно использовать нейросети в мелкосерийном производстве одежды.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С развитием технологий нейронные сети находят все большее применение в легкой промышленности. Чтобы оставаться конкурентоспособным и интегрированным в мировой экономике, индустрия моды в значительной степени зависит от технологического прогресса и выпуска новых продукции. Помимо маркетинга, покупатели желают увидеть товары, которые удовлетворяют их потребности. Они хотят выбрать более высокого

качества и разнообразного выбора. Поэтому, для более быстрого и эффективного подхода в поиске новых идей, текущее технологическое состояние даёт возможность использовать искусственный интеллект. Благодаря такому прорыву в науке, тема использования нейросетей для проектирования одежды не нашла ещё своего полного отражения в публикациях.

III. ТЕОРИЯ

Нейронные сети – это форма искусственного интеллекта, в основе которой лежат нейронные связи, подобные схемам человеческого мозга. Сам термин появился ещё в 1943 году, но технология получила большее распространение только сейчас. Нейросети представляют собой компьютерную программу, использующую алгоритмы, с помощью которых она функционирует. Чаще всего эти программы пишутся на языке Python с использованием библиотек глубокого обучения, а нейронные сети классифицируются как генеративные составные. За один и тот же промежуток времени, нейронная сеть может генерировать больше вариантов изображений, чем человеком, это делает ее более эффективной альтернативой. Отличительной особенностью нейронной сети является то, что она самообучается на огромном количестве поступающей информации, таким образом, нейронная сеть узнает, как выглядит определённый объект [2].

В 2016 году в Калифорнии была создана нейросеть *pix2pix*, генерирующая реалистичные фотографии из набросков. Ее возможности невозможно было использовать в лёгкой промышленности для задач легкой промышленности. На основе *pix2pix* была выпущена российская технология искусственного интеллекта YUGE – YXI AI, которая базируется исключительно на создании эскизов одежды. Её целью являлось получение персонального дизайна, основанного на заинтересованных моделях, и благодаря этой базе, формируется набросок и генерируется конечное изображение. Примеры работ представлены на рис. 1. На рис. 2 показано, как сгенерированное изображение выглядит уже в материальном виде на модели [3, 4].



Рис. 1. Серия эскизов нейросети YXI AI



Рис. 2. Эскиз нейросети YXI AI и готовая модель

Одной из последних программ является Artbreeder. В данной нейросети можно воспользоваться уже запрограммированными картинками или сделать коллаж из загруженных изображений. Если вышеперечисленное не устраивает, то можно создать эскиз самому с помощью имеющихся инструментов [3].

В 2018 году была разработана ещё одна отечественная нейросеть Trendmind, которая ориентирована только на создание эскизов одежды. Первой моделью было выбрано платье, так как оно может быть очень разнообразного конструктивного и колористического решения. Вначале подбираются фотографии с возможными вариациями моделей, затем генерируется модель в GAN (генеративно–сопоставительные сети). Авторы нейросети создают дизайны для своих капсул. Примеры их работ представлены на рисунке 3 [3, 5].



Рис. 3. Эскиз нейросети Trendmind и готовая модель

Особую популярность приобретает нейросеть Midjourney. В ней получаются красивые и необычные формы изделий, генерируются принты и узоры для тканей. Опираясь на такую огромную популярность нейросетей, челябинский дизайнер Ксения Герц вместе с Сергеем Коротковым решили провести эксперимент во время проведения воркшопа – сгенерировать дизайн жилета с последующим созданием макета. В цифровой

среде Midjourney они сформировали запрос: Men's Vest, Minimalism, Pockets, Happiness, Light, Transparent, Dark, Geometric, Dynamic, Comfortable, Stone. В результате было получено 4 вариации модели жилета и выбрана та, которая реализуема с технологической точки зрения. Итог можно увидеть на рисунке 4 [6].



Рис. 4. Эскиз нейросети Midjourney и готовая модель

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Основываясь на анализе вышеперечисленных нейросетей и использования их в создании эскизов и прототипов моделей, подготовлены изображения моделей одежды с учетом тенденций моды. Нужно отметить, что не все нейросети можно использовать для личного пользования, не все доступны. Для создания набросков моделей в цифровой среде было использовано две общедоступные нейросети: Artbreeder и Midjourney.

При работе в Artbreeder для конечной модели исходным изображением послужил произвольный набросок, который был создан с использованием встроенной функции "кисть". Первоначальный эскиз представлен на рис. 5.



Рис. 5. Исходный эскиз, созданный в Artbreeder

Для дальнейшего преобразования в строке описания был внесен запрос «Fashion show 2023» и выбраны два разных изображения. Искусственный интеллект программы показывает, насколько процентов исходное изображение будет видоизменяться. В первом случае, AI выставлена на среднее значение, примерно 50%, во втором, эта функция выставлена на 100%. В результате двух генераций были получены модели с разной степенью преобразования, которые представлены на рис. 6 и 7.



Рис. 6. Конечное изображение с AI 50%



Рис. 7. Конечное изображение с AI 100%

В нейросети Midjourney, создание готовой коллекции формировалось на основе дизайнов моделей таких брендов одежды, как Prada и Louis Vuitton. В строке запроса через команду /image prompt было введено описание изображений: "Fashion show 2050 Prada Louis Vuitton". В результате получили 4 вариации соответствующих изображений. При втором генерировании по данному запросу была получена коллекция, которая представлена на рис. 8, 9. Преимуществом данной нейросети является возможность предоставления различных вариантов понравившегося изображения из ранее полученных моделей. Итог преобразованных эскизов из последней модели можно рассмотреть на рис. 10.



Рис. 8. Коллекция изображений, сгенерированных в Midjourney



Рис. 9. Коллекция изображений, сгенерированных в Midjourney



Рис. 10. Различные варианты понравившейся модели, сгенерированные в Midjourney

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Есть несколько вариантов использования изображений, созданных в нейросети:

- брать как прототип, аналог, идею и проектировать свою физическую модель;
- использовать изображения, созданные в нейросети, и дорабатывать их в фоторедакторах при подготовке fashion-иллюстрации;
- использовать картинки из нейросети для вдохновения, оформления, прочтения стилей, выбора цветовой гаммы для fashion эскизов;
- разрабатывать новые варианты моделей на основе загруженных собственных моделей или прототипов;
- создавать картинки по конкретным работам художников иллюстраторов, использовать их стиль;
- использовать картинки из нейросетей для ведения блога модных брендов.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение нужно отметить, что использование нейросетей на производстве предоставляет возможность создания новых моделей и поиска идей. Это поможет сократить время на стадии проектирования на основе трендов, создавать более интересные модели, что приведёт к повышению спроса и прибыли. Но, несмотря на большую пользу нейронных сетей, они не могут полностью заменить человека. Их стоит использовать как дополнительный источник генерации идей. Искусственный интеллект на данном этапе развития не способен на новаторство и создаёт эскизы из определенной библиотеки изображений. На сгенерированных эскизах и фото моделей невозможно прочитать чёткое конструктивное и технологическое решение. Поэтому на данной стадии развития производство не может обойтись без специалистов, которые будут дорабатывать подобные изображения [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жиленков И. В Создание фотореалистичных изображений при помощи программного обеспечения GauGAN [Электронный ресурс] // elibrary: [сайт]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40550485> (дата обращения: 21.01.2023).
2. Трихина А. Д. Как нейросети повлияют на будущее в дизайн индустрии. [Электронный ресурс] // elibrary: [сайт]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46299827> (дата обращения: 05.02.2023).
3. Голованева А. В., Алибекова М. И. Нейромоды: использование нейросетей в эскизировании и создании модных изделий. [Электронный ресурс] // elibrary: [сайт]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48654945> (дата обращения: 09.02.2023).
4. YXI AI (искусственный интеллект YUGE) / [Электронный ресурс] // ВКонтакте: [сайт]. URL: <https://vk.com/yxiai> (дата обращения: 12.02.2023).
5. Попова Т. Мы хотим доказать, что искусственный интеллект может заменить дизайнеров. [Электронный ресурс] // Vc.ru: [сайт]. URL: <https://vc.ru/flood/29463-my-hotim-dokazat-cto-iskusstvennyy-intellekt-mozhet-zamenit-dizaynerov> (дата обращения: 15.02.2023).
6. Герц К. [Электронный ресурс] // ВКонтакте: [сайт]. URL: https://vk.com/wall4846224_3180?access_key=a52f2b6b3d83830fe3 (дата обращения: 22.02.2023).

УДК: 004.891.3

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-79-84

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF THE DECISION-MAKING SYSTEM SOFTWARE

А. С. Серобабо¹, А. Л. Серобабова², Л. А. Денисова¹

¹*Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия*

²*Московский областной филиал Московского университета Министерства внутренних дел
Российской Федерации имени В. Я. Кикотя, пос. Старотеряево, Россия*

A. S. Serobabov¹, A. L. Serobabova², L. A. Denisova¹

¹*Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

²*The Moscow Regional Branch of the Vladimir Kikot Moscow University
of the Ministry of Interior of Russia*

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы разработки и верификации системы поддержки принятия решений врачом при диагностике заболеваний печени. Представлена функциональная схема системы с отображением основных информационных потоков для принятия решений о стадии заболевания. Приведена методика испытаний для верификации программного обеспечения системы, включая проверку работы классификатора, основанного на нечетком логическом выводе. Представлены результаты сравнительного анализа эффективности предлагаемого метода с другими методами классификации стадии заболевания печени.

Ключевые слова: верификация программного обеспечения, нечеткий классификатор, методика испытаний, медицинская система принятия решений, нечеткая база правил.

Abstract. The paper considers the development and verification of a decision support system for a physician in the diagnosis of liver disease. The functional scheme of the system with the display of the main information flows for making decisions about the stage of the disease is presented. The technique of tests to verify the software of the system, including checking the operation of the classifier based on fuzzy logical inference, is presented. The results of comparative analysis of the efficiency of the proposed method with other methods of classification of the liver disease stage are presented.

Key words: software verification, fuzzy classifier, test methodology, medical decision-making system, fuzzy rule base.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач проектирования любой медицинской системы является контроль за процессом принятия решений при диагностике заболевания пациента [1, 2]. Высокие требования к качеству проектируемой системы обусловлены рисками, связанными с влиянием принятых решений на здоровье пациента. В свою очередь возрастающая сложность разрабатываемого программного обеспечения (ПО) приводит к увеличению количества ошибок в нем, что приводит к серьезным последствиям при эксплуатации ПО.

Основным подходом к решению задачи проверки качества программного обеспечения является использование процедуры верификации. Под верификацией понимается процесс определения, удовлетворяют ли ПО и его модули требованиям, наложенным на них в последовательных этапа жизненного цикла разра-

батываемой системы [3, 4]. Верификация включает в себя анализ причин возникновения ошибок и последствий их исправления, планирование процессов поиска ошибок, а также оценивание полученных результатов. Перед началом проведения процедуры верификации ПО, формируются требования к разработанному ПО, включаемые в техническое задания на систему. Составляются перечни, планирующихся в ходе испытаний проверок, реализуемых функций и решаемых задач. Формируется методика проведения испытаний с указанием критериев ожидаемых результатов.

Для полноценного осуществления процесса верификации ПО необходимо провести работы по составлению плана эксперимента и сопоставления. На каждом шаге проверки производится оценка, адекватны ли полученные результаты ПО с выдвинутыми требованиями к системе. Верификация включает в себя: верификацию кода и верификацию вычислений.

Верификация кода – оценочная деятельность, связанная с поиском и исправлением ошибок программирования в компьютерном коде и обеспечением того, чтобы численные алгоритмы решения дискретных уравнений давали точные решения.

Верификация вычислений – оценочная деятельность, связанная с проверкой качества вычислительной модели и выявлением ошибок численного решения.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассмотрены вопросы разработки и верификации системы поддержки принятия решений врачом при диагностике заболеваний на основе неалкогольной жировой болезни печени. Представлена функциональная схема системы с отображением основных информационных потоков для принятия решений о стадии заболевания. Приведена методика испытаний для верификации программного обеспечения системы, включая проверку работы классификатора, основанного на нечетком логическом выводе.

Для создания системы диагностики (НАЖБП) выдвинуты следующие требования к системе:

- реализация импорта данных в формате CSV (*Comma-Separated Values*) в базу данных системы;
- коррекция значимых параметров на заданный коэффициент;
- точность классификатора с коррекцией должна быть выше или равна точности без подсистемы коррекции значимых параметров;
- результаты принятия решений о стадии заболевания с разработанным классификатором выше имеющихся аналогов.

III. ТЕОРИЯ

В качестве исходной информации для классификации использованы данные 149 пациентов, проходивших диспансеризацию в медицинских учреждениях города Омска [5, 6]. Каждый пациент характеризуется следующими категориями параметров: L_{name} – лабораторные параметры; D_{name} – сопутствующие заболевания пациента; P_{name} – физиологические параметры. Индексом $name$ обозначено наименование параметра (результат медицинского обследования).

В общем виде задача диагностики ставится следующим образом. Имеется выборка X из m объектов (пациентов с различными стадиями заболевания), характеризующихся n переменными параметрами, взятыми из составных групп данных по пациенту:

$$X = [x_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1, m}$ – номер объекта (пациента); $j = \overline{1, n}$ – номер переменной (параметра).

Процесс принятия решений состоит из следующих этапов: предобработка данных (1), получение значимых параметров (2), занесение выработанных экспертных правил в базу данных правил (3), поиск замещающих параметров и классификация стадии заболевания (4). Функциональная схема системы представлена на рисунке 1, и состоит из модулей, название которых отражает выполняемые функции.

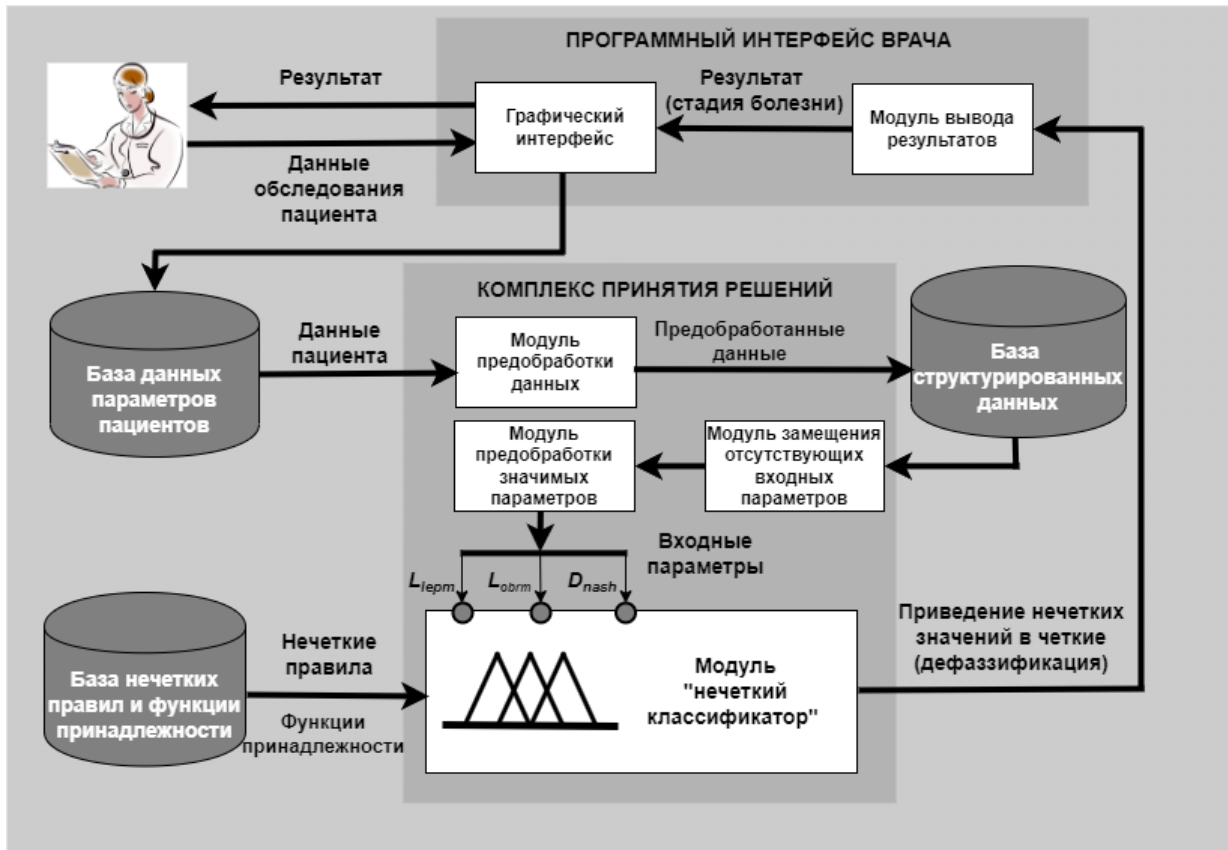


Рис. 1. Обобщенная схема работы системы поддержки принятия решения о стадии заболевании

Работа врача с системой происходит следующим образом. Врач загружает информацию о пациенте через графический интерфейс системы, позволяющий сохранять в базу данных результаты медицинских обследований. Далее загруженные данные предобрабатываются: производится проверка на наличие пропусков и выбросов в данных, параметры обследования пациента разбиваются на группы (лабораторные и физиологические параметры, сопутствующие заболевания). В системе в базе нечетких правил находится предварительно сформированные нечеткие продукционные правила, сформированные на этапе экстракции функций принадлежности и согласованные с врачами экспертами. Перед классификацией нечеткие правила импортируются из хранимой базы правил в модуль нечеткой классификации [7], подготовленные данные нормализуются и подаются на вход классификатора, который в свою очередь по входным параметрам и правилам классифицирует стадию заболевания и определяет степень уверенности в принятом решении. Результат работы системы преобразуется для графического отображения результатов врачу.

Модуль предобработки данных содержит проверку на наличие дублирования данных и производит поэлементное сравнения всей выборки X для нахождения в выборке таких векторов x_i (i – индекс пациента), которые удовлетворяют условию равенства $x_i = x_j$, j – индекс дублирующего вектора (пациента). Найденные x_j удаляются из исходной выборки X , полученные данные сохраняются в таблицу базы данных для дальнейшей постановки диагноза системой.

Модуль замещения отсутствующих входных параметров содержит методы, которые позволяют осуществить замещение значения, отсутствующего параметров, используя функции, полученные в результате регрессионного анализа.

Классификация стадии заболевания осуществляется по трем значимым параметрам: L_{lept} – мультипликативный параметр (произведение L_{lep} на корректирующий параметр по P_{gen}), P_{gen} – пол пациента (1 – мужчина, 2 – женщина), L_{lep} – количество лептина в крови пациента, L_{obrm} – мультипликативный параметр $L_{obrm} = L_{obr} \cdot P_{wc}$, L_{obr} – количество рецепторов лептина в крови пациента, P_{wc} – обхват талии, D_{nash} – наличие заболевания неалкогольного стеатогепатита (стеатоз (1), гепатит (2)). В результате классификации

IV. Проведение экспериментов для верификации ПО

Проведена верификация разработанной системы классификации стадии заболевания с помощью процедуры проверки и методики испытания программы. Для этого составлены несколько процедур проверки работы системы и представлены результаты сверки с требованиями к системе.

В проверяемой медицинской системе верификации подлежат как сама система, так и входящие в ее состав модули, участвующие в принятии решений, обработки, хранения и анализа данных пациента. В соответствии с рисунком 1 составлена таблица 1, где представлен состав программного обеспечения системы принятия врачебных решений. Каждый модуль или программа выполняет определенные функции. Для проведения верификации системы собран исполняемый файл Expert расширения .exe, который состоит из нескольких файлов модулей: GUI.py, Preprocessing.py, Replacing.py, Normalization.py, FuzzyClassifier.py, StageDefinition.py.

ТАБЛИЦА 1
СОСТАВ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ

№	Наименование файла	Тип файла	Наименование программы (модуля)	Описание и выполняемые функции
1	Expert.exe	Исполняемый файл	Система принятия врачебных решений	Исполняемый файл классификации заболевания печени
2	GUI.py	Файл python с расширением .py	Модуль графического интерфейса	Отображение графических элементов для взаимодействия врача со системой
3	Preprocessing.py	Файл python с расширением .py	Модуль предобработки данных	Предобработка исходных данных
4	Replacing.py	Файл python с расширением .py	Модуль замещения отсутствующих входных параметров	Замещение отсутствующих входных параметров
5	Normalization.py	Файл python с расширением .py	Модуль нормализации входных параметров	Нормализация входных параметров
6	FuzzyClassifier.py	Файл python с расширением .py	Модуль нечеткой классификации	Классификация стадии заболевания
7	StageDefinition.py	Файл python с расширением .py	Модуль вывода результат	Определение стадии заболевания и степени уверенности в поставленном диагнозе
8	Fuzzy.m	m-файл - MATLAB	Сценарий проверки функций принадлежности	Загрузка параметров для построения функций принадлежности

В таблице 2 представлены процедуры верификации разработанной программы с требованиями к ожидаемым результатам и критериям оценки корректности отработки системы и ее компонентов.

Верификация работы системы проведена на тестовых данных, полученных в результате проведения дополнительного обследования пациентов. Размер тестовой выборки составил 26 пациентов и представлен в виде файла в формате CSV. Тестовые данные загружены в систему поддержки принятия решения о стадии заболевания. Сравнение полученных стадий заболеваний пациента производилось с результатами выполнения биопсии печени, которая обладает высокой точностью постановки стадии болезни, но является болезненной и опасной процедурой вмешательства в ткани органов человека. Далее проведена процедура проверки корректности работы системы на основании процедур из таблицы 2. В результате получено, что заданные проверяемые процедуры полностью соответствуют критериям оценки.

ТАБЛИЦА 2
ПРОЦЕДУРЫ ПРОВЕРКИ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Процедура проверки	Методика испытаний	Критерии оценки / ожидаемый результат
1.1 Проверка возможности импорта данных в базу данных системы	Проверить работоспособность подсистемы импорта данных на корректное чтение данных и занесение их в БД а) запустить Expert.exe; б) выбрать путь к файлу формата csv; в) проверить совпадение формата; г) импортировать данные в БД.	При совпадении формата (шаг в) импортирование данных в БД (шаг г). При несовпадении формата – оповещение пользователю о невозможности импортировать файл.
1.2 Проверка возможности подсистемы коррекции значимых параметров	Проверить подсистему на правильное выполнение алгоритма коррекции значимых параметров в зависимости от пола пациента а) запустить Expert.exe; б) ввести значения значимых параметров на вход системы; в) контролировать выполнение процедуры проверки условия необходимости коррекции на экране монитора; г) проверить выполнение коррекции параметров в отладочном окне программы;	Коррекция значимых параметров на заданный коэффициент.
1.3 Проверка возможности подсистемы классификации стадии заболевания (определение стадии заболевания по заданным правилам)	Проверить возможность принятия решения о стадии заболевания печени а) запустить Expert.exe; б) ввести значения значимых параметров на вход системы; в) контролировать выполнение фаззификации каждого значимого параметра на экране монитора (загрузить параметры для построения функций принадлежности Fuzzy.m); г) контролировать вычисление выполнения правил на экране монитора; д) проверить выполнение о принятых решениях подсистемы.	Полученные результаты принятия решения о стадии заболевания с разработанным классификатором выше других методов

На рисунке 2а представлен интерфейс программы с результатами сравнения точности классификации заболевания по стадиям. Интерфейс программы выполнен в минималистичном стиле и позволяет использовать массовую загрузку данных в формате CSV. Проверяется наличие колонок значимых параметров и значений в них. Выполнение классификации стадии заболевания выполняется по схеме на рисунке 1.

В результате получена диаграмма, представленная на рисунке 2б, с результатами классификации, показывающая точности постановки диагноза. Проводилось тестирование работы классификаторов, основанных на различных методах: K_1 – классификатор с помощью дерева решений, K_2 – нечеткий классификатор без коррекции значимых параметров, K_3 – нечеткий классификатор с коррекцией значимых параметров.

Сравнивая результаты точности классификаторов, можно сделать вывод о том, что нечеткий классификатор с коррекцией значимых параметров имеет большую точность, чем классификатор без коррекции, что удовлетворяет критерию верификации работы подсистемы коррекции значимых параметров. Данный результат обусловлен зависимостью значений значимых параметров от пола пациентов. Подсистема коррекции значений значимых параметров сглаживает межполовое различие параметра L_{lep} , что приводит к лучшей работе классификатора.

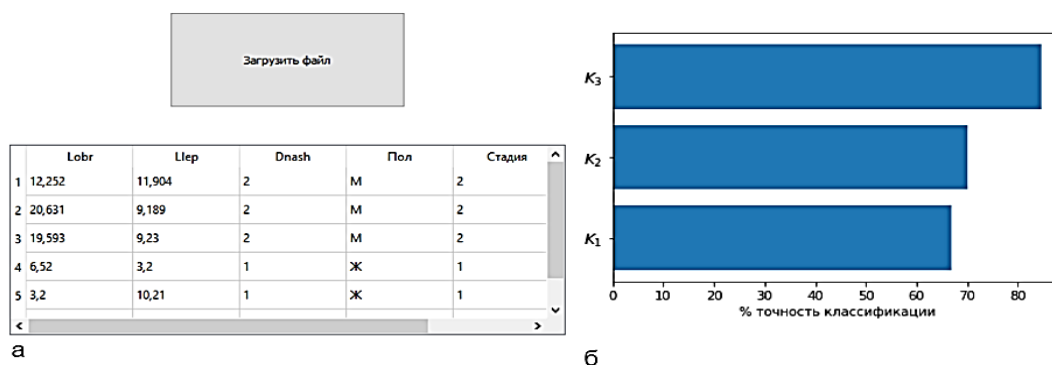


Рис. 2. Графический интерфейс с результатами верификации:
а) определение стадии заболевания и исходные данные пациента,
б) точность классификации различными методами

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная система поддержки принятия решения удовлетворяет заданным процедурам проверки по результатам проведения методик испытания. Система реализованна с учетом возникновения проблем импорта данных формата csv. В результате тестирования точности работы классификатора получено значение 84.6%. правильно принятых решений о стадии заболевания. Разработанная система способствует уменьшению влияния человеческого фактора, сокращению времени обработки данных, а также нахождению новых взаимосвязей между стадией болезни и лабораторными параметрами пациента.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана схема работы системы поддержки принятия решения, позволяющая осуществлять классификацию стадии заболевания пациента. Сформирована и проведена программа и методика испытаний, которая гарантирует выполнение системы в представленных сценариях работы.

Экспериментальные процедуры проверки работы системы и подсистемы позволяют определить технические особенности и выявить нештатные процессы работы системы, а также подтвердить соответствие выполняемых функций с принятыми техническими требованиями.

Представляется перспективным использовать полученные результаты для разработки и проверки медицинских систем. Разработанная система поддержки принятия решений на основе интеллектуального анализа данных позволит врачу не только проверить свои диагностические предположения, но и получить информационную поддержку в сложных диагностических ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гратинский В. А., Новиков Е. М., Захаров И. С. Экспертная оценка результатов верификации инструментов верификации моделей программ // Труды ИСП РАН. 2020. № 5.
2. Michael Negnevitsky. Artificial Intelligence: A Guide to Intelligent Systems (3rd Edition). 2011. 394 p.
3. Сальников А. В., Французов М. С., Виноградов К. А., Пятунин К. Р., Никулин А. С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия вузов. Машиностроение. 2022. № 9 (750). С. 100–116.
4. Хлопотов Р. С. Особенности проектирования баз данных для автоматизированного рабочего места врача-нутрициолога // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 9. С. 84–89.
5. Серобабова А. С., Чебаненко Е. Б., Денисова Л. А., Кролевец Т. С. Разработка экспертной системы ранней диагностики заболеваний: программные средства первичной обработки и выявления зависимостей // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 179–184.
6. Серобабова А. С. Анализ систем интеллектуального диагностирования заболевания у пациента // Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2019. № 4. С. 58–69.
7. Chebanenko E., Denisova L., Serobabov A. Intelligent Processing of Medical Information for Application in the Expert system // Proceedings - 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBREIT 2020, Yekaterinburg, 14–15 мая 2020 года. Yekaterinburg, 2020. Pp. 85–88.

УДК 621.6.03

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-85-90

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В НАНОЖИДКОСТЯХ

FEATURES OF CREATING AN EXPERIMENTAL FACILITY FOR STUDYING HEAT TRANSFER IN NANOFLUIDS

Е. Н. Слободина, И. А. Степашкин, Д. В. Коваленко, А. Г. Михайлов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

E. N. Slobodina, I. A. Stepashkin, D. V. Kovalenko, A. G. Mikhailov
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассмотрены методы исследования наножидкостей, применяемые при изучении свойств теплообмена при использовании наножидкостей. Приведены схемы экспериментальных установок, используемые в опытах по изучению тепловых процессов при течении модифицированных теплоносителей – наножидкостей.

Ключевые слова: наножидкость, теплообмен, экспериментальный стенд.

Abstract. The article considers methods for studying nanofluids used in studying the properties of heat transfer when using nanofluids. Schemes of experimental equipment used in experiments on the study of thermal processes in the flow of modified heat carriers - nanofluids are presented.

Keyword: nanofluid, heat transfer, experimental equipment.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных способов интенсификации теплообменных процессов является повышение теплопроводности теплоносителя (жидкости) путем добавления в него твердых частиц с высокой теплопроводностью. При этом величина повышения зависит от материала наночастиц, их объемной доли, а также многих других факторов.

Первые эксперименты по измерению теплопроводности наножидкостей показали прекрасные результаты: добавление наночастиц в небольших концентрациях, порядка долей процента, вызывает значительный рост теплопроводности теплоносителя. Что в свою очередь приводит к росту коэффициента теплоотдачи. Данный процесс определяет высокоэффективную работу теплоэнергетической установки.

Изучением свойств наножидкостей занимаются во многих странах, при этом используются различные экспериментальные установки для получения необходимых результатов.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальное изучение теплообмена наножидкостей предъявляет дополнительные требования к установкам и технологии проведения эксперимента по сравнению с чистыми средами.

При исследовании коэффициентов теплопроводности (теплоотдачи) в стационарном режиме тепловой поток создается при помощи внешних источников теплоты (электрических нагревателей), они служат для создания равномерного теплового потока, распределенного по всей поверхности нагрева [1]. Опытные данные по коэффициентам теплоотдачи представляются в виде зависимостей от критериев подобия.

В данной работе представлен обзор экспериментальных установок, которые используются при изучении процессов теплообмена в жидкостях и предложена модель установки для изучения особенностей теплообмена в наножидкостях.

III. ТЕОРИЯ

Большинство экспериментальных методов основывается на наблюдении за температурным полем, возникающим от теплового потока, и далее рассчитывается коэффициент теплоотдачи.

Существуют различные экспериментальные установки, которые используются при изучении процессов теплообмена в жидкостях.

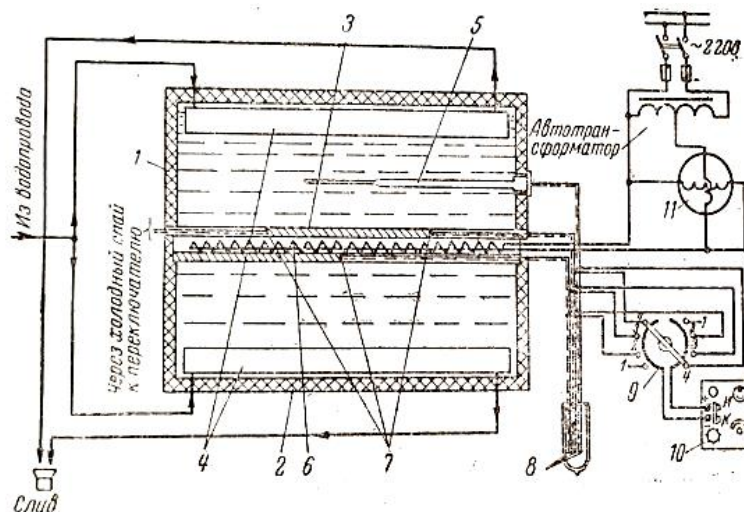


Рис. 1. Схема опытной установки для исследования теплоотдачи в потоке капельной жидкости:

- 1 – металлический бак; 2 – теплоизоляция бака; 3 – опытная труба; 4 – холодильник;
- 5 – термопара; 6 – электрический нагреватель; 7 – термопары; 8 – холодные спаи термопар;
- 9 – переключатель; 10 – потенциометр; 11 – ваттметр

Исследование теплоотдачи в потоке капельной жидкости (воде) проводится на измерительном участке состоящем из бака 1, покрытого изоляцией 2, опытной горизонтальной трубы 3, и холодильников 4. Опытная труба выполняется из меди диаметром 30 мм и длиной 210 мм. Внутри трубы закладывается электрический нагреватель 6. Холодильники расположены параллельно оси опытной трубы. Они воспринимают теплоту, выделяемую опытной трубой. Термопара 5 для измерения температуры жидкости помещается в латунную тонкостенную трубку и устанавливается в среднем сечении между опытной трубой и холодильником. Для измерения температуры поверхности в стенке трубы заделаны четыре термопары 7. Каждая термопара имеет свой холодный спай 8. Все они подключены к двухполюсному переключателю 9. Термо - э. д. с. термопар измеряется потенциометром 10.

Опытный горизонтальный теплообменник типа «труба в трубе» представлен на рис. 2. Основным элементом его является цилиндрическая медная труба 1 диаметром 16 мм и длиной 2100 мм с толщиной стенки 2 мм, коаксиально помещенная во второй трубе 2, служащей кожухом, или канал прямоугольного сечения 3, 3X17 мм длиной 750, мм. По опытной трубе движется нагретая вода, а внутри опытного канала прямоугольного сечения – масло. Объектом исследований является теплообмен между нагретой жидкостью и стенкой. Между опытной трубой и кожухом движется охлаждающая вода. Вход в опытную трубу выполнен плавным, перед входом находится камера 3, обеспечивающая равномерное распределение скорости жидкости на входе. После опытной трубы жидкость поступает в камеру смешения 4, которая гарантирует хорошее перемешивание жидкости перед измерением ее температуры. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду входная и смешительные камеры, патрубки для термопар изолируются. Циркуляция жидкости в системе осуществляется центробежным насосом 5, который забирает воду из сборного бака. После насоса она поступает в опытный теплообменник, оттуда в измерительную диафрагму или в мерные сосуды для измерения расхода, а затем сливается в сборный бак 6. Расход жидкости регулируется вентилем 7. Второй насос служит для хорошего перемешивания и обеспечения равномерности распределения температуры жидкости в сборном баке. В сборном баке имеется электрический нагреватель 8, мощность которого регулируется путем включения разного количества секций.

Одна из секций регулируется автоматическим трансформатором 9. Для автоматического поддержания температуры жидкости на входе в теплообменник постоянной используется терморегулятор. Температура стенки опытной трубки изменяется, как и тепловой поток, по длине трубы и измеряется термопарами 10, заделанными в стенке.

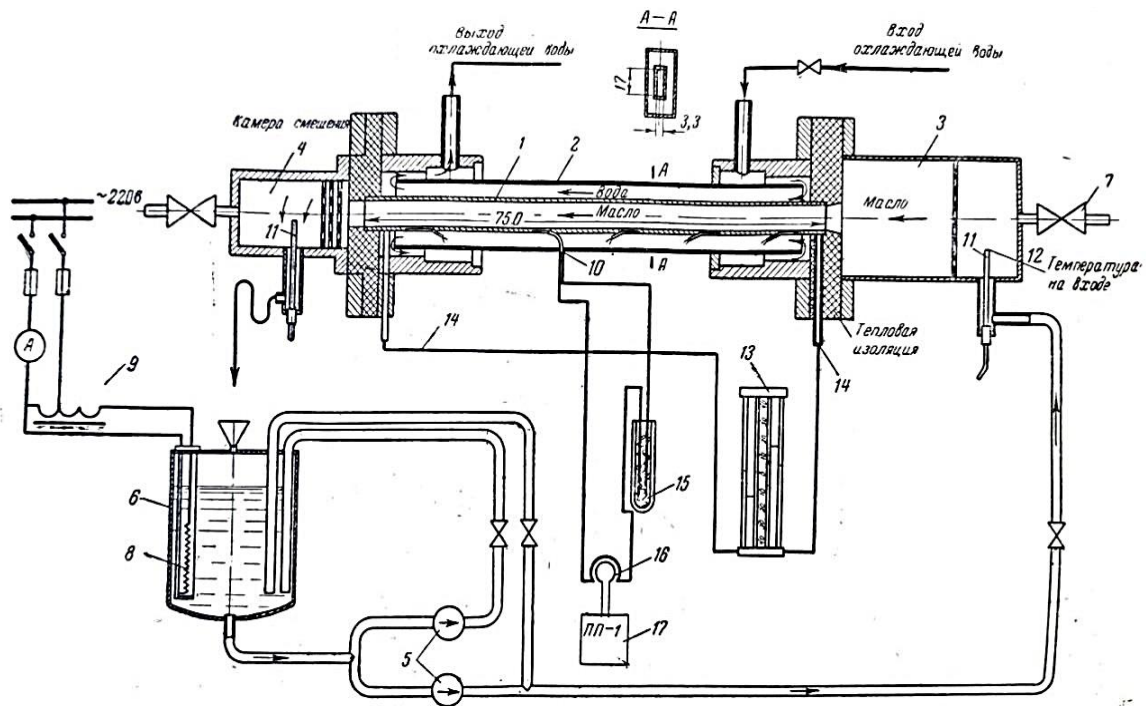


Рис. 2. Схема опытной установки при исследовании теплоотдачи методом энтальпии

- 1 – опытная труба; 2 – кожух; 3, 4 – камеры смешения; 5 – насосы; 6 – сборный бак;
7 – вентили; 8 – электрический нагреватель; 9 – трансформатор; 10 – термопары в стенке;
11 – дифференциальная термопара; 12 – термопара; 13 – дифманометр; 14 – отбор статического давления;
15 – сосуд для холодного спая; 16 – переключатель термопар; 17 – потенциометр

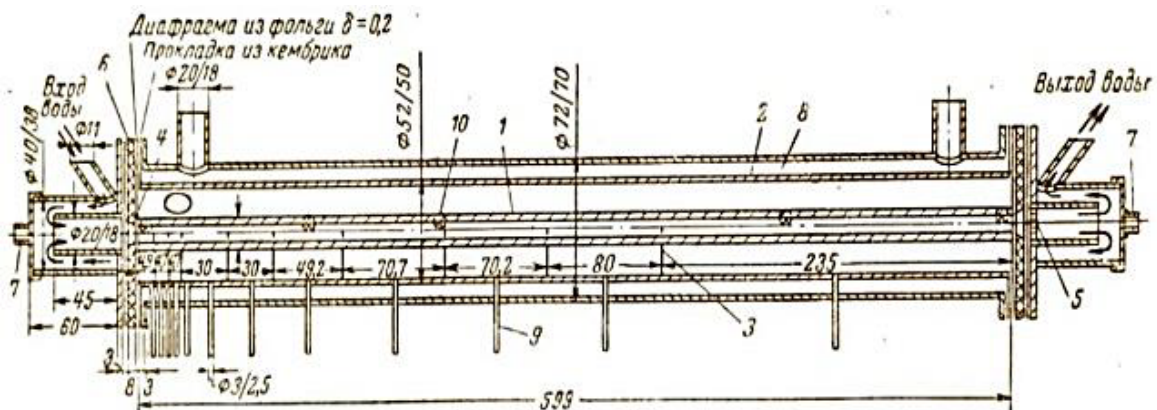


Рис. 3. Схема измерительного участка при исследовании теплоотдачи методом конденсации

Рабочий участок (рис. 3) представляет собой горизонтально расположенную трубу 1 с внутренним диаметром 10,2 мм и длиной 600 мм. В качестве исследуемой жидкости применяется дистиллированная вода в условиях турбулентного движения. Вода подается насосом из сборного бака большой емкости через напорный бачок в рабочий участок. По выходе из рабочего участка вода поступает в уравнительный бачок, а из него через измерительный сосуд снова попадает в сборный бак. Греющий пар подается в зазор между трубой 11 ко-

жухом 2, к нижней половине которого припаяно 11 перегородок 3, образующих 12 отсеков для сбора и отвода конденсата через штуцера 9. Для обеспечения отвода конденсата, образовавшегося на данном участке опытной трубы, в соответствующий отсек применяются специальные направляющие из тонкого листового материала, припаянные к поверхности опытной трубы и соединенными перегородками. Длина отсеков различна. На начальном участке опытной трубы, где наблюдается значительное изменение коэффициента теплоотдачи, перегородки ставятся чаще.

Для предотвращения, тепловых потерь в окружающую среду кожух опытной трубы имеет защитную паровую рубишку 8. Входной участок обеспечивает равномерное распределение температуры. Вода поступает из относительно большого объема через входной участок 4, имеющий плавное очертание. Специальный смеситель 5 в выходном сечении обеспечивает хорошее перемешивание жидкости и, следовательно, надежное измерение ее температуры. Для уменьшения аксиальных утечек теплоты за счет теплопроводности между опытной трубой и арматурой устанавливаются текстолитовые шайбы 6. Температура поверхности трубы измеряется шестью термопарами. Спаи термопар 10 располагаются по одной образующей.

Перепад между температурами воды на выходе и входе в опытный участок измеряется многослойной дифференциальной термопарой. Для установки термопар во входном и выходном сечениях опытной трубы предусматриваются соответствующие штуцера 7. Холодные спаи термопар помещаются в тающий лед [2].

Указанные измерения позволяют определить из опыта, как местные, так и средние значения коэффициента теплоотдачи в зависимости от скорости движения жидкости.

В отличие от рассмотренных экспериментальных стендов для установок по изучению наножидкостей требуется выполнение требований – наличие резервуара с рабочей жидкостью. Также необходимо сохранять стабильные рабочие параметры жидкости перед проведением эксперимента.

Для экспериментальных установок по изучению теплообмена при течении наножидкостей необходимо предусмотреть блок, предназначенный для создания стабильных технологических характеристик теплоносителя [3, 4].

На рис. 4 показана схема типичной установки, используемой для исследования теплоотдачи при течении наножидкости в трубе.

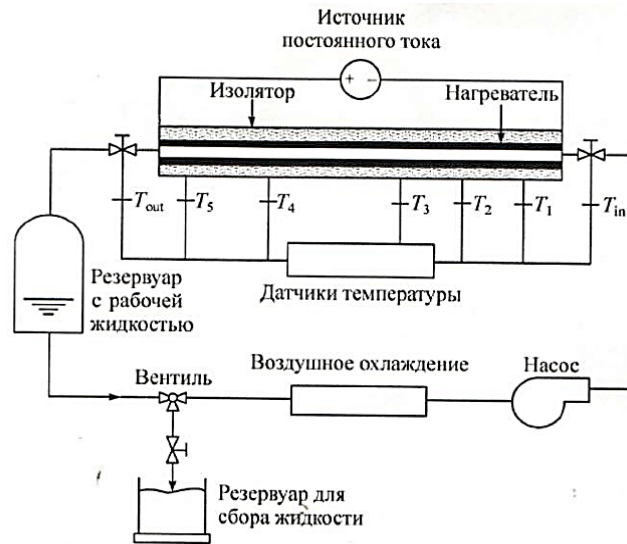


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования вынужденной конвекции

Основные элементы установки для исследования теплоотдачи в конвективном потоке: гидродинамический контур, насос, с помощью которого осуществляется движение жидкости, оборудованный термопарами опытный теплообменный участок и участок восстановления, где температура потока возвращается к изначальное значению. Резервуар с рабочей жидкостью предназначен для сбора теплоносителя со стабильными технологическими характеристиками [5, 6].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для изучения теплообмена при использовании наножидкостей в качестве теплоносителей в Омском государственном техническом университете на кафедре «Теплоэнергетика» разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 5.

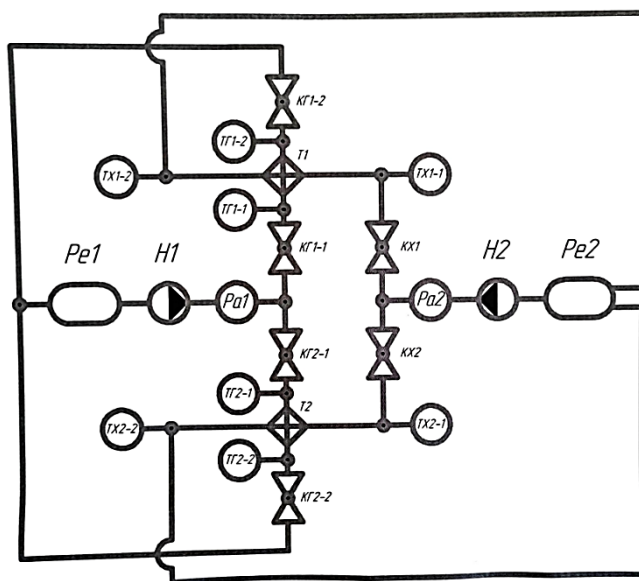


Рис. 5. Экспериментальная установка для исследования параметров наножидкости

Pe1 – бак горячего контура; Pe2 – бак холодного контура; H1 – насос горячего контура;

H2 – насос холодного контура; Pa1 – расходомер горячего контура; Pa2 – расходомер холодного контура;

T1 – 1-й теплообменник; T2 – 2-й теплообменник; КГ1-1 – кран горячего контура ветви 1-го теплообменника (вход); КГ1-2 – кран горячего контура ветви 1-го теплообменника (выход); ТГ1-1 – термометр горячего контура ветви 1-го теплообменника (вход); ТГ1-2 – термометр горячего контура ветви 1-го теплообменника (выход);

КГ2-1 – кран горячего контура ветви 2-го теплообменника (вход); КГ2-2 – кран горячего контура ветви 2-го теплообменника (выход); ТГ2-1 – термометр горячего контура ветви 2-го теплообменника (вход);

ТГ2-2 – термометр горячего контура ветви 2-го теплообменника (выход); КХ1 – кран холодного контура ветви 1-го теплообменника; ТХ1-1 – термометр холодного контура ветви 1-го теплообменника (вход);

ТХ1-2 – термометр холодного контура ветви 1-го теплообменника (выход); КХ2 – кран холодного контура ветви 2-го теплообменника; ТХ2-1 – термометр холодного контура ветви 2-го теплообменника (вход);

ТХ2-2 – термометр холодного контура ветви 2-го теплообменника (выход)

Особенностью установки является – наличие двух теплообменников: «труба–в–трубе» и пластинчатый теплообменник. Для визуализации процессов течения жидкостей используется – стеклянный теплообменник типа «труба–в–трубе». Бак горячего контура с рабочей жидкостью, ультразвуковая ванна.

Принципиальная схема установки показана на рис. 5. Насосы нагнетают воду в магистрали холодной и горячей воды. Расход холодной воды не регулируется, измеряется расходомером. После расходомера холодная вода поступает в экспериментальный участок, теплообменник типа «труба–в–трубе» – горизонтальную стеклянную трубу с внутренним диаметром $d = 22$ мм и длиной $L = 300$ мм.

Обогрев экспериментального участка производится горячей водой, предварительно нагретой при помощи электрического нагревателя. Горячая вода из емкости с нагревателем поступает в кожух теплообменного устройства типа «труба в трубе», нагревает стенку рабочего участка и выходит в емкость, где при помощи насоса горячего контура цикл повторяется. Температура воды измеряется четырьмя датчиками температурами. Время выхода на стационарный режим измеряется секундомером.

Данная экспериментальная установка позволит исследовать теплообмен при течении наножидкостей в различных теплообменниках.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Установлено, что классические стенды не подходят для изучения теплообмена в модифицированных теплоносителях, так как необходимо создать блоки оборудования для подготовки наножидкостей (Al_2O_3 , CuO).

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены варианты экспериментальных установок для изучения процессов теплообмена при использовании классических и модифицированных теплоносителей. В качестве теплоносителей используются наножидкости на основе оксидов металлов и углеродных нанотрубок.

Предложена схема экспериментального стенда для изучения теплообмена при течении наножидкости, греющая среда – вода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muhammad Awais, Arafat A. Bhuiyan, Sayedul Salehin, Mohammad Monjurul Ehsan, Basit Khan, Md. Hamid Ur Rahman. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview // *International Journal of Thermofluids*. 2021. Vol. 10. P. 100086. ISSN 2666–2027.
2. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия. Издание 3-е, перераб. и доп. 1979. 320 с.
3. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободин Е. Н. Процессы теплообмена в объеме жаротрубного котла с водяным теплоносителем // *Омский научный вестник*. 2018. № 3 (159). С. 37–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-37-40.
4. Михайлов А. Г., Вдовин О. В., Слободин Е. Н. Теплообмен в элементах жаротрубного котла с изменением теплофизических свойств теплоносителя // *Омский научный вестник*. 2018. № 4 (160). С. 73–78.
5. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Часть 2. Конвективный теплообмен // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188.
6. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика теплообмена в течениях наножидкостей // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19, № 1. С. 75–83.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАНУЛ ИЗ ТРИКАЛЬЦИЯ ФОСФАТА, ВОЛЛАСТОНИТА И ЖЕЛАТИНА

SOME CHARACTERISTICS OF TRICALCIUM PHOSPHATE, WOLLASTONITE AND GELATINE GRANULES

А. Е. Шевченко, А. П. Солоненко, А. А. Жуковская

Омский государственный медицинский университет, г. Омск, Россия

A. E. Shevchenko, A. P. Solonenko, A. A. Zhukovskaya

Omsk State Medical University, Omsk, Russia

Аннотация. По эмульсионной технологии получена серия композитных гранул из синтетических порошков, содержащих трикальций фосфат и волластонит в различных соотношениях, а также желатин, выступающий в качестве связующего компонента. Установлено, что экспериментальные материалы содержат только целевые компоненты (83–87 масс.% β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ в смеси с β - CaSiO_3) и желатин (13–17 масс.%)). Гранулы имеют среднюю плотность не менее 1 г/см³, истинную плотность не менее 2.2 г/см³ и открытую пористость 40–50 %. Они могут быть использованы в травматологии и ортопедии для заполнения и восстановления дефектов костной ткани человека.

Ключевые слова: биоматериалы, гранулы, волластонит, трикальций фосфат, желатин.

Abstract. A series of composite granules was obtained using the emulsion technology from synthetic powders containing tricalcium phosphate and wollastonite in various ratios, and gelatine, which acts as a binder. The experimental materials contain only the target components (83–87 wt.% β - $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ in a mixture with β - CaSiO_3) and gelatine (13–17 wt.%). The granules have an average density of at least 1 g/cm³, a true density of at least 2.2 g/cm³, and an open porosity of 40–50%. They can be used in traumatology and orthopedics to fill and restore defects in human bone tissue.

Keyword: biomaterials, granules, wollastonite, tricalcium phosphate, gelatin.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в травматологии и ортопедии большой интерес с точки зрения возможности применения для восстановления целостности и объема твёрдых тканей вызывают материалы на основе синтетических биосовместимых веществ. Их в определенной степени стремятся приблизить к костной ткани человека. Известно, что кость состоит из минеральной фазы (нанокристаллы карбонатгидроксиапатита), органической составляющей (90–95 % коллагена и 3–5 % неколлагеновых белков) и воды [1]. Коллаген определяет механические свойства кости, предотвращает развитие хрупкости костного вещества. Поэтому присутствие органических веществ в составе биоматериалов способствует улучшению их физико-химических и механических свойств, а также увеличению скорости растворения *in vivo*, что является благоприятным фактором в рамках регенерационной концепции. Чаще всего в качестве органической составляющей используют коллаген, желатин, полисахариды (хитин, хитозан, крахмал, гиалуроновую кислоту, хондроитинсульфат и т.д.), а также синтетические полимеры: полилактиды и их сополимеры с полигликолидами, поликапролактон и некоторые другие [1]. Так, в работе [2] получен биокомпозит на основе гидроксиапатита (ГА , $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) и коллагена, имеющего пористую структуру и состав, приближенный к нативной кости по массовому соотношению коллаген – ГА. Также коммерческие гранулы «Коллапан» включают коллаген [3]. Гранулы «Биальгин» содержат аморфный ГА в полисахаридной матрице альгината натрия [4]. В работах [5, 6] описаны материалы, содержащие желатин в качестве органического связующего. Известно, что желатин является продуктом частичного гидролиза коллагена и не обладает потенциально опасными для организма человека свойствами.

Минеральная фаза подобных материалов состоит, главным образом, из фосфатов кальция, чаще всего ГА и трикальция фосфата (ТКФ, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Материалы на основе ТКФ обладают высокой биосовместимостью и способны стимулировать остеокондукцию и остеоинтеграцию [7]. Также в последние года наряду с фосфатами кальция активно исследуются силикаты кальция (СК) как перспективные стимуляторы процессов репаративного остеогенеза [8]. Отмечается, что ионы SiO_3^{2-} усиливают пролиферацию клеток, а также активизируют процессы остеогенеза и ангиогенеза. В этой связи представляет интерес получение и исследование свойств материалов, сочетающих в своем составе органический биосовместимый компонент (желатин) с трикальция фосфатом и метасиликатом кальция (волластонитом, ВТ, $\beta\text{-CaSiO}_3$).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача данной работы – получение и физико-химическое исследование гранул на основе трикальция фосфата, волластонита и желатина с различными пропорциями компонентов минеральной составляющей.

III. ТЕОРИЯ

Порошки ТКФ и ВТ синтезировали по реакциям осаждения (1 - 2) и (3 - 4), соответственно. Далее их механически смешивали в массовых пропорциях ТКФ/ВТ 80/20, 60/40, 40/60 и 20/80 и использовали для формирования гранул. Также получены гранулы из порошков ТКФ и ВТ.

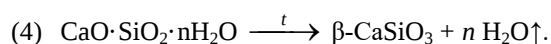
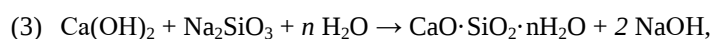
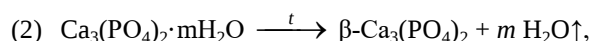
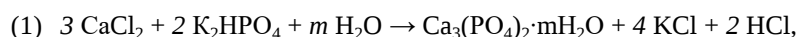


Схема получения объемных материалов приведена на рис. 1. Керамические порошки с заданным массовым соотношением ТКФ/ВТ смешивали с 15 % водного раствора желатина, разогретого до 40 °С, в пропорции 1: 1.2–1.8 г/мл и перемешивали до получения однородной суспензии. Далее ее добавляли по каплям в растительное масло, перемешиваемое при помощи магнитной мешалки со скоростью 1000 об/мин. Образовавшиеся под действием центробежной силы сферические гранулы охлаждали, отмывали от масла изопропиловым спиртом и высушивали при комнатной температуре в течение 24 часов.

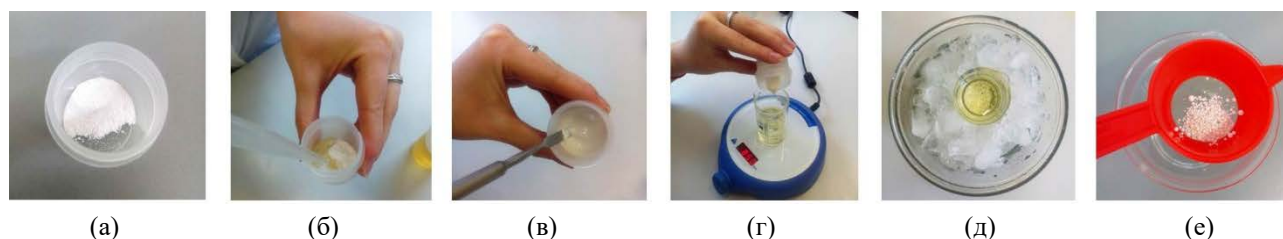


Рис. 1. Схема получения гранул:

- а – подготовка порошка, б – прибавление желатина, в – смешение порошка и желатина,
г – прикапывание суспензии к маслу при перемешивании, д – выдерживание гранул на холоде,
е – отмывка гранул от масла и высушивание на воздухе

ИК-спектры поглощения образцов (в виде таблеток с KBr) регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре «ФТ-801» (Simex). Содержание желатина в материалах определяли по величине массовых потерь образцов различного состава при их прокаливании на воздухе в интервале температур 200–500 °С в муфельной печи «ЭКПС-5» (СКТБ СПУ). Для оценки средней плотности отбирали серию гранул (не менее 30 шт.), для каждой из которых определяли массу, измеряли диаметр и рассчитывали значение плотности как отношение массы к объёму, исходя из предположения о сферической форме частиц [9]. Истинную плотность и пористость устанавливали пикнометрическим методом. Расчёт пористости проводили по значениям средней и истинной плотности [9].

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для верификации состава гранул выполнено их исследование методом ИК-Фурье-спектроскопии, поскольку данный метод позволяет определять органические и минеральные компоненты, в том числе находящиеся в аморфной форме. ИК-спектры гранул из порошков с различной пропорцией ТКФ/ВТ представлены на рис. 2. Установлено, что ИК-спектры гранул содержат все основные полосы поглощения валентных и деформационных колебаний, характерных для ТКФ, ВТ и желатина, то есть все исходные компоненты входят в состав материалов без изменений.

На присутствие в составе гранул ТКФ указывают максимумы поглощения при 545, 589 и 602 см^{-1} , соответствующие валентным колебаниям О-Р-О, а также моды валентных колебаний Р-О при 945, 972, 1035 и 1118 см^{-1} [10]. При 565 см^{-1} фиксируется пик деформационных колебаний О-Si-O, характерный для ВТ. Дублет 647 и 684 см^{-1} соответствует валентным симметричным колебаниям силоксановых мостиков Si-O-Si. Пики в области 850–1100 см^{-1} относятся к асимметричным валентным колебаниям связей Si-O в тетраэдрах SiO₄. Плечо при 1200 см^{-1} соответствует валентному асимметричному колебанию фрагмента Si-O-Si, соединяющего силикатные цепочки в β -CaSiO₃ [11]. Также в ИК-спектрах наблюдаются моды колебаний органических группировок, указывающих на присутствие желатина. В области 1260–1400 см^{-1} фиксируются полосы поглощения, вызванные колебаниями карбоксильных группировок в желатине I типа. При 1550 см^{-1} наблюдается мода деформационных колебаний связей N-H в амиде II. При 1650 см^{-1} проявляются полосы деформационных колебаний связей N-H и валентные колебания связей C=O и O-H [12].

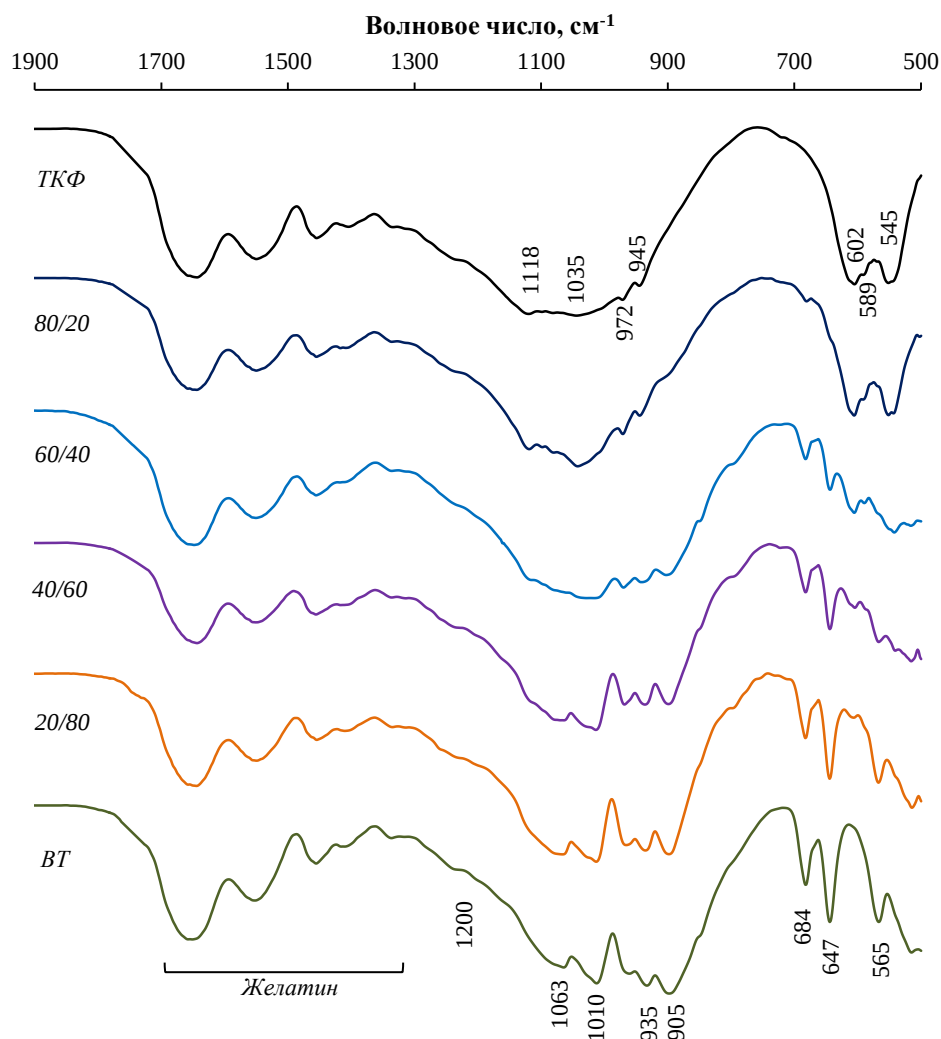


Рис. 2. ИК-спектры гранул с различной пропорцией ТКФ/ВТ

Оценка массовых потерь гранул при прокаливании показала, что в состав материалов входит 13–17 масс. % желатина (табл. 1), остальное – минеральная фаза (смесь ТКФ и ВТ в различных пропорциях). При этом доля органического компонента слабо возрастает по мере увеличения содержания ВТ в материалах. Аналогичная тенденция изменения зафиксирована для открытой пористости, тогда как средняя и истинная плотности снижаются при переходе к гранулам из ВТ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1
ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАНУЛ

ТКФ/ВТ, масс. %	$W_{\text{жел}}$, масс. %	$\rho_{\text{ср}}$, г/см ³	$\rho_{\text{ист}}$, г/см ³	П, %
100 / 0	13.12 ± 0.27	1.57 ± 0.03	2.75 ± 0.07	42.9 ± 1.5
80 / 20	13.45 ± 0.08	1.44 ± 0.01	2.44 ± 0.10	40.9 ± 2.5
60 / 40	13.54 ± 0.44	1.39 ± 0.02	2.53 ± 0.05	45.3 ± 1.0
40 / 60	14.83 ± 0.37	1.27 ± 0.02	2.35 ± 0.04	46.0 ± 0.8
20 / 80	15.47 ± 0.34	1.29 ± 0.02	2.45 ± 0.09	45.5 ± 2.0
0 / 100	17.46 ± 0.13	1.09 ± 0.01	2.20 ± 0.01	50.5 ± 0.2

Обозначения: $W_{\text{жел}}$ – содержание желатина в гранулах, $\rho_{\text{ср}}$, $\rho_{\text{ист}}$ – средняя и истинная плотность гранул, П – открытая пористость гранул

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе выполнено формование синтетических керамических порошков с варьируемой пропорцией ТКФ/ВТ с применением эмульсионного метода. Получены полидисперсные образцы гранул с формой, близкой к сферической, и диаметрами до 3 мм.

Методом ИК-Фурье-спектроскопии верифицирован состав получаемых материалов. Зафиксировано наличие в составе исследуемых образцов ТКФ, ВТ и желатина, а также отсутствие примесных компонентов и/или реактивов, используемых на этапе синтеза и промывки гранул (растительное масло, изопропиловый спирт). Показано, что по мере увеличения доли ВТ в составе гранул, моды валентных и деформационных колебаний, характерных для силикатной фазы, ожидаемо, становятся более выраженными, тогда как интенсивность полос поглощения колебаний фосфат-ионов из состава ТКФ уменьшается. Полосы поглощения группировок органической составляющей имеют близкую интенсивность в ИК-спектрах гранул с различной пропорцией ТКФ/ВТ. Содержание желатина возрастает от 13 масс.% в гранулах из ТКФ до 17.5 масс.% в гранулах из ВТ, что может быть связано с разницей в дисперсности порошков фосфата и силиката кальция или их смачиваемости раствором желатина.

Установлено, что средняя и истинная плотности материалов составляют, соответственно, не менее 1.0 и 2.2 г/см³. Гранулы тяжелее воды, при смачивании водными растворами (к ним относятся все биологические жидкости) частицы тонут, что, в случае биомедицинского применения, позволит материалу оставаться в месте имплантации.

Все составы гранул имеют открытую пористость в интервале 40–50 %. Данные значения пористости обеспечивают проникновение в материал физиологических жидкостей, кровеносных сосудов и остеобластов, а также прорастание и фиксацию костной ткани *in vivo*.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осуществлен синтез гранул из синтетических порошков, содержащих от 0 до 100 масс.% ТКФ в смеси с ВТ. Установлено, что полученные сферические частицы помимо $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и $\beta\text{-CaSiO}_3$ включают 13–17 масс. % желатина, выступающего в качестве связующего компонента, склеивающего керамические частицы. Гранулы характеризуются открытой пористостью в интервале 40–50 % и могут быть использованы в травматологии, ортопедии и стоматологии в качестве материалов для заполнения и восстановления дефектов костной ткани.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баринов С. М. Керамические и композиционные материалы на основе фосфатов кальция для медицины // Успехи химии. 2010. Т. 79, № 1. С. 15–32.
2. Горшнев В. Н., Телешев А. Т. Коллаген-гидроксиапатитовый композит медицинского назначения // Актуальные вопросы биологической физики и химии. БФФА-2015: материалы X междунар. науч.-техн. конф. 2015. С. 156–159.
3. Берченко Г. Н., Кесян Г. А., Микелаишвили Д. С. Применение биокомпозиционного наноструктурированного препарата Коллапан и обогащённой тромбоцитами аутоплазмы в инжиниринге костной ткани // Травма. 2010. Т. 11, № 1. С. 7–14.
4. Кирилова И. А., Садовой М. А., Подорожная В. Т. Сравнительная характеристика материалов для костной пластики: состав и свойства // Хирургия позвоночника. 2012. Т. 3. С. 72–83.
5. Пономарева Н. И., Попрыгина Т. Д., Карпов С. И. [и др.]. Синтез композитов гидроксиапатита с биополимерами с повышенной микротвёрдостью // Вестник ВГУ, серия: химия, биология, фармация. 2012. № 2. С. 82–86.
6. Yokota K., Matsuno T., Tabata Y., Mataga I. Evaluation of porous hydroxyapatite granule and gelatin hydrogel microsphere composite in bone regeneration // Journal of Hard Tissue Biology. 2017. Vol. 26 (2). P. 203–214.
7. Курманалина М. А., Ураз Р. М. Синтетические биоматериалы в стоматологии // Вестник КазНМУ. 2018. № 1. С. 538–541.
8. Wu C., Chang J. A review of bioactive silicate ceramics // Biomedical Materials. 2013. Vol. 8. 12 p.
9. Скрипникова Н. К., Тогидний М. Л. Методы определения основных свойств строительных материалов: методические указания к лабораторным работам. Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного ун-та, 2013. 20 с.
10. Rey C., Marsan O., Combes C. [et al.]. Characterization of calcium phosphates using vibrational spectroscopies // Advances in Calcium Phosphate Biomaterials. 2014. P. 229–266.
11. Handke M. FT-IR isotopic shifted spectra of calcium silicates // Fourier and computerized infrared spectroscopy. 1985. Vol. 553. P. 395–396.
12. Hossana M. J., Gafurb M. A., Kadirb M. R., Karima M. M. Preparation and characterization of gelatin-hydroxyapatite composite for bone tissue engineering // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS. 2014. Vol. 14, no 1. P. 24–32.

УДК 004.896

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-96-100

РАЗРАБОТКА СВЁРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПИЩЕВОГО ПОВЕДЕНИЯ КРУПНОГО РОГАТОГО СКОТА

DEVELOPMENT OF A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR THE CLASSIFICATION OF THE FEEDING BEHAVIOR OF CATTLE

Д. Н. Шлома

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. N. Shloma

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В исследовании, приведен обзор сведений об использовании характеристик пищевого поведения крупного рогатого скота (КРС), для выявления у них проблем со здоровьем и благополучием. Представлен обзор алгоритмов машинного обучения, пригодных для классификации пищевого поведения КРС и обосновано использование свёрточной нейронной сети (CNN). Показано использование внутрижелудочного болюса и недоузка, в качестве источников входных данных для CNN. Для решения проблем практической реализации разработанной CNN, обозначен компромисс между производительностью CNN, сложностью вычислений и требуемым аппаратным ресурсам, выполнен поиск гиперпараметров и произведена оптимизация CNN.

Ключевые слова: свёрточная нейронная сеть, пищевое поведение, классификация, внутрижелудочный болюс, датчик ускорения, недоузок, крупный рогатый скот

Abstract. The study provides an overview of the evidence for using the eating behavior characteristics of bovine animals to identify health and well-being problems. A review of machine learning algorithms suitable for classifying the feeding behavior of cattle is presented and the use of a convolutional neural network (CNN) is substantiated. Shows the use of intragastric bolus and halter as input sources for CNN. To solve the problems of practical implementation of the developed CNN, a trade-off between CNN performance, computational complexity and required hardware resources was identified, a search for hyperparameters was performed, and CNN optimization was performed.

Keyword: convolutional neural network, feeding behavior, classification, intragastric bolus, acceleration sensor, halter, pressure sensor, cattle.

I. ВВЕДЕНИЕ

Классификация пищевого поведения крупного рогатого скота (КРС), позволяет выявить такую важную поведенческую характеристику как руминацию, которая является одним из ключевых показателей, предоставляющих важную информацию для эффективной оценки здоровья и благополучия животных. Изменение периодов руминации, свидетельствует о том, что КРС имеет заболевания, травмы, употребляет неподходящий корм или испытывает дискомфорт, например из-за стресса. Получение истинных данных о периодах руминации КРС, способом непосредственного наблюдения за процессом жизнедеятельности КРС, требует значительных усилий от наблюдателя, и зачастую приводит к накоплению погрешности измерений [1,2]. Использование недоузка современной конструкции, является общепринятым подходом получения истинных данных о пищевом поведении КРС, за счет автоматического измерения движения челюстей КРС и определения периодов руминации [3]. Различные исследования [1, 4] сообщают о высокой корреляции Спирмена (0,96;0,75) для руминации и (0,96;0,81) для приема пищи, соответственно. Однако недоузок является дорогостоящим устройством, подверженным механическим повреждениям, вследствие взаимодействия КРС между собой, характеризуется

непродолжительным временем автономной работы, и при долгом использовании может создавать дискомфорт для КРС.

В работах [3, 4] описывается применение внутрижелудочного болюса (ВЖБ) для классификации пищевого поведения КРС, с использованием метода опорных векторов, где в качестве входных данных, выступают временные ряды ускорений от сокращения мышц желудка КРС, полученные с ВЖБ. Однако, применение метода опорных векторов, требует не только, значительной вычислительной мощности для извлечения признаков, позволяющих точно различать пищевое поведение, но и привлечения экспертов в данной предметной области. Кроме того, несмотря на эффективность, таких признаков для классификации пищевого поведения, их нельзя расширить на дополнительные классы поведения, поскольку, в этом случае потребуется поиск и извлечение новых признаков, что вносит дополнительную трудоемкость.

В такой ситуации, целесообразным является исследовать возможность использования свёрточной нейронной сети (CNN) глубокого обучения (DL) для классификации пищевого поведения КРС, с выделением типов пищевого поведения и времени, затрачиваемого животным на руминацию.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В исследовании [3] продемонстрировано использование CNN для идентификации периодов выпаса КРС, однако цель исследования являлась бинарной, что существенно снижало трудоемкость классификации, чем в задаче с несколькими состояниями. В работе [5] продемонстрировано, что рекуррентная нейронная сеть с долговременной кратковременной памятью (RNN-LSTM) классифицирует восемь типов поведения КРС, используя входные данные с аналогичных источников. Но, при этом RNN-LSTM, в связи со значительной сложностью алгоритма, для своего функционирования требует существенных вычислительных и энергетических мощностей, что на современном уровне развития техники, не осуществимо в мобильном исполнении.

Анализ показывает, что CNN подобно RNN-LSTM, представляют собой сложные математические модели, которые при развертывании могут быть требовательными к мощности аппаратного обеспечения. Однако, CNN позволяют использовать компромисс между требуемой производительностью и объемом модели, что может способствовать снижению их требований к мощности аппаратного обеспечения и энергопотреблению, и, ожидаемо, обеспечит их функционирование на мобильных средствах измерения [3, 5].

Следовательно, целью настоящего исследования является разработка CNN глубокого обучения (DL) для классификации пищевого поведения КРС. Использование CNN, разработанной в данном исследовании, позволит устранить трудоемкость процесса создания функций, который сопровождает подходы машинного обучения (ML) и затрудняет ввод новых состояний поведения в прогнозную модель. В качестве источников входных данных, для разработанной CNN, используются ВЖБ и недоузок. При этом входными данными являются: с ВЖБ временные ряды ускорений от мышц желудка, а с недоузка – временные ряды с достоверной информацией о типе пищевого поведения.

III. ТЕОРИЯ

Архитектура классификатора была основана на многоклассовой CNN, которая принимает на вход три сегмента временного ряда, соответственно, по одному для каждой оси X, Y и Z и выводит прогнозируемый класс. Базовая архитектура состоит из двух логических блоков. Экстрактор признаков состоит из 4 блоков сверточных уровней: «Dropout», «BatchNorm» и «ReLU». Архитектура классификатора отображает размер ядра и последовательности для всех слоев. На последнем уровне размер ядра равен 1, что позволяет расширять карту признаков от 64 до 512. Схема, детализирующая процесс разработки CNN, который включает сбор данных, предварительную обработку данных, поиск гиперпараметров, оптимизацию сети и оценку производительности, показана на рис. 1.

Экстрактор содержит слой «Adaptive Average Pooling», который используется для агрегирования функции в пространственном измерении и создает согласованный выходной размер для случаев, когда длина ввода варьируется. Такой прием необходим для изучения влияния размера окна на производительность. Главная часть состоит из одного полносвязного слоя с 512 входами и 3 выходами, за которыми следует слой «Softmax» для создания классифицированного вывода.

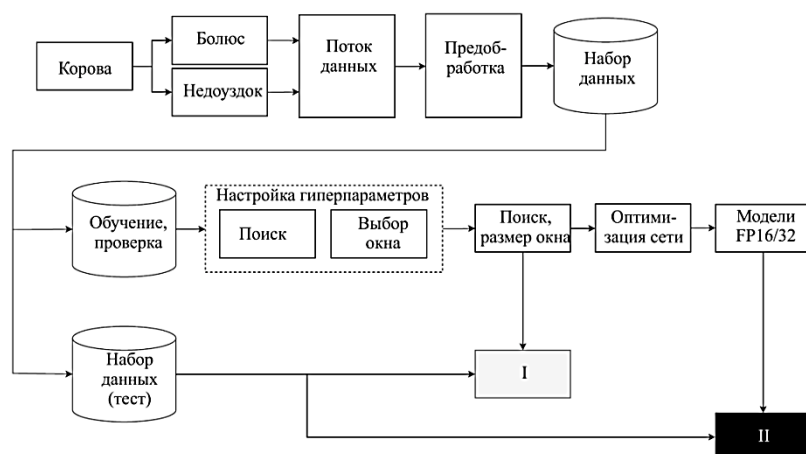


Рис. 1. Схема, показывающая все этапы разработки предлагаемой CNN:

I – производительность исходной модели; II – производительность оптимизированной модели

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все исследования проводились в период с 5 по 19 июля 2022 г. на коровах голштинской породы, содержащихся на молочной ферме ЗАО «Конёвское» (Россия, Новосибирская обл.). В качестве объектов для исследования, были отобраны пять коров, при этом критерием отбора являлось наличие болуса, уже установленного в желудке коровы. Для идентификации коровам были присвоены номера. На время исследований, для коров сохранялся привычный распорядок дня, тип и количество потребляемой ими пищи и жидкости.

В процессе исследования, корову №1 помещали в отдельный загон и закрепляли на ней недоуздок, который фиксировал: порядковый номер измерения, время измерения, тип пищевого поведения. Внутривентрикулярный болус коровы №1 фиксировал: порядковый номер измерения, время измерения, значения ускорений мышц желудка. Частота дискретизации болуса и недоуздки составляла 10 Гц. Фиксация данных происходила в файлы, находящиеся во внутренней памяти соответствующего устройства, при этом, формат имени каждого файла, соответствовал дате каждого суток эксперимента. По истечении 72 ч. исследование завершалось, с коровы №1 снимали недоуздок и возвращали ее обратно в стадо. Затем исследование повторялось для следующей отобранной коровы.

Данные, собранные во время исследований с недоуздки и болуса, синхронизировались по дате и времени измерений и объединялись в общий массив данных для каждой коровы, приблизительным объемом 3,75 млн. строк измерений. Для классификации пищевого поведения, случайным образом была выбрана корова №4, и из соответствующего ей общего массива данных, была сделана выборка, объемом в 26,1 тыс. измерений, что соответствует 30 мин исследования. Выборка измерений для коровы №4 (дата исследования 14 июля 2022 г.) приведена в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1
ВЫБОРКА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КОРОВЫ №4

№	Дата и время измерения	Значения ускорений мышц желудка коровы, g			Тип пищевого поведения
		ось X	ось Y	ось Z	
469796	2022-07-14 09:00:36.011718	872.0	-16732.0	-1248.0	2
469797	2022-07-14 09:00:36.080684	860.0	-16856.0	-1176.0	2
469798	2022-07-14 09:00:36.149650	808.0	-16824.0	-1256.0	2
469799	2022-07-14 09:00:36.218616	776.0	-16748.0	-1256.0	0
469800	2022-07-14 09:00:36.287582	876.0	-16788.0	-1172.0	0
...	...	...	...	...	...
495894	2022-07-14 09:29:59.908487	-1836.0	6220.0	-17016.0	1
495895	2022-07-14 09:29:59.977414	-1912.0	6196.0	-17040.0	1
495896	2022-07-14 09:30:00.046341	-1856.0	6120.0	-17220.0	1

Тип пищевого поведения: 1 – руминация, 2 – прием пищи; 0 – животное занято деятельностью, не связанной пищевым поведением №1 и №2, например прием жидкости.

Разработанная CNN обучалась с помощью оптимизатора AdamW [4] со скоростью обучения 1×10^{-4} . Размер пакета был установлен на 256. Сеть была обучена не более чем на 50 примерах с ранним завершением, когда потери при проверке достигли плато [6] при выдержке 15 циклов и изменении $\Delta 0,01$. Кроме того, для всех результатов снижения весов, при λ использовалось значение 0,01. Оптимальная модель была выбрана из тренировочного цикла после завершения процесса.

Балл $F1$ использовался для оценки производительности CNN, и определялся как среднее гармоническое параметров $precision$ и $recall$, по выражению:

$$F1 = 2 \cdot \frac{precision \cdot recall}{precision + recall} \quad (1)$$

Параметры $precision$ и $recall$ из выражения (1) определялись следующим образом:

$$precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

Поиск по гиперпараметрам был выполнен для оптимизации количества сверточных признаков в экстракторе, размера ядра сверточных фильтров и слоев [7]. Количество фильтров для экстрактора признаков остается постоянным на протяжении всего поиска гиперпараметров. Принимая во внимание стохастический характер обучения модели, процесс повторялся 5 раз и модель с наибольшим средним значением $F1$, среди всех, была выбрана. CNN с четырьмя сверточными блоками, размером ядра 16, слоем «Dropout» и вероятностью 0,25 дала наилучшие результаты. Средняя производительность проверки для этих параметров ($F1$, $precision$ и $recall$) была соответственно 0,82, 0,83 и 0,82. Матрица ошибок при проверке показана на рис. 2(а).

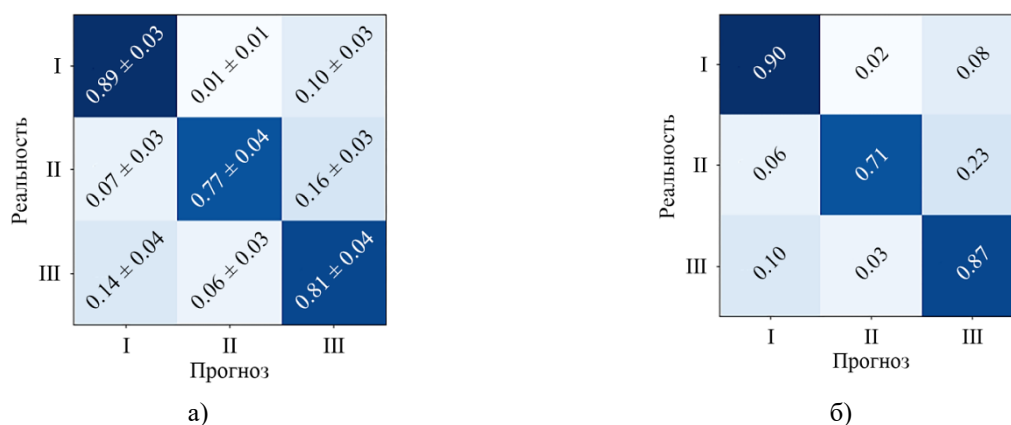


Рис. 2. Матрица ошибок полной сети после настройки гиперпараметров:

а) набор проверки; б) тестовый набор; I – деятельность, не связанная пищевым поведением II и III; II – руминация; III – прием пищи

Матрица ошибок полной сети после настройки гиперпараметров, также содержит стандартные отклонения для всех ячеек. Например, нормализованная производительность TP «прием пищи» составляет $0,81 \pm 0,04$, тогда как «руминация» ошибочно классифицируется как «прием пищи» при $0,16 \pm 0,03$. Во всех случаях стандартное отклонение ниже 0,04. Если предположить, что среднее время руминации КРС составляет около 400 мин. в день, то увеличение чувствительности на 1% приведет к увеличению времени, затрачиваемого на руминацию, примерно на 4 мин. в день.

В следующем случае, для оценки на тестовом наборе была выбрана модель с наилучшей производительностью на проверочном наборе. Производительность проверочного набора была ($F1$, $precision$ и $recall$) соответственно (0,86; 0,87; 0,86), а тестовая выборка ($F1$, $precision$ и $recall$) соответственно (0,82; 0,84; 0,82).

Матрица ошибок при проверке в тестовом наборе показана на рис. 2(б). Поскольку пищевые поведения «прием пищи» и «руминация» характеризуются у КРС сходными движениями челюстей, то модель испытывает наибольшую ошибку между этими двумя состояниями; тогда как ошибка между другими состояниями значи-

тельно ниже. Для полного набора тестовых данных без стратификации или балансировки, взвешенные показатели производительности ($F1$, *precision* и *recall*) соответственно составили (0,82;0,87;0,81).

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В исследовании показано, что разработанная CNN, обеспечивает точную классификацию пищевого поведения КРС. Для оптимизации архитектуры модели была выполнена настройка гиперпараметров, при этом, производительность модели оценивалась как функция длины временного окна [7]. Поскольку реализация моделей классификации пищевого поведения КРС регулируется ограничениями, устанавливаемыми вычислительными ресурсами, была произведена оценка влияния на производительность CNN функций оптимизации и обучения смешанной точности. Результаты подтверждают, что высокая производительность может быть достигнута при значительном сокращении модели, что в свою очередь, значительно снижает сложность вычислений и требований к объему памяти. Модель CNN с оптимизированными фильтрами в количестве 48 штук, способна классифицировать три типа пищевого поведения КРС – руминация (а), прием пищи (б) и деятельность, не связанная пищевым поведением (а) и (б), при этом $F1 = 0,82$.

Полученная производительность разработанной CNN сопоставима с классическими подходами к ML и DL, о которых сообщается в различных исследованиях [8].

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании, представлена реализация разработанной CNN, пригодной для классификации пищевого поведения КРС. Показано использование внутрижелудочного болюса и недоузка, в качестве источников входных данных для CNN. Обозначен компромисс между производительностью разработанной CNN, сложностью вычислений и требуемым аппаратным ресурсам, затем выполнен поиск гиперпараметров и произведена оптимизация CNN. Полученная производительность разработанной CNN сравнена с классическими подходами к ML и DL. Полученная CNN может быть использована в системах мониторинга КРС, для выявления у них проблем со здоровьем и благополучием. В последующем, представленная CNN, может быть использована для выявления таких поведенческих состояний КРС, как «стояние», «лежание» и «ходьба», в случае беспривязного содержания – выявления хромоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Л. В. Разработка и апробация алгоритмов выделения комплексных показателей состояния здоровья вымени животных на основе анализа данных с сенсоров предприятия молочного животноводства // Вестник ЧГУ. 2017. № 1. С. 19–21.
2. Шлома Д. Н. Разработка системы сбора данных для экспериментальных исследований цифровизации молочно-мясного скотоводства // Информационные технологии и автоматизация управления: материалы XIII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, работников образования и промышленности. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2022. С. 295–305.
3. Rahman A., Smith D. V., Little B., Ingham A. B., Greenwood P. L., Bishop-Hurley G.J. Cattle behaviour classification from collar halter, and ear tag sensors // Inf. Process. Agric. 2018. Pp. 31–40.
4. Robert B., White B. J., Renter D. G., Larson R. L. Evaluation of three-dimensional accelerometers to monitor and classify behavior patterns in cattle // Comput. Electron. Agric. 2009. Pp. 80–84.
5. Smith D., Rahman A., Bishop-Hurley G. J., Hills J., Shahriar S., Henry D., Rawnsley R. Behavior classification of cows fitted with motion collars: Decomposing multi-class classification into a set of binary problems // Comput. Electron. Agric. 2016. Pp. 40–50.
6. Han S., Pool J., Tran J., Dally W. J. Learning both weights and connections for efficient neural networks // Adv. Neural Inf. Process. Syst. 2015. Pp. 1135–1143.
7. Han S., Mao H., Dally W. J. Deep compression: Compressing deep neural networks with pruning, trained quantization and huffman coding. arXiv. 2015.
8. Rastegari M., Ordonez V., Redmon J., Farhadi A. Xnor-net: Imagenet classification using binary convolutional neural networks // In Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Amsterdam, The Netherlands, 11–14 October 2016. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016. Pp. 525–542.