

EISSN 1694-836X
ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 2 (44)



БИШКЕК

2022

ИМА НАН КР

ISSN 1694-5050 (печатная версия)
ISSN 1694-836X (электронная версия)

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 2 (44)

Журнал входит в РИНЦ, а также в перечень ВАК Кыргызской Республики рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал издается с 1996 года.

Зарегистрирован Министерством юстиции
Кыргызской Республики
Свидетельство № 1503 от 24 марта 2020 г.



БИШКЕК

2022

ИМА НАН КР

П 78

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–Бишкек: ИМА, 2022.– №2 (44). – 112 с.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

д.т.н., профессор Брякин Иван Васильевич ✉
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

к.т.н. Верзунев Сергей Николаевич ✉
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д.т.н., академик РАН Евтушенко Юрий Гаврилович ✉
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН (Москва)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Карандаев Александр Сергеевич ✉
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск)

д.ф.-м.н. академик НАН РК Калимолдаев Максат Нурадилович
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы)

д.т.н., член-кор. АЭН РФ Макаричев Юрий Александрович ✉
Самарский государственный технический университет (Самара)

д.т.н., профессор Храмшин Вадим Рифхатович ✉
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск)

д.т.н., профессор Еремин Евгений Леонидович ✉
Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск)

д.т.н., профессор Лыченко Наталья Михайловна ✉
Кыргызско-Российский славянский университет (Бишкек)

д.т.н., профессор Исмаилов Бактыбек Исмаилович ✉
Агентство по аккредитации образовательных программ и организаций (Бишкек)

д.т.н., профессор Бочкарев Игорь Викторович ✉
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.т.н., профессор Галбаев Жалалидин Токтобаевич ✉
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.ф.-м.н., профессор Сатыбаев Абдуганы Джунусович ✉
Ошский технологический университет им. акад. М.М. Адышева (Ош)

д.т.н., профессор Бакасова Айна Бакасовна ✉
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

д.т.н. Янко Дмитрий Владимирович ✉
ОАО «Кыргызтелеком» (Бишкек)

к.ф.-м.н., с.н.с. Керимкулова Гулсаат Кубатбековна ✉
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

к.т.н. Аскалиева Гулзада Орозобаевна ✉
Институт машиноведения и автоматизации НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

В журнале публикуются статьи по информационным технологиям и обработке информации, математическому и компьютерному моделированию динамических систем и процессов, автоматическому управлению динамическими системами и процессами

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук КР.

Телефон: +996 553 72-20-30.

E-mail: verzunov@hotmail.com

Полная электронная версия журнала: <http://imash.kg/jrn/index.php/pau>

ISSN 1694-5050, 1694-836X © Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ	
ОБЗОР АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ Асан уулу А., Бакасова А. Б.	4-14
РАЗВИТИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ Асанова С. М.	15-21
АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ГОРОДА БИШКЕК ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ Каримова Г.Т.	22-31
ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДЫ COMSOLFLOW ДЛЯ ДЕМОСТРАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОДОВОРОТНОЙ ГЭС Обозов А. Дж., Медеров Т.Т., Акпаралиев Р.А., Оразбаев К.Н.	32-40
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОКАЛЬНО ИЗОТРОПНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ Керимкулова Г.К., Пресняков К.А., Аскалиева Г.О.	41-44
АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ СЕН-ВЕНАНА ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО УКЛОНА Тукембаева Г.Ч., Темиров Б.К.	45-51
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ. ВЛИЯНИЕ СЕТОЧНОГО ШАГА РАЗНОСТНОЙ ЗАДАЧИ Урусова И.Р.	52-62
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ Керимкулова Г.К., Пресняков К.А., Аскалиева Г.О.	63-69
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ (НА ПРИМЕРЕ НАРЫНСКОЙ ОБЛАСТИ) Асанов А.К., Джолдошбеков Б.Ж., Джусупбекова Н.К., Аркарчиева М.К.	70-76
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ	
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТА ОБРЫВА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРОВОДА НОВОГО ТИПА Эралиева Г.Ш., Ниязова Г.Н., Бузурманкулова Ч.М., Сулайманова Ж. А.	77-84
ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКА ГРАВИТАЦИОННОЙ МИКРОГЭС Обозов А. Дж., Оразбаев К.Н.	85-91
АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ Брякин И.В., Дьяченко Е.И.	92-103
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЛЮЗА ГИДРОСТЕНДА Акпаралиев Р.А., Медеров Т.	104-111

УДК 004.8: 621.315.23

Бакасова А. Б. bakasovaaina@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук Кыргызской Республики. Кыргызстан, Бишкек, проспект Чуй, 265

Асан уулу Аскам asanaskat@gmail.com

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, Бишкек, проспект Ч. Айтматова, 66

ОБЗОР АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДСТАНЦИИ

В области электромагнетизма краевые задачи – это задачи, для которых электромагнитное поле в заданной области пространства определяется из знания поля над границей области. Для решения краевых задач обычно используются традиционные численные методы, такие, как метод конечных разностей (МКР) во временной области и метод конечных элементов (МКЭ). Однако эти методы включают дискретизацию области для сведения ее к системе линейных алгебраических уравнений более высокого порядка и поиска решения для них. Как известно, эти методы не являются локальными, т.е. они не дают значения решения непосредственно в произвольной точке, где необходимо определить поле, а его значение должно извлекаться из полного решения поля, и, следовательно, не поддаются параллельной обработке. В связи с этим в статье рассмотрено применение нейронных сетей для краевых задач с граничным условием Дирихле и со смешанными граничными условиями.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка, краевые задачи, граничные условия, искусственный интеллект, нейронная сеть.

Введение

Вторичное оборудование высоковольтных электрических подстанций (ВЭП) на протяжении всего срока службы подвергается электромагнитным воздействиям разного вида. Невыполнение условий электромагнитной совместимости (ЭМС) приводит к повреждению вторичного оборудования, неправильным действиям (отказам, излишним или ложным срабатываниям) устройств релейной защиты и автоматизации, перекрытию изоляции кабелей вторичной коммутации и клемм шкафов вторичной коммутации, сбою в работе автоматизированных рабочих мест персонала и т.д., существенно снижает надежность работы энергообъекта.

Критерием выполнения условий ЭМС является обеспечение электромагнитной обстановки, при которой наибольшие возможные уровни электромагнитных воздействий всех видов на объекте электросетевого хозяйства не превышают допустимых значений для каждого конкретного вторичного оборудования.

Для обеспечения электромагнитной обстановки (ЭМО) на этапе проектирования ВЭП необходимы расчеты по определению электромагнитных полей в заданной области пространства.

Постановка задачи

Выбор альтернативного метода моделирования ЭМО на основе сравнительного анализа численных методов решения краевых задач электромагнетизма.

Решение задачи

Численный метод, основанный на нейронной сети (НС), обеспечивает альтернативный подход к решению краевых задач и может быть эффективно реализован на параллельных архитектурах, он может выиграть от достижений в компьютерных

архитектурах на основе искусственного интеллекта (ИИ) [1,2]. Основными преимуществами численного метода на основе НС являются дискретные точки данных, в которых вычисляется поле, которые могут быть неструктурированными, и, следовательно, вопросы построения сетки (однородной или неоднородной) не являются фактором, при котором решения находятся в дифференцируемой закрытой аналитической форме, что позволяет избежать необходимости интерполяции между точками данных, где решения получены с использованием других методов. Кроме того, разрабатываются и внедряются компьютерные архитектуры, оптимизированные для более эффективного выполнения задач обучения и логических выводов. В [3] представлен метод, основанный на использовании НС для решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, где рассматриваются только краевые задачи с граничным условием Дирихле на однородной прямоугольной сетке [4].

В этой работе вычисление поля на основе НС сформулировано и продемонстрировано для задач электромагнетизма, где была расширена задача, рассмотренная в [3], по двум направлениям: во-первых, анализируются краевые задачи со смешанными граничными условиями, во-вторых, исследуется неоднородная обучающая сетка, чтобы продемонстрировать, что этот метод не ограничен дискретизацией домена как традиционный метод.

Разработан, реализован и исследован метод на основе НС для решения уравнения Лапласа с граничным условием Дирихле и уравнения Пуассона со смешанным граничным условием. Численные исследования проводились для того, чтобы понять эффективность метода, основанного на НС, и обеспечить качественное понимание различных задействованных параметров.

Рассмотрим краевые задачи, где электромагнитное поле $\psi(x)$ задается линейным дифференциальным уравнением в частных производных (УЧП) второго порядка с учетом граничного условия краевых задач:

$$G(x, \psi(x), \nabla \psi(x), \nabla^2 \psi(x)) = 0, \quad \forall x \in D. \quad (1)$$

Здесь $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, где R^n — независимая переменная в области $D \subset R^n$, а $\psi(x)$ —

неизвестное (скалярнозначное) решение, $\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right\}$ — оператор набла. Граничные

условия можно разложить в виде $\partial D = \partial_d D \cup \partial_\tau D$, а $\partial_d D$ часть ∂D , где задаются существенные граничные условия.

Для решения этих краевых задач методом на основе НС строится пробная форма решения, которая записывается в виде суммы двух частей: первая часть удовлетворяет граничным условиям и не содержит настраиваемых параметров, а вторая часть включает нейронную сеть с прямой связью. С регулируемыми параметрами строится так, чтобы не вносить вклад в граничные условия:

$$\psi_i(x, W, b) = \hat{\psi}(x) + F(x)N(x, W, b). \quad (2)$$

$N(x, W, b)$ представляет собой НС с прямой связью с весами W и смещениями b . $F(x)$ выбирается таким образом, чтобы вторая часть не вносила вклад в граничные условия.

В таком случае задача расчета поля сводится к изучению параметров НС, W и b , что делается путем предварительного преобразования уравнения (1) в дискретизированную версию и применения его в дискретной области:

$$\hat{D} = \{x^{(i)} \in D; i = 1, \dots, m\}, \quad (3)$$

$$G(x^{(i)}, \psi(x^{(i)}), \nabla \psi(x^{(i)}), \nabla^2 \psi(x^{(i)})) = 0, \quad \forall x^{(i)} \in D, \quad (4)$$

а затем обучение НС, где ошибка УЧП, соответствующая $x^{(i)}$, должна стать равной нулю.

$$W, b = \arg \min_{W, b} G(x^{(i)}, \psi_t(x^{(i)}, W, b), \nabla \psi_t(x^{(i)}, W, b), \nabla^2 \psi_t(x^{(i)}, W, b))^2, \quad (5)$$

Здесь следует обратить внимание, что вычисление этой функции принадлежности включает не только выход сети, но и производные выхода по отношению к любому из ее входов.

Архитектура нейронной сети. Нейронная сеть, которая будет реализована для решения данной задачи, представляет собой трехслойную сеть с входным слоем ($n+1$ узлов), скрытым слоем (H узлов) и выходным слоем (1 узел), как показано на рис.1. Сигмовидная функция ($\sigma(\cdot)$) будет использоваться как функция активации для скрытого слоя [5]:

$$\begin{aligned} h &= W^{[1]}x + b^{[1]} \\ N &= W^{[2]}\sigma(h), \end{aligned} \quad (6)$$

где $W^{[1]} \in R^{H \times n}$, $W^{[2]} \in R^{1 \times H}$ и $h, b^{[1]} \in R^{H \times 1}$. $W_j^{[1]}$ используется для обозначения j -го столбца $W^{[1]}$.

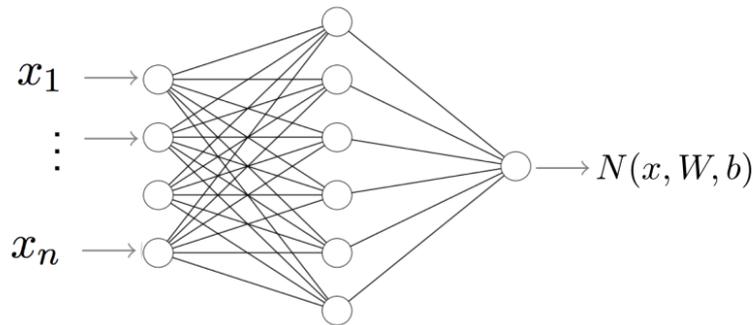


Рисунок 1—Архитектура нейронной сети с n - входными узлами, H -скрытыми узлами и 1- выходным узлом

Вычисление производной выходной сети. Для этой нейронной сети можно показать, что

$$\frac{\partial^{\lambda_1}}{\partial x_1^{\lambda_1}} \frac{\partial^{\lambda_2}}{\partial x_2^{\lambda_2}} \dots \frac{\partial^{\lambda_n}}{\partial x_n^{\lambda_n}} N = \sum_{i=1}^H W_i^{[2]} \left(\prod_{j=1}^n (W_{ij}^{[1]})^{\lambda_j} \right) \sigma^{(\lambda)}(h_i), \quad (7)$$

где $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ и $\sigma^{(\lambda)}(h_i)$ обозначает производную сигмоиды λ -го порядка.

Следовательно, производная первого порядка от N по любому входному параметру x_j определяется выражением

$$\frac{\partial N}{\partial x_j} = \sum_{i=1}^H W_i^{[2]} (W_{ij}^{[1]}) \sigma^{(1)}(h_i) = (W^{[2]} \circ W_j^{[1]}) \sigma^{(1)}(h_i), \quad (8)$$

что можно интерпретировать как результат нейронной сети с прямой связью той же схемы, где функция активации для скрытого слоя задается производной первого порядка от сигмоиды вместо сигмоиды, а $W_i^{[2]}$ заменен на $W^{[2]} \circ W_j^{[1]}$.

Точно так же производная второго порядка N по x_j может быть интерпретирована как выход нейронной сети с прямой связью с той же архитектурой, где функция активации для скрытого слоя задается производной второго порядка сигмоиды и $W_i^{[2]}$ заменено на $W^{[2]} \circ (W_j^{[1]} \circ W_j^{[1]})$.

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x_j^2} = \sum_{i=1}^H W_i^{[2]} (W_j^{[1]})^2 \sigma^{(2)}(h_i) = (W^{[2]} \circ W_j^{[1]} \circ W_j^{[1]}) \sigma^{(2)}(h_i). \quad (9)$$

Для функции принадлежности, которая включает выход сети, а также производные от выхода сети, эти интерпретации становятся чрезвычайно полезными во время обучения, когда функция принадлежности оптимизируется [6].

Сформулированный метод реализован для нахождения решения двух краевых задач - уравнения Лапласа с граничным условием Дирихле и уравнения Пуассона со смешанным граничным условием. В обоих примерах областью выбран квадрат $D = [0; 1] [0; 1]$. Нейронная сеть была реализована с использованием структуры Tensor Flow и оптимизирована с использованием стохастического градиентного спуска (СГС) с медленной скоростью обучения и регуляризацией [7].

Уравнение Лапласа с граничным условием Дирихле

Распределение электростатического потенциала внутри прямоугольной области, где задан потенциал на границе, задается уравнением Лапласа с граничным условием Дирихле в двумерной прямоугольной области. Метод на основе НС используется для вычисления решения и сравнения с аналитическим решением [3]:

$$\nabla^2 \psi(x) = 0, \quad \forall x \in D. \quad (10)$$

Граничные условия:

$$\psi(x) = 0, \quad \forall x \in (x_1, x_2) \in \begin{cases} \partial D |x_1| = 0 \\ \partial D |x_1| = 1 \\ \partial D |x_2| = 0 \end{cases}$$

$$\psi(x) = \sin(\pi x_1), \quad \forall x \in (x_1, x_2) \in \partial D |x_2| = 1, \quad (11)$$

Аналитическое решение:

$$\psi_a(x) = \frac{1}{e^\pi - e^{-\pi}} \sin(\pi x_1) (e^{\pi x_2} - e^{-\pi x_2}). \quad (12)$$

Пробное решение, построенное для метода на основе НС:

$$\psi_i(x) = x_2 \sin(\pi x_1) + x_1(1-x_1)x_2(1-x_2)N(x, W, b). \quad (13)$$

В этом случае функция принадлежности определяется выражением:

$$-\pi^2 x_2 \sin(\pi x_1) +$$

$$x_2(1-x_2) \left(x_1(1-x_1) \frac{\partial^2 N}{\partial x_1^2} + (2-4x_1) \frac{\partial N}{\partial x_1} - 2N \right) +$$

$$x_1(1-x_1) \left(x_2(1-x_2) \frac{\partial^2 N}{\partial x_2^2} + (2-4x_2) \frac{\partial N}{\partial x_2} - 2N \right) \quad (14)$$

Аналитическое решение (рис. 2) и решение на основе НС (рис. 3), рассчитанные путем минимизации функции принадлежности при $K=16$ и $H=15$, показаны ниже.

Абсолютное значение разницы между двумя решениями $|\psi_a(x) - \psi_t(x)|$ также изображено на рис. 4.

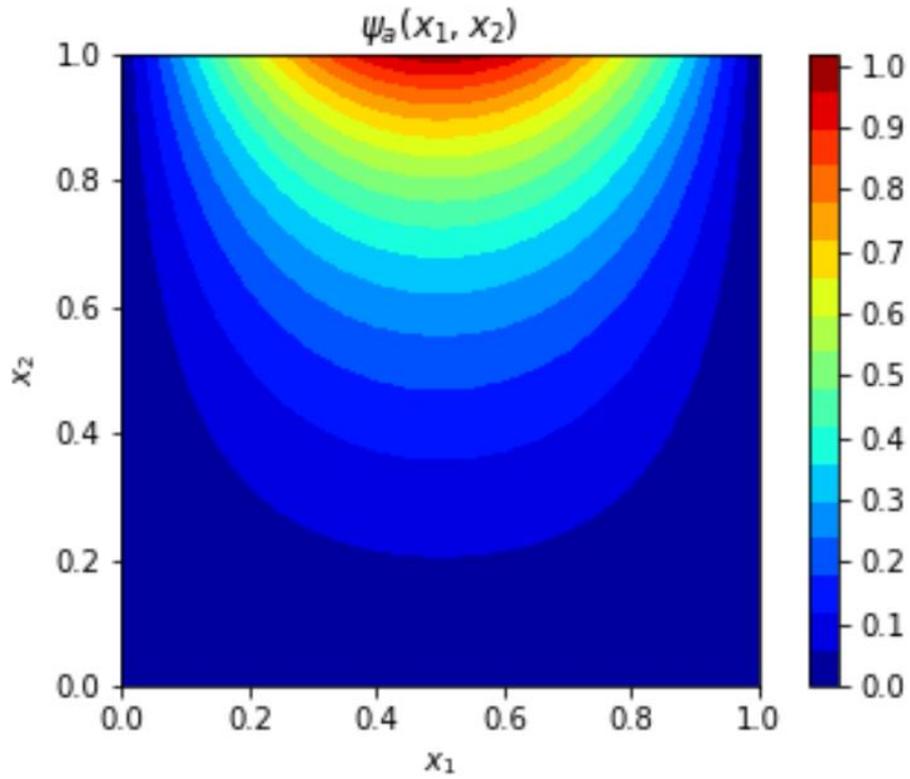


Рисунок 2 — Абсолютное решение

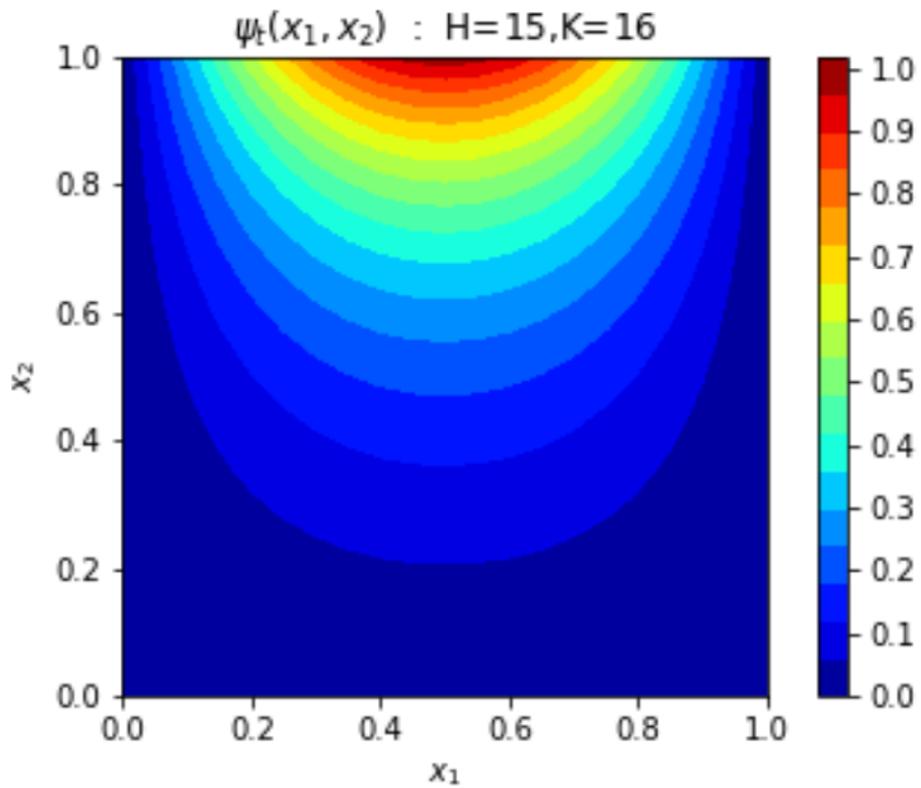


Рисунок 3 — Решение на основе нейронной сети

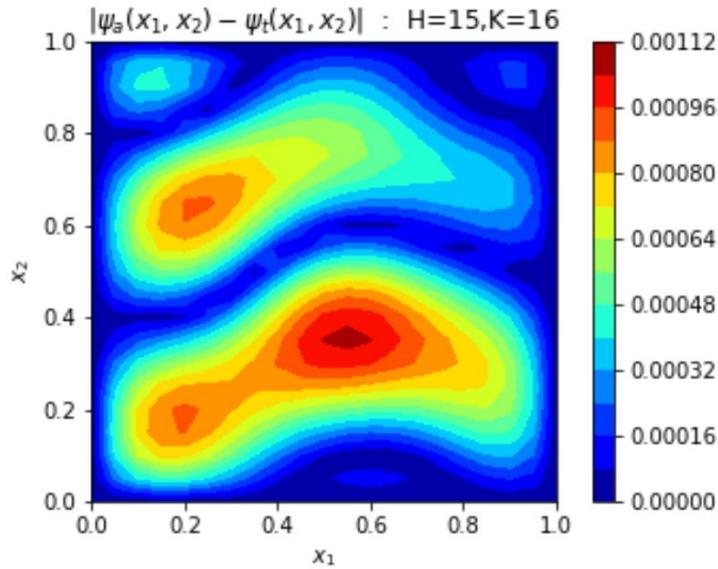


Рисунок 4 — Уравнение Лапласа: E_{abs}

Уравнение Пуассона со смешанным граничным условием

Здесь рассматривается электростатический потенциал при наличии распределения заряда внутри прямоугольной области, где на участке границы задан потенциал, а на остальной части задан градиент потенциала [8]:

$$\nabla^2 \psi(x) = (2 - \pi^2 x_2^2) \sin(\pi x_1), \quad \forall x \in D. \tag{15}$$

Смешанные граничные условия:

$$\psi(x) = 0, \quad \forall x \in (x_1, x_2) \in \begin{cases} \partial D|_{x_1} = 0 \\ \partial D|_{x_1} = 1 \\ \partial D|_{x_2} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{\partial \psi(x)}{\partial x_2} = 2 \sin(\pi x_1), \quad \forall x \in (x_1, x_2) \in \partial D_n|_{x_2} = 1 \tag{16}$$

Аналитическое решение:

$$\psi_a(x) = x_2^2 \sin(\pi x_1) \tag{17}$$

Пробное решение, построенное для метода на основе НС:

$$\psi_t(x) = 2x_2 \sin(\pi x_1) + x_1(1-x_1)x_2 N(x_1, x_2, W, b) - x_1(1-x_1)x_2 \left[N(x_1, 1, W, b) + \frac{\partial N(x_1, 1, W, b)}{\partial x_2} \right] \tag{18}$$

В этом случае функция принадлежности определяется выражением:

$$\begin{aligned}
 & -(2 - \pi^2 x_2) \sin(\pi x_1) - 2\pi^2 x_2 \sin(\pi x_1) + \\
 & x_2 x_1 (1 - x_1) \left[\frac{\partial^2 N(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 N(x_1, 1)}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^3 N(x_1, 1)}{\partial x_1^2 \partial x_2} \right] + \\
 & 2x_2 (1 - 2x_1) \left[\frac{\partial N(x_1, x_2)}{\partial x_1} - \frac{\partial N(x_1, 1)}{\partial x_1} - \frac{\partial^2 N(x_1, 1)}{\partial x_1 \partial x_2} \right] - \\
 & 2x_2 \left[N(x_1, x_2) - N(x_1, 1) - \frac{\partial N(x_1, 1)}{\partial x_2} \right] + \\
 & x_2 x_1 (1 - x_1) \left[\left[\frac{\partial^2 N(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} \right] + 2x_1 (1 - x_1) - \left[\frac{\partial N(x_1, x_2)}{\partial x_1} \right] \right]
 \end{aligned} \tag{19}$$

Аналитическое решение и решение на основе НС, вычисленные путем минимизации функции принадлежности при $K=16$ и $H=15$, показаны ниже. Абсолютное значение разницы между двумя решениями $|\psi_a(x) - \psi_t(x)|$ при максимальном значении равно 0:0056 и представлено на рис. 5, что демонстрирует хорошее соответствие между двумя решениями.

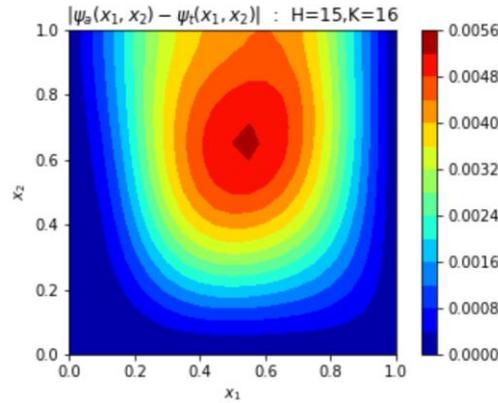


Рисунок 5 — Уравнение Пуассона: E_{abs}

Численное исследование свойств ошибок

Пусть $\hat{D}_{train} = x_{train}^{(i)} \in D; i = 1, \dots, m_{train}$ и $\hat{D}_{test} = x_{test}^{(i)} \in D; i = 1, \dots, m_{test}$ представляют собой набор обучающих и тестовых данных соответственно. Для случая равномерной дискретизации в 2D-области с разрешением обучающей сетки K , $m_{train} = K^2$, а также для неравномерной дискретизации, разрешение обучающей сетки, K , означает, что $m_{train} = K^2$. Разрешение сетки для всех экспериментов остается фиксированным на уровне 21, так как набор тестовых данных имеет размер $m_{test} = 441$, где 2D-область дискретизирована равномерно.

Показатели производительности, которые будут использоваться в этом исследовании, представляют собой абсолютное значение разницы между аналитическим решением и решением на основе НС:

$$E_{abs} = |\psi_a(x) - \psi_t(x)| \tag{20}$$

и норма относительной ошибки, как указано:

$$E_{norm} = \frac{\sqrt{\sum_x (\psi_a(x) - \psi_t(x))^2}}{\sqrt{\sum_x (\psi_a(x))^2}} \tag{21}$$

E_{abs} дает нам информацию о пространственном распределении расхождения между аналитическим и основанным на НС решением, в то время как E_{norm} рисует совокупную картину по всей области.

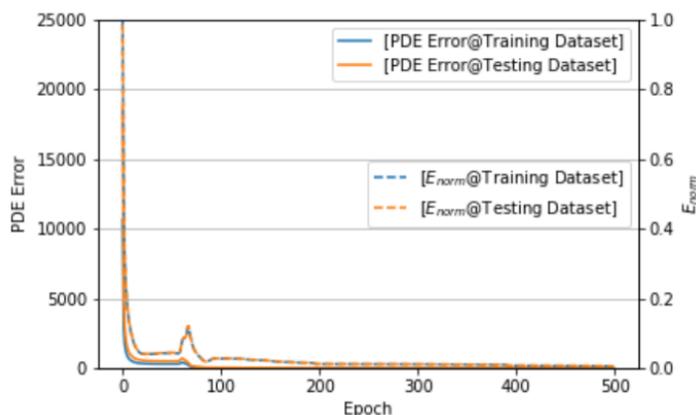


Рисунок 6 — Прогрессирование ошибки УЧП и E_{norm} во время обучения

Существует тонкий, но важный момент, который необходимо понимать при решении краевых задач с использованием НС, т. е. обучение управляется функцией принадлежности (или ошибкой УЧП), а производительность измеряется ошибкой в вычисляемом поле [2].

Во время оптимизации НС УЧП более точно удовлетворяется в точках обучения для каждой успешной эпохи обучения. Но уменьшение ошибки УЧП в обучающих точках не дает очевидной гарантии того, что решение, основанное на НС, сходится к аналитическому решению даже в обучающих точках. Кроме того, НС с плохим обобщением из-за переобучения может не удовлетворять УЧП в областях предметной области, удаленных от точек обучения, и, следовательно, решение на основе НС расходится с аналитическим решением в таких точках. Теорема о сходимости показывает, что разница между аналитическими решениями и решениями, основанными на НС, будет уменьшаться везде в области, когда ошибка УЧП также уменьшается повсюду в области [9]. На практике, однако, нельзя гарантировать, что ошибка УЧП будет уменьшаться во всем домене во время обучения. Однако графики сходимости, такие как показаны на рис. 6 для уравнения Лапласа, когда $H = 15$; $m_{train} = 256$; $m_{test} = 441$, следует использовать для отслеживания развития ошибки УЧП и E_{norm} во время обучения, чтобы убедиться, что ошибка обучения и набора тестов уменьшается вместе с ошибкой УЧП во время обучения. Разрешение обучающей сетки, количество скрытых узлов, распределение и размер набора обучающих данных могут быть изменены соответствующим образом, если это необходимо, чтобы обеспечить снижение E_{norm} , а также ошибки УЧП во время обучения [10].

Зависимость ошибки от разрешения обучающей сетки, K . Нейронная сеть обучалась для различных комбинаций числа скрытых узлов, H и разрешения обучающей сетки, K для краевых задач с уравнением Лапласа с граничным условием Дирихле. Для фиксированного $H = 15$ изменение ошибки тестовой выборки при разрешении обучающей сетки $K = 8; 16; 24; 30$ и 40 показано на рис.7. При увеличении K с 8 до 16 E_{abs} становится относительно уже, а E_{norm} уменьшается с 0,015 до 0,002, но уровень за пределами этого разрешения. Хотя интуитивно ожидается, что ошибка тестового набора улучшается с увеличением размера обучающего набора, поскольку модель обучения лучше обобщается, в этом конкретном случае это также можно вывести в контексте теоремы о сходимости. Поскольку ошибка УЧП сводится к минимуму в большем количестве обучающих точек, сходимость между аналитическим решением и решением на основе НС становится лучше.

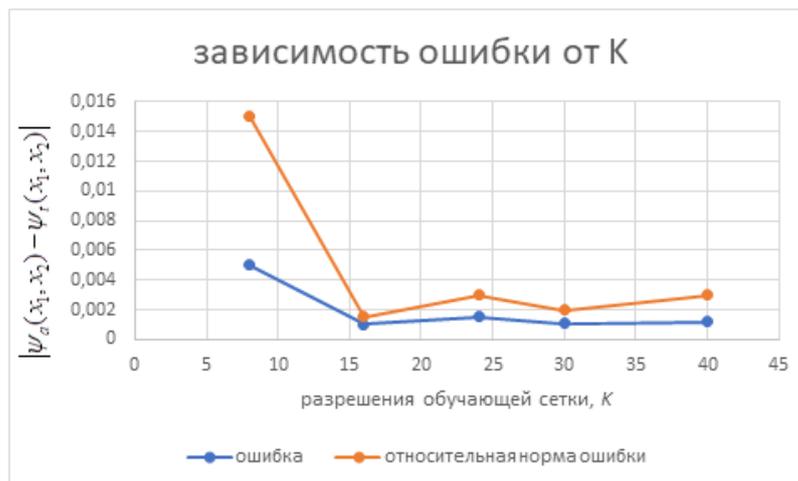


Рисунок 7 — Зависимость ошибки от разрешения обучающей сетки, K

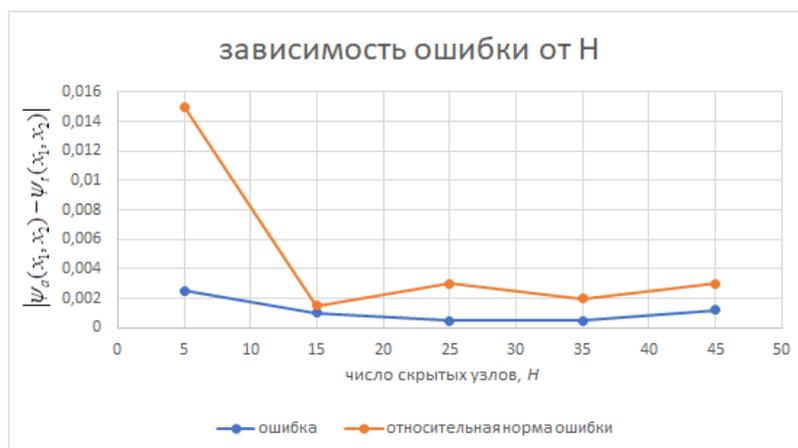


Рисунок 8 — Зависимость ошибки от числа скрытых узлов, H

Зависимость ошибки от количества скрытых узлов, H. Чтобы понять зависимость ошибки тестового набора от количества скрытых узлов, H, решение на основе НС вычисляется для H = 5; 10; 15; 25; 35 и 45, для фиксированного K = 16. На рис. 8 показано, как ошибка значительно улучшается при увеличении H с 5 до 15, но после этого остается примерно такой же. Поскольку вычислительные требования растут с увеличением количества скрытых узлов и / или разрешения обучающей сетки, и только предельный выигрыш за пределами H = 15; K = 16; следовательно, этот выбор количества скрытых узлов и разрешения обучающей сетки считается подходящим для рассматриваемой проблемы.

Зависимость ошибок от неоднородной обучающей сетки

Как упоминалось ранее, одним из основных преимуществ метода на основе НС является то, что набор данных для обучения и тестирования может быть полностью неструктурированным, и, следовательно, они не страдают от проблемы создания сетки, как другие численные методы. Чтобы продемонстрировать это, исследуются четыре различные структуры сетки, показанные на рис. 9, где указана каждая точка обучения в наборе обучающих данных, m_{train} = 256. На рис. 9а показана «Сетка-1», равномерная дискретизация, которая будет использоваться в качестве основы в этом эксперименте. Два структурированных, но разных пространственных распределения рассматриваются в «Сетке-2», показанной на рис. 9б, в которой точки обучения плотно распределены ближе к границе и грубо удалены от нее, а пространственное распределение показывает противоположную тенденцию в «Сетке-3», показанной на рис. 9в. На рис. 9г показана «Сетка-4», обучающий набор данных, сгенерированный равномерным случайным распределением в [0; 1] [0; 1].

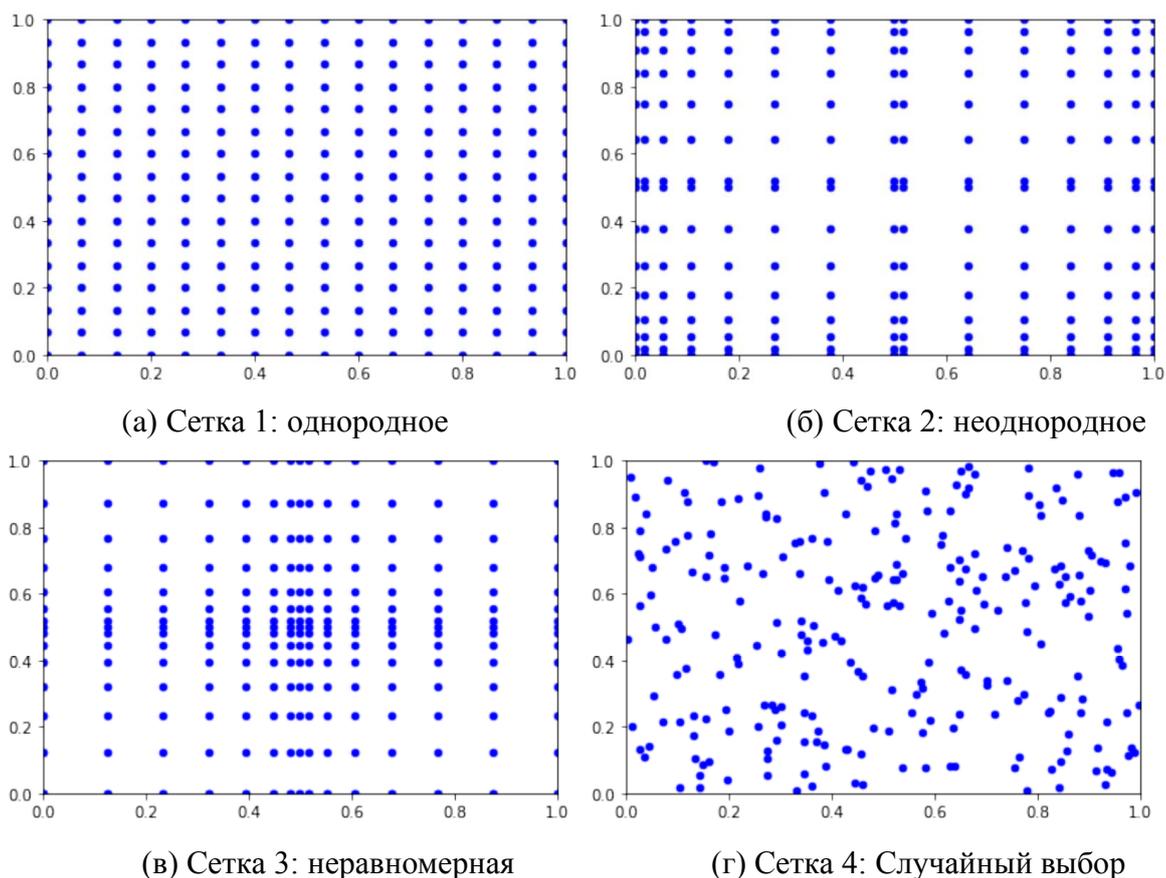


Рисунок 9 — Четыре различных пространственных распределения исследованных точек обучающих данных

На рис. 10 показана вычисленная ошибка набора тестов для четырех сеточных структур. «Сетка-4» имеет наилучшие показатели по ошибкам, за ней следует «Сетка-1», а «Сетка-2» и «Сетка-3» демонстрируют аналогичные показатели. Это может быть связано с тем, что распределение обучающего набора данных «Сетка-4» очень похоже на распределение тестового набора данных по сравнению с другими распределениями, поскольку тестовая сетка представляет собой равномерную дискретизацию с разрешением сетки 21. Это демонстрирует эффективность метода на основе НС преимущества при работе с неструктурированными данными и его потенциал для применения к краевым задачам с изогнутыми или неправильными границами [11].

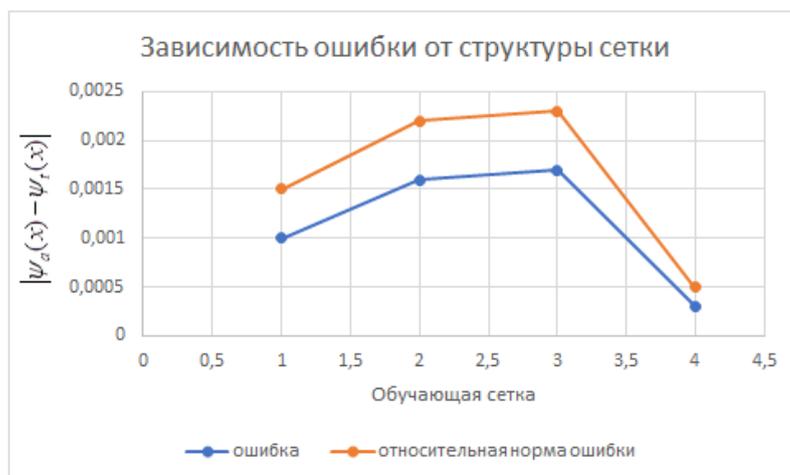


Рисунок 10 — Зависимость ошибки от распределения обучающего набора данных

Заключение

В этом исследовании был сформулирован, реализован и проверен численный метод на основе НС для двух примеров с граничными условиями Дирихле и смешанными граничными условиями. Были проведены численные эксперименты для оценки зависимости показателя ошибки от разрешения обучающей сетки и количества скрытых узлов. Чтобы продемонстрировать достоинства этого метода, также представлены численные результаты для структурированного и неструктурированного обучающего набора данных.

Литература

1. I. E. Lagaris, A. Likas and D. I. Fotiadis, "Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations," in IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 9, no. 5, pp. 987-1000, Sep 1998. doi: 10.1109/72.712178
2. К. С. Макфолл и Дж. Р. Махан, «Метод искусственной нейронной сети для решения краевых задач с точным удовлетворением произвольных граничных условий», в IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 20, нет. 8, стр. 1221-1233, август 2009 г. doi: 10.1109/TNN.2009.2020735
3. M. M. Chiaramonte, M. Kiener. Solving differential equations using neural networks. <http://cs229.stanford.edu/proj2013/ChiaramonteKiener-SolvingDifferentialEquationsUsingNeuralNetworks.pdf>.
4. СР. Харрингтон, Роджер. (1961). Гармоническое электромагнитное поле во времени. 10.1109/9780470546710.
5. Бакасова, А. Б. Применение нейронных сетей в задачах электромагнитных помех / А. Б. Бакасова, А. Асан Уулу // Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 95-103. – EDN DJPYDH.
6. Верзунов, С. Н. Система искусственного интеллекта для онлайн мониторинга подземных силовых кабельных линий на основе технологий глубокого обучения / С. Н. Верзунов // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 3(42). – С. 83-94. – EDN DVCIKE.
7. Р. Йентис и М. Э. Заглул, «Реализация СБИС локально связанной нейронной сети для решения уравнений в частных производных», в IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 43, нет. 8, стр. 687-690, август 1996 г. doi: 10.1109/81.526685
8. J. Han. Deep learning-based numerical methods for high-dimensional parabolic partial differential equations and backward stochastic differential equations <ftp://ftp.math.ucla.edu/pub/camreport/cam17-41.pdf>
9. К. Макфолл, Метод искусственной нейронной сети для решения краевых задач, Германия, Saarbrcken: VDM Verlag, 2006. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/10506/mcfalLKevin_C200605_phd.pdf (Дата обращения 25.04.2022)
10. Библиотеки, используемые в этом проекте: Tensor Flow: <https://www.tensorflow.org/>; NumPy: <http://www.numpy.org/>; Matplotlib: <https://matplotlib.org/>; (Дата обращения 01.04.2022)
11. SH Kolluru, Preliminary Investigations of a Stochastic Method to solve Electrostatic and Electrodynamical Problems. Masters Thesis, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST, August 2008, <http://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1261&context=theses>

УДК.:004.71:519.254:621.31

С.М. Асанова, a_sm07@kstu.kg

*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,
720044, Кыргызстан, г. Бишкек, пр. Мира, 66.*

РАЗВИТИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В работе дается определение самоорганизующемуся алгоритму, а также краткое описание расширения сетей Петри – вычислительных сетей Петри, которые являются средством построения таких алгоритмов. Приводится графическое представление и описываются вычислительные возможности сетей Петри. Также дано обоснование необходимости разработки эффективного инструмента для построения самоорганизующихся многокомпонентных (структурно-подобных) вычислительных алгоритмов для решения задач электроэнергетики. Разработка эффективного инструмента, т.е. вычислительных сетей Петри, позволяющих строить такие алгоритмы для анализа топологии, оптимизации структуры, расчета и моделирования динамики в сложных электроэнергетических системах, является весьма актуальной. Эффективность его использования объясняется прежде всего тем, что он позволяет достаточно простыми средствами строить структурно-подобные исследуемым объектам и удобные с позиции реализации на ЭВМ модели динамических систем с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами.

Ключевые слова: сети Петри, самоорганизующийся многокомпонентный вычислительный алгоритм, математическая модель, дискретные и непрерывные системы, электроэнергетические системы.

Введение

Современные технические системы, в частности системы электроэнергетики, относятся к классу сложных систем, которые обладают следующими свойствами: большое количество компонентов и сложные связи между ними; переменная структура системы, т.е. количество компонентов и связи между ними могут меняться во время ее функционирования; компоненты могут быть непрерывными, дискретными или непрерывно-дискретными (гибридными) и могут иметь различную физическую природу; между компонентами могут быть как физические, так и информационные связи, и т.д.

Получить единую математическую модель сложных систем и процессов, учитывающую вышеперечисленные свойства, часто не удается. Если даже удастся ее как-то получить, то она, как правило, обладает большой размерностью (вычислительной трудоемкостью), и в ней с трудом угадывается структура исследуемых объектов, что приводит к значительным трудностям при получении правильной интерпретации результатов вычислений.

Одним из мощных средств, применяемых для построения структурно-подобных и удобных с позиций интерпретации и реализации на ЭВМ моделей сложных систем и процессов, является аппарат сетей Петри (СП) [1,2]. Моделирующие возможности СП и эффективность их применения в приложениях объясняется прежде всего тем, что СП – это интеграция графа и дискретной динамической системы, она может служить одновременно и статической, и динамической моделью описываемого ею объекта и является едва ли не самым удобным и многообещающим инструментом, позволяющим достаточно простыми средствами строить структурно-подобные и удобные с позиции программирования модели дискретных объектов с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами.

Однако моделирующие возможности этих расширений СП [1,2] все же не позволяют получить эффективные сети Петри, реализующие сложные дискретные и дискретно-непрерывные вычислительные алгоритмы и алгоритмы обработки символьно-цифровой информации, возникающие при решении задач анализа статической топологической структуры, построения математической модели, моделирования и управления сложными

распределенными системами, какими являются, например, крупные электроэнергетические системы, системы электроснабжения технологических установок сложных дискретных и дискретно-непрерывных производств, ирригационные и гидроэнергетические системы и т.д.

В связи с вышеуказанным, в работах[3] предложена расширенная сетевая модель – модель вычислительной сети Петри (ВСП), являющаяся дальнейшим развитием и обобщением вышеперечисленных расширений аппарата сетей Петри.

Ниже приводятся некоторые дополнения к ВСП и дается определение самоорганизующимся алгоритму, т.е. приводится графическое представление и описываются вычислительные возможности ВСП, а также обсуждаются вопросы, связанные с применением ВСП для решения задач электроэнергетики. Отметим, что применение ВСП в приложениях, как станет ясно ниже при ее изложении, существенно расширяет круг решаемых задач моделирования в сравнении с существующими расширениями [1,2].

Также дается определение самоорганизующемуся алгоритму и краткое описание расширения сетей Петри – вычислительных сетей Петри, которые являются средством построения таких алгоритмов.

О п р е д е л е н и е. Алгоритм A , решающий некоторую задачу Z , называется самоорганизующимся, если он обладает следующими свойствами:

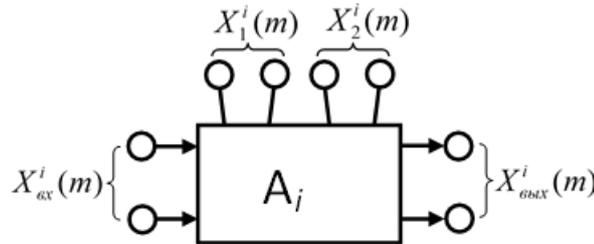


Рисунок 1 – Структура i -й компоненты A_i алгоритма A

1) Алгоритм A состоит из n -компонент $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, информационные выводы которых взаимосвязаны друг с другом через множество позиций X , при этом в тексте алгоритма A его компоненты расположены в произвольном порядке. Множество компонент алгоритма A , взаимосвязанные через множество позиций X , образуют начальную статическую структуру данного алгоритма A . Структура i -й компоненты A_i показана на рис. 1, где прямоугольником обозначен вычислительный модуль алгоритма A_i ; $X_{ex}^i \subseteq X$ – множество входных позиций; $X_{вых}^i \subseteq X$ – множество выходных позиций; $X_1^i \subseteq X$ – множество управляющих позиций, и $X_2^i \subseteq X$ – множество информационных позиций.

2) На каждом m -м такте функционирования алгоритма A срабатывают только активные компоненты из множества компонент $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, образуя, таким образом, параллельно-последовательную вычислительную структуру. Активность или пассивность каждого i -го компонента A_i определяется на основе информации о состоянии множества управляющих позиций X_1^i . При срабатывании активного компонента A_i , на основе информации о состоянии множества информационных позиций X_2^i модифицируется состояние множества входных X_{ex}^i и выходных $X_{вых}^i$ позиций.

3) В процессе функционирования многокомпонентного алгоритма A , в зависимости от состояния определенных позиций из множества X , может меняться структура определенных компонент A_i за счет изменения множеств и(или) входных $X_{ex}^i(m) \subseteq X$,

и(или) выходных $X_{вых}^i(m) \subseteq X$, и(или) информационных $X_2^i(m) \subseteq X$ позиций на каждом m -м такте его функционирования (рис.1).

Из-за ограниченности вычислительных возможностей существующего аппарата сетей Петри (СП) и их расширений для решения задач вышеуказанного характера в работах [3] предложено новое расширение СП – вычислительная сеть Петри (ВСП), являющаяся обобщением и дальнейшим развитием существующих СП (алгебраических и самомодифицируемых) и обладающая универсальной вычислительной возможностью для обработки символично-числовой информации. Определены вычислительные компоненты, язык (коды) их описания и правило их функционирования, позволяющие набору вычислительных компонент, построенных для решения той или иной задачи, структурно и логически самоорганизовываться в процессе их функционирования для получения решения поставленных задач.

Сетевая структура ВСП, отражающая как статическую, так и динамическую структуру исследуемого процесса или системы, формально определяется как набор: $C = ((P, \Lambda, \Psi, T, E), D, \Omega, \Phi, W, \mu, \gamma)$.

В этом наборе (условно-графическое обозначение компонентов ВСП, их теоретико-множественное описание и наименование приведены в таблице 1, а векторная функциональная схема сетевой структуры ВСП показана на рис. 2:

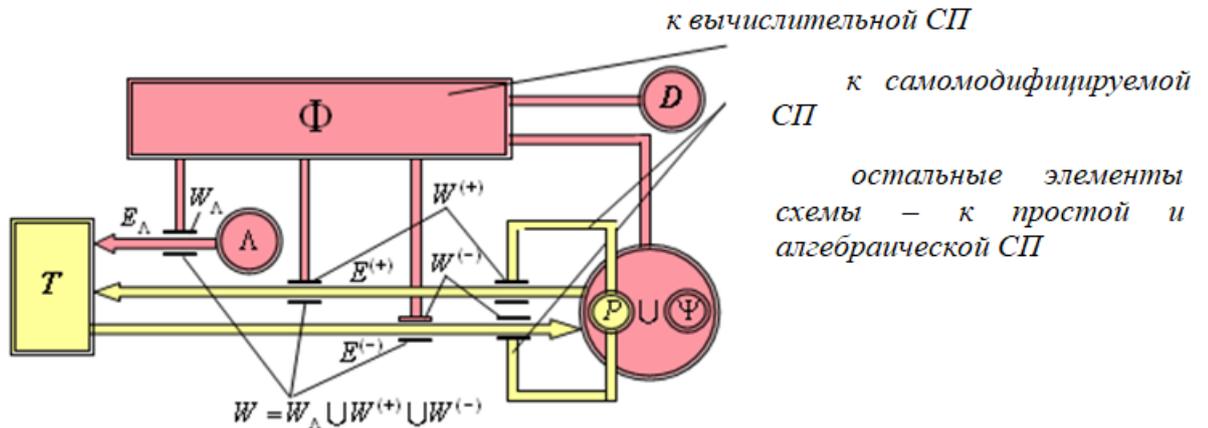


Рисунок 2 – Векторная функциональная схема сетевой структуры ВСП

1) P – множество позиций, предназначенных для моделирования состояния сети (табл. 1, п.1): $P = P_p \cup P_q \cup P_s$, где $P_p = \{p_i | i \in I_p\}$ – множество дискретных (целочисленных) позиций p_i ; $P_q = \{q_i | i \in I_q\}$ – множество непрерывных (вещественных) позиций q_i ; $P_s = \{s_i | i \in I_s\}$ – множество символических позиций s_i .

2) Λ – двухэлементное множество позиций логических констант (табл. 1, п.2): $\Lambda = \{\lambda_0, \lambda_1\}$, где $\lambda_0 = 0$ – «ложь»; $\lambda_1 = 1$ – «истина».

3) Ψ – множество позиций-указателей (табл. 1, п.3): $\Psi = \Psi_p \cup \Psi_q \cup \Psi_s$, где $\Psi_p = \{\& s_i | s_i \in S_p \subset P_s\}$, $\Psi_q = \{\& s_i | s_i \in S_q \subset P_s\}$, $\Psi_s = \{\& s_i | s_i \in S_s \subset P_s\}$ – множества указателей, соответственно, на дискретные $p_i \in P_p$, непрерывные $q_i \in P_q$ и символические $s_i \in P_s$ позиции; $\& s_i$ – формула указателя, s_i – символическая позиция, моделирующая память указателя, а $\&$ – операция макроподстановки, осуществляющая подстановку содержимого x памяти s_i в качестве позиции x вместо самого указателя $\& s_i$, иначе говоря, указатель $\& s_i$ превращается в позицию с именем x .

4) T – множество переходов, предназначенных для моделирования событий в сети (табл. 1, п. 4): $T = \{t_j | j \in I_T\}$, $I_T = \{1, 2, \dots, n_T\}$.

5) E – отношение инцидентности позиций, указателей и переходов, т.е. множество дуг сети (табл. 1, п. 5-9): $E = E_{\Lambda} \cup E^{(+)} \cup E^{(-)}$, $E_{\Lambda} \subseteq \Lambda \times T$, $E^{(+)} \subseteq (P \cup \Psi) \times T$, $E^{(-)} \subseteq T \times (P \cup \Psi)$.

6) D – множество позиций, предназначенных для хранения предметных констант (табл. 1, п.10): $D = D_p \cup D_q \cup D_s$.

Таблица 1 – Условно-графические обозначения компонентов сетевой структуры ВСП

	Условно-графическое обозначение	Теоретико-множественное описание	Наименование
1	$x \bigcirc$	$x \in P = P_p \cup P_q \cup P_s$	Позиция x
2	$x \bullet$	$x \in \Lambda$	Позиция x -логических констант
3		$\& s_i \in \Psi, s_i \in S \subset P_s, x \in P$	Указатель $\& s_i$ на позиции $x \in P$
4	$t_j \text{ }$	$t_j \in T$	Переход (событие)
5		$(x, t_j) \in E_{\Lambda} \subset E^{(+)}$, где $x \in \Lambda, t_j \in T$	Логическая дуга (x, t_j) –входная
6		$(x, t_j) \in E^{(+)}$, где $x \in P, t_j \in T$	Входная дуга (x, t_j)
7		$(t_j, x) \in E^{(-)}$, где $x \in P, t_j \in T$	Выходная дуга (t_j, x)
8		$(\& s_i, t_j) \in E^{(+)}$, где $\& s_i \in \Psi, t_j \in T$	Входная дуга – указатель $(\& s_i, t_j)$
9		$(t_j, \& s_i) \in E^{(-)}$, где $t_j \in T, \& s_i \in \Psi$	Выходная дуга – указатель $(t_j, \& s_i)$
10	$d \bullet$	$d \in D = D_p \cup D_q \cup D_s$	Позиция для хранения констант
11	ω	$\omega \in \Omega$	Знак функции
12		$(\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k) \in \Phi$	Структура интерпретируемых формул (функция разметки дуги)
13		$((x, y), (\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k)) \in W$ $(x, y) \in E, (\omega, x_1, \dots, x_i, \dots, x_k) \in \Phi$ $\omega \in \Omega, x_i \in (P \cup \Psi \cup D), \forall i$	Структура вычислительного элемента $V(x, y)$ дуги (x, y)

7) Ω – множество знаков стандартных и собственных функций (арифметических, логических, предикатных и т.д., табл.1, п.11):

$$\Omega = \Omega_{\Lambda} \cup \Omega_p \cup \Omega_q \cup \Omega_s.$$

8) Φ – множество структур интерпретируемых формул (табл.1, п.12):

$$\Phi \subseteq \Omega \times \left[\bigcup_{k=1}^a (P \cup \Psi \cup D)^k \right].$$

9) $W = W_{\Lambda} \cup W^{(+)} \cup W^{(-)}$ – однозначное отображение, сопоставляющее каждой дуге $(x, y) \in E$ вполне определенную (единственную) структуру из множества структур интерпретируемых формул Φ для установки зависимости разметки данной дуги от состояния сети: $W: E \rightarrow \Phi$, здесь элементы множества W представляют собой код (кортеж), описывающий структуру вычислительного элемента (ВЭ) $V(x, y)$ дуги (x, y) : $((x, y), (\omega, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})) \in W$, $(x, y) \in E$, $(\omega, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k}) \in \Phi$ (табл.1, п. 13).

При этом $((x, t), (\omega, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})) \in W^{(+)}$, $((t, y), (\omega, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})) \in W^{(-)}$ и $((\lambda, t), (\omega_{\Lambda}, x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})) \in W_{\Lambda}$ – структуры, соответственно, входных, выходных ВЭ и ВЭ для проверки активности перехода t . Набор ВЭ $V(x, y)$ дуг (x, y) , у которых или $x = t$, или $y = t$, а противоположными их концами являются соответствующие им позиции из множества $P \cup \Psi$, образуют вычислительный модуль (ВМ) $V(t)$ перехода t . ВСП состоит из определенного набора вычислительных модулей $V(t)$, $\forall t \in T$, взаимосвязанных через соответствующие позиции из $P \cup \Psi$.

10) μ – маркировка позиций P (моделирование состояния позиций сети):

$\mu = \mu_p \cup \mu_q \cup \mu_s$, $\mu_p: P_p \rightarrow N$, $N = \{0, 1, 2, \dots\}$, $\mu_q: P_q \rightarrow R$, $R = (-\infty, +\infty)$, $\mu_s: P_s \rightarrow A^*$, где A^* – множество всех цепочек (слов) над алфавитом $A = \{A, B, C, \dots, a, b, c, \dots, 0, 1, 2, \dots, 9, \dots\}$, включая пустую цепочку ε . Модификацию состояния $\mu(x)$ позиций $x \in P$ производят соответствующие им ВЭ $V(t, x)$, $V(x, t)$ переходов $t \in T$ в результате их срабатывания.

11) γ – маркировка переходов T (моделирование состояния переходов сети):

$\gamma: T \rightarrow \{0, 1\}$. Здесь γ является функциональным отображением, сопоставляющим каждому переходу $t_j \in T$ однозначно определенный элемент из двухэлементного множества $\{0, 1\}$. При $\gamma(t) = 1$ переход t – активный, в результате чего срабатывает ВМ $V(t)$. Иначе, т.е. при $\gamma(t) = 0$, переход t – пассивный, и ВМ $V(t)$ не срабатывает. Модификацию состояния $\gamma(t)$ перехода t производит ВЭ $V(\lambda, t)$ следующим образом: если $\lambda = \omega_{\Lambda}(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})$, то $\gamma(t) = 1$, иначе $\gamma(t) = 0$. При срабатывании ВМ $V(t)$ активного перехода t срабатывают все ее ВЭ, в результате чего модифицируется состояние $\mu(x)$ всех позиций $x \in P$, соответствующих срабатываемым ВЭ по определенным правилам, в зависимости от типов функций $\omega(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_k})$ разметок дуг этих ВЭ.

12) Указатель $\&s_i \in \Psi$ называется указателем на позицию $x \in P$, т.е. $\&s_i = x$, если состояние $\mu_s(s_i)$ памяти $s_i \in S$ данного указателя $\&s_i$ равно имени x указываемой позиции, т.е. $\mu_s(s_i) = x$, $x \in P \subset A^*$, $P = P_p \cup P_q \cup P_s$, $s_i \in S \subset P_s$.

Таким образом, как сказано в [3] ВСП имеет, в сравнении с существующими СП, следующие дополнительные вычислительные возможности:

- наличие позиций различных типов, т.е. числовых (дискретных P_p , непрерывных P_q) $P_p \cup P_q$ и символьных P_s , а также наличие среди набора функций разметки дуг функции возврата имени позиции и функций символьных обработок, позволяет осуществлять обработку символьно-числовой информации и эффективно решать задачи анализа топологии сложных систем;

- наличие указателей на различные типы позиций позволяет реализовать задачи, связанные с произвольной выборкой позиций из заданного множества, и за счет этого моделировать системы с перестраиваемой структурой;
- наличие позиций логических констант, дуг логического типа и предикатных функций разметки дуг логического типа, введенных для проверки активности переходов, позволяет достаточно легко разрешать проблемы конфликтов между ВМ ВСП и организовывать ситуационно управляемые параллельно-последовательные вычислительные процессы в зависимости от состояния их позиций.

Применение ВСП для решения задач электроэнергетики

Вышеперечисленный набор возможностей ВСП позволяет решать, например, следующие сложные актуальные задачи электроэнергетики:

- машинный анализ топологической структуры графа сложноразветвленной электрической сети и построение ее математической модели (постановка задачи в [4]);
- решение задач на графах электрической сети;
- определение оптимальных мест размыкания сети (т.е. выбор оптимальной конфигурации сети), обеспечивающих минимум сезонных потерь электрической энергии [5];
- расчет надежности электрических сетей;
- управление технологией дискретного производства с целью равномерного потребления электрической энергии и обеспечения спроса рынка сбыта (постановка задачи в [6]);
- проектирование интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии (методика проектирования в работе [7]) и т.д.

Заключение

Таким образом, в данной работе внесено дополнение к расширению сетей Петри со значительно усиленной моделирующей возможностью, получившее название вычислительная сеть Петри, являющаяся обобщением и дальнейшим развитием самомодифицируемых, алгебраических сетей, обладающая универсальной вычислительной возможностью для обработки символично-числовой информации и позволяющая строить самоорганизующиеся, многокомпонентные, структурно-подобные и удобные с позиций реализации на ЭВМ и интерпретации результатов вычислений модели сложных дискретных, непрерывных и дискретно-непрерывных систем, какими являются системы электроэнергетики, а также преодолевать проблемы, связанные с размерностью исследуемых систем, за счет возможности распараллеливания вычислительных процессов.

При этом ВСП, как было сказано ранее в работе [3], обладает следующими достоинствами: возможностью автоматизации формирования структурированных, легко интерпретируемых вычислительных алгоритмов; возможностью организации последовательно-параллельных вычислений, что существенно повышает быстродействие вычислительных процессов; коды ВСП являются одновременно и моделью, и алгоритмом, и программой реализации на ЭВМ; располагать вычислительные модули в текстах вычислительных алгоритмов в произвольном порядке, поскольку эти модули структурно и логически самоорганизуются соответствующим образом, взаимодействуя через состояние позиций в процессе функционирования ВСП.

Литература:

1. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука. 1989 г.

3. М.С. Асанов. Структурная модель вычислительных сетей Петри / М.С. Асанов, С.М. Асанова, К.А. Сатаркулов. // Известия КГТУ. – 2008. – №13. – С. 78 – 85.
4. Асанова С.М. Моделирующий комплекс для оценки оптимального количества информации о текущем состоянии электроэнергетических систем. – Известия КГТУ им. И.Раззакова. Материалы МНТК «Инновации в образовании, науке и технике». – Т. I, №9. – Бишкек. – 2006. – С. 440 – 447.
5. Asanov M., Kokin S., Satarkulov K., Asanova S.M., Dmitriev S., Safaraliev M. The use of Petri computing networks for optimization of the structure of distribution networks to minimize power losses. [Energy Reports](#), [Vol. 6, Supplement 9](#), December 2020, 1337–1343.
6. Арфан аль Хакам, Асанов М.С., Бримкулов У.Н. Организация технологии дискретного производства с целью равномерного потребления электрической энергии. Наука и новые технологии – №1. – Бишкек. – 2002. – С. 56 – 62.
7. Методика проектирования интеллектуальных автономных распределенных гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии / С. М. Асанова, С. М. Суеркулов, А. Б. Бакасова [и др.] // Проблемы автоматки и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 21-32. – EDN VBMNSS.

УДК.:303.447.3:528.8.04-022.322:528.931.3

Г.Т. Каримова, k.gulpeace@kstu.kg

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
г. Бишкек, Кыргызская Республика*

АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ГОРОДА БИШКЕКА ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Большое разнообразие, сложность и качество данных дистанционного зондирования Земли продолжает расти. Потребитель готовых обработанных данных выдвигает большие требования к их качеству, тем самым усложняя работу разработчиков удерживать сервис на том уровне, на котором эта информация представляется пользователю. Это дает почву на поиски лучших методов обработки данных дистанционного зондирования Земли.

Целью данной статьи является разработка системы визуализации данных дистанционного зондирования Земли методом слияния спутниковых данных с высоким разрешением с данными среднего разрешения для анализа и принятия решения по выявлению изменений в почвенно-растительном покрове в г. Бишкеке.

Основной задачей данной работы является исследование и применение методов обработки и подготовки снимков LandsatTM 7 к последующему использованию. Процесс предварительной обработки заключался в фильтрации данных дистанционного зондирования Земли с помощью специальных программ.

Для увеличения разрешительной способности мультиспектрального канала методом слияния и успешного наложения использован панхроматический канал с разрешением 15 м. Это было сделано для того, чтобы увеличить информативность и возможность интерпретации космических снимков со средним разрешением, доступных по исследуемой территории и находящихся в свободном доступе. Затем с применением статистических методов произведена классификация с последующим выделением в буферные зоны интересующие объекты снимка.

В результате работы по подготовке и обработке данных дистанционного зондирования Земли стало возможным с получением карты визуализации зеленых зон г. Бишкека. Полученные данные можно применить для решения задач озеленения городов и увеличения парковых зон.

Ключевые слова: спутниковые снимки, дистанционное зондирование Земли, почвенно-растительный покров, геопространственные данные.

Введение

В настоящее время возросла большая потребность в максимально точной информации в реальном режиме времени относительно природы изменения почвенно-растительного покрова Земли. Одним из источников данных для такой информации прежде всего являются спутниковые снимки, а также аэрофотоснимки, которые в большинстве случаев требуют затраты времени на компьютерный процесс их интерпретации, достичь высокую степень автоматизации, которой добиться порой очень трудно, но, несмотря на сложности, возможно. Большое разнообразие, сложность и качество данных ДЗЗ продолжает расти и находить свое применение в пределах той или иной задачи, но каждый новый потребитель этой информации, а не «сырых» данных, предъявляет все больше требований к качеству ее представления, и появляются трудности для разработчиков удерживать сервис на том уровне, на котором эта информация представляется пользователю.

Материалы и методы исследования

На рис.1. изображен процесс подготовки и анализа геопространственных данных.

Ввиду того, что данные, полученные с сенсоров, установленных на спутниках, имеют различные пространственное, спектральное, временное и другие разрешения [1], актуальным становится вопрос слияния продуктов дистанционного зондирования с целью интеграции характеристик и последующего их анализа в геоинформационных системах.

Для усиления информативности и облегчения задачи интерпретации информации,



Рисунок 1 – Процесс подготовки и анализа данных ДЗЗ

содержащейся в изображении, полученном в результате слияния, ведет к более ясному пониманию свойств обозреваемого объекта [1] (рис.2).

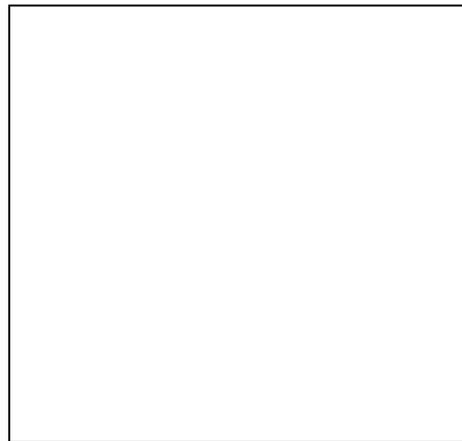


Рисунок 2 – Процесс анализа данных

Панхроматическое слияние использует панхроматическое изображение (или канал растра) высокого разрешения с многоканальным набором растровых данных низкого разрешения. В результате получается многоканальный набор растровых данных с разрешением панхроматического растра в областях их наложения [2].

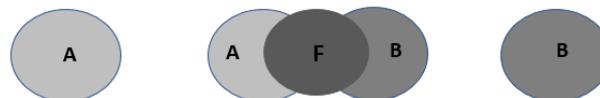


Рисунок 3 – Схема слияния данных

Панхроматическое слияние является радиометрической трансформацией, доступной через растровую функцию или из инструмента геообработки. Ряд компаний-поставщиков предоставляет многоканальные растры с низким разрешением вместе с панхроматическими изображениями с высоким разрешением на те же участки. Этот процесс используется для увеличения пространственного разрешения и улучшения визуализации и интерпретации многоканального изображения с помощью одноканального изображения высокого разрешения [1].

Возникнув на рассвете развития дистанционного зондирования, проблема слияния изображений остается актуальной и ныне ввиду сохраняющихся тенденций к повышению требований к объемам и качеству материала. В свою очередь данные требования порождают новые, состоящие в необходимости обеспечения повышения производительности реализаций методов слияния изображений (рис.3).

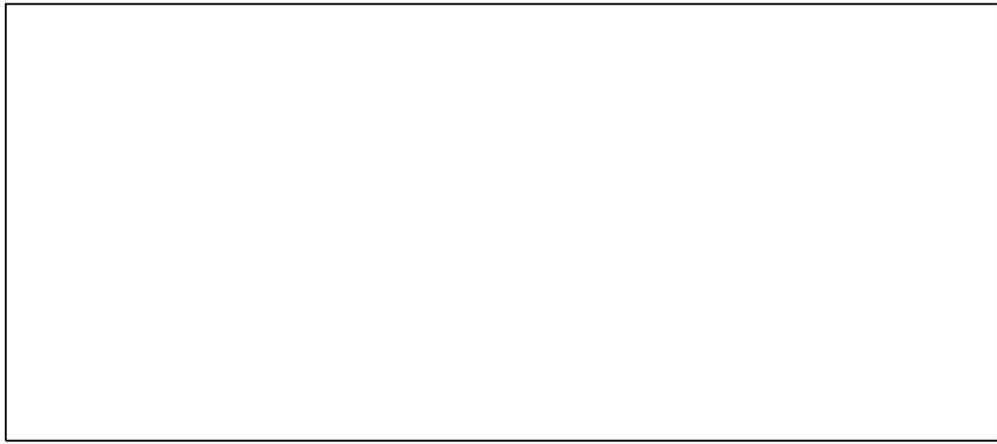


Рисунок 4 – Методы анализа данных

Также следует отметить, что в открытом доступе находится очень мало работ, посвященных эффективной реализации методов слияния изображений для графических адаптеров. Более того – весьма интересен вопрос получения прироста производительности с применением кластера, каждый узел которого оборудован вышеупомянутыми устройствами. Поэтому современное состояние развития технологий дистанционного зондирования, выдвигая повышенные требования к качеству и производительности слияния изображений, обуславливает актуальность исследований на вышеизложенную тему [5].

В задаче слияния изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования, существуют различные приложения, среди которых:

- слияние продуктов с разным спектральным разрешением;
- слияние продуктов с разным временным разрешением;
- слияние продуктов, полученных с разных сенсоров.

Под мультиспектральным слиянием изображений (multispectral image fusion, pan sharpening) подразумевается процесс, позволяющий получить из панхроматического (panchromatic, Pan) и мультиспектрального (multispectral, MS) каналов двух продуктов одно изображение. Панхроматический канал, как правило, имеет высокое пространственное разрешение, мультиспектральный же — низкое (например, для спутника QuickBird: Pan 0,61-0,72 метра, MS 2,44-2,88 метра [3]). В то же время, например, для геоинформационных систем необходимо получить изображение как с высоким спектральным, так и с пространственным разрешением. Иллюстрацией данного процесса может служить рис. 4.



Рисунок 5 – Мультиспектральное слияние изображений, полученных со спутника IKONOS. Левое (Pan) и центральное (MS) – исходные изображения, правое – результат слияния [4]

На рис.5 изображена схема обработки данных Landsat 8 и получение данных для карты со слоями, содержащими следующую информацию: карта, где исчезли и появились деревья, температурная карта города, карта расстояний до объектов инфраструктуры города.

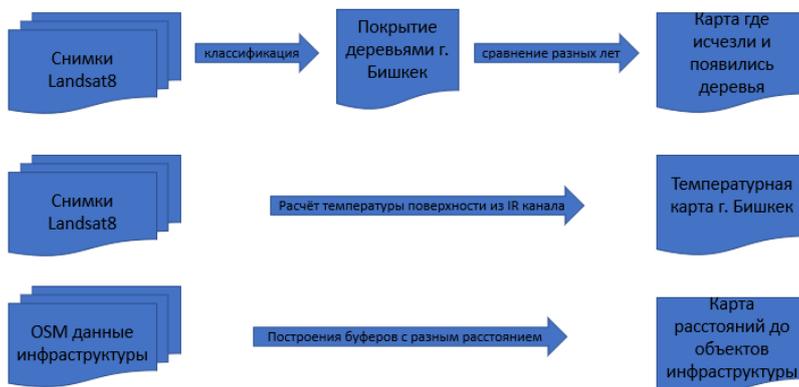


Рисунок 6 – Схема обработки данных

Для реализации и получения карты были использованы следующие технологии и среда разработки, показанные на рис.6.

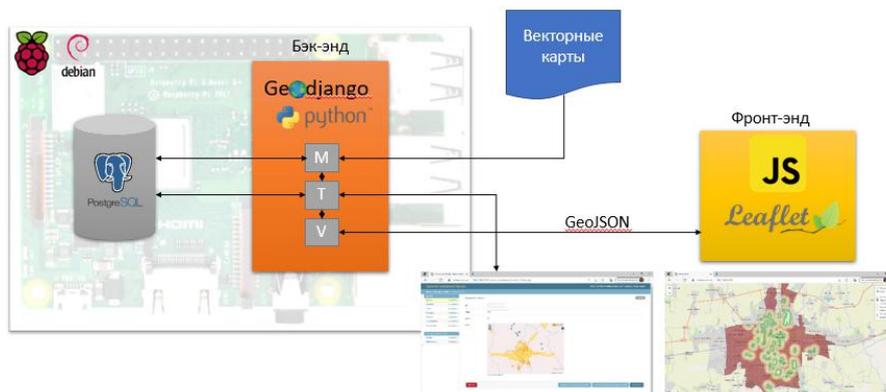


Рисунок 7 – Инструментальная среда разработки

Результаты и обсуждение

В результате интеграции (слияния) данных с целью улучшения информативности и получения векторных данных была получена карта города Бишкека для практического анализа и применения (рис.8). С применением математической статистики территории была разбита на гексагоны, то есть разбиение территории на полигоны для более точного вычисления нормализованного вегетационного индекса, показанного на рис.2.8.

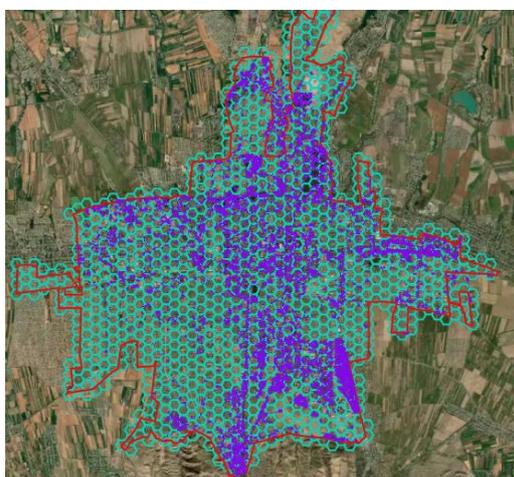


Рисунок 2.8 – Получение гексагонов

С помощью гексагонов сужается размер поиска объектов и определение изменений. В результате анализа временного ряда из снимков были получены объекты, которые попали в полигон в результате анализа на основе порогового значения. На снимке они изображаются в виде прямоугольных полигонов с растительностью.

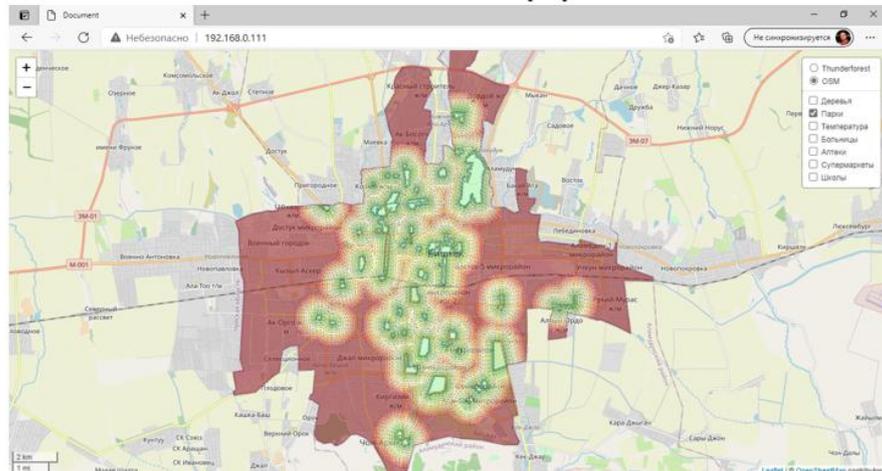


Рисунок 8 – Карта зеленых зон Бишкека

Заключение

Задача слияния мультиспектральных изображений в дистанционном зондировании имеет достаточно большое значение – ее результат дает более полную картину об объекте исследования и широко используется, в частности, в геоинформационных системах. Существует достаточное количество методов, позволяющих решить данную задачу, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

В то же время достаточно важным является вопрос эффективной реализации данных методов, позволяющей достичь высокой производительности. Актуальность данного вопроса обусловлена большими размерностями данных, получаемых с сенсоров при дистанционном зондировании, что обусловлено постоянным развитием технологий.

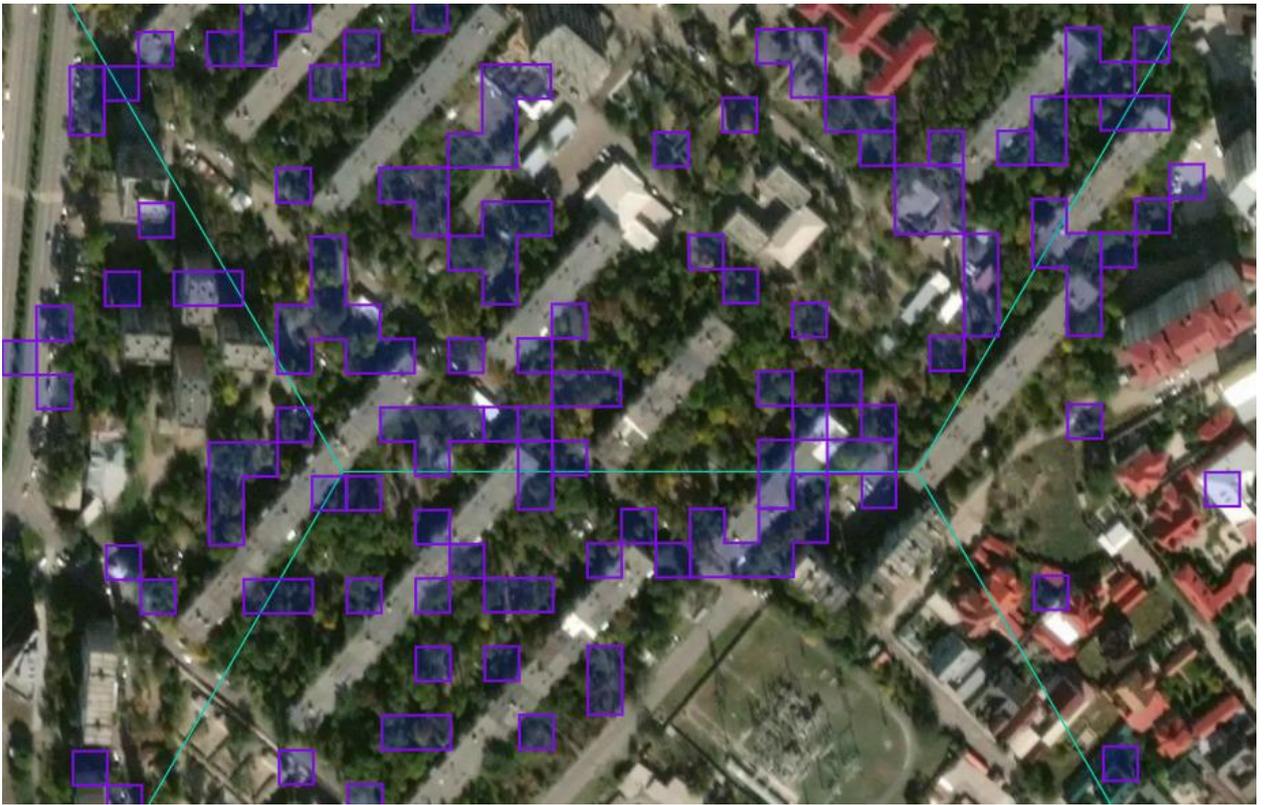
Список литературы:

1. Титаренко К. Методы слияния геоинформационных данных и их реализация на параллельных компьютерных системах. Интернет-ресурс. – Режим доступа: [Реферат - Титаренко К. К. - Методы слияния геоинформационных данных и их реализация на параллельных компьютерных системах \(donntu.org\)](#)
2. G. Simone, A. Farina, F.C. Morabito, S.B. Serpico, L. Bruzzone. Image fusion techniques for remote sensing applications [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/ URL: http://rslab.disi.unitn.it/papers/R21-IF.pdf](http://rslab.disi.unitn.it/papers/R21-IF.pdf). – Загл. с экрана.
3. QuickBird Satellite Images and Sensor Specifications [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/ URL: http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird.html](http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird.html). – Загл. с экрана.
4. Image fusion and pan-sharpening: the big picture [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/ URL: http://www.geosage.com/highview/imagefusion.html](http://www.geosage.com/highview/imagefusion.html). – Загл. с экрана.
5. Yun Zhang. Understanding Image Fusion [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/ URL: http://studio.gge.unb.ca/unb/zoomview/PERS_Vol70_No6_paper.pdf](http://studio.gge.unb.ca/unb/zoomview/PERS_Vol70_No6_paper.pdf). – Загл. с экрана.

6. Seung-Hun Yoo, Sung-Up Jo, Ki-Young Choi, Chang-Sung Jeong. A Framework for Multisensor Image Fusion using Graphics Hardware [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/URL: http://isif.org/fusion/proceedings/fusion08CD/papers/1569108117.pdf](http://www.isif.org/fusion/proceedings/fusion08CD/papers/1569108117.pdf). – Загл. с экрана.
7. Jun Lu, Baoming Zhang, Zihui Gong, Ersen Li, Hanye Liu. The remote-sensing image fusion based on gpu [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/6_WG-VII-6/32.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/6_WG-VII-6/32.pdf). – Загл. с экрана.
8. Qian Du, OguzGungor, Jie Shan. Performance Evaluation for Pan-sharpening Techniques [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/URL: http://cobweb.ecn.purdue.edu/~jshan/publications/2005/IGARSS_2005_FusionEvaluation.pdf](http://cobweb.ecn.purdue.edu/~jshan/publications/2005/IGARSS_2005_FusionEvaluation.pdf). – Загл. с экрана.
9. nVidia CUDA: вычисления на видеокарте или смерть CPU [Electronic resource] / Интернет-ресурс. – Режим доступа: [www/URL: http://www.thg.ru/graphic/nvidia_cuda/index.html](http://www.thg.ru/graphic/nvidia_cuda/index.html). – Загл. с экрана.

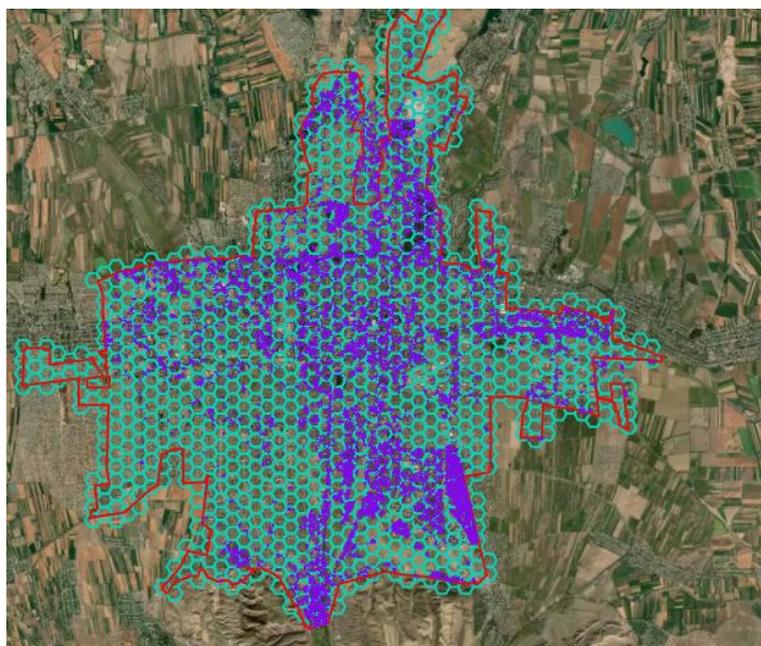
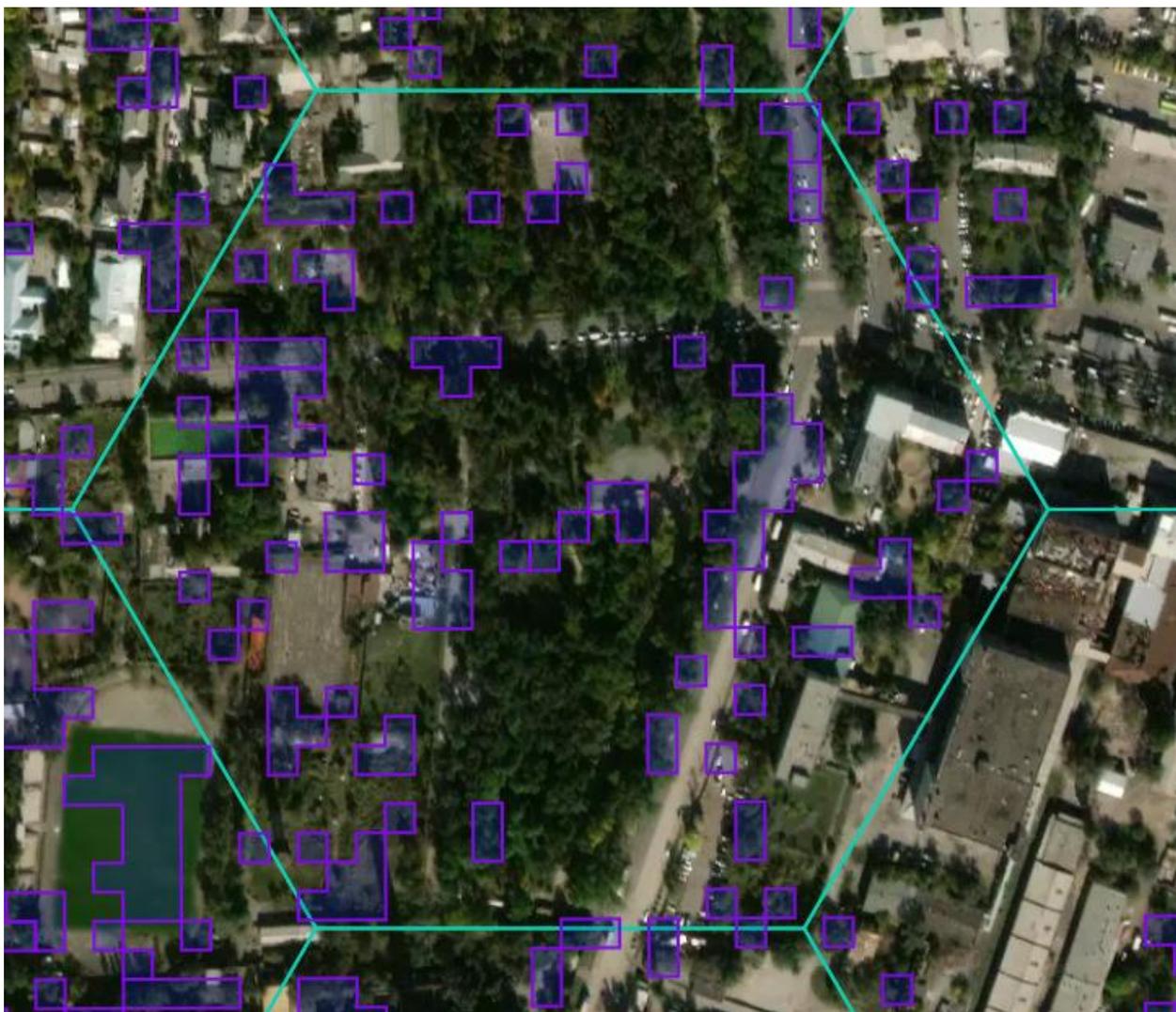








migrations 123 id ABC migration 123 batch	password_resets ABC email ABC token created_at	geo_items 123 id polygon ABC name 123 area created_at updated_at	hexagons 123 id polygon ABC center 123 area created_at updated_at	failed_jobs 123 id ABC uuid ABC connection ABC queue ABC payload ABC exception failed_at
users 123 id ABC name ABC email email_verified_at ABC password remember_token created_at updated_at	personal_access_tokens 123 id tokenable_type 123 tokenable_id ABC name ABC token abilities last_used_at created_at updated_at			



УДК: 681.5.017:621.224.7

А. Дж. Обозов¹, obozov-a@mail.ru,

Т.Т. Медеров¹, mtt-kg@mail.ru,

Р.А. Акпаралиев¹, ruslan.akparaliiev@gmail.com

К.Н. Оразбаев², kazbek_orazbaev@mail.ru

¹Институт машиноведения и автоматики НАН КР

²Жезказганский университет им. О. А. Байконурова

ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДЫ КОМPASFLOW ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОДОВОРОТНОЙ ГЭС

В статье рассматривается задача разработки гравитационной водоворотной микро-ГЭС (ГВВмГЭС), в которой для выработки электрической энергии используют скорость течения водоворотного потока, формирующегося за счет гравитации. Такая технология является относительно новой в области гидроэлектроэнергетики. Течения потока жидкости в ГВВмГЭС с тремя различными моделями гидротурбин в цилиндрическом бассейне были смоделированы с использованием программы KompasFlow. Основное уравнение движения жидкости – это уравнение Навье-Стокса. Изложено подробное описание алгоритма моделирования. Представлены результаты численного эксперимента моделей.

Ключевые слова: гидроэлектростанция; микро-ГЭС; напор; расход; мощность; выработка; гидротурбина; гидрогенератор; водоворот; компас-3D, вычислительная гидродинамика (ВГД); возобновляемые источники энергии.

Введение

Во всем мире сегодня ученые исследуют технологии и ищут пути их использования для поддержки перехода электроэнергетического комплекса к низкоуглеродным системам. В этой связи для Кыргызской Республики с её богатым гидроэнергетическим потенциалом являются весьма актуальными вопросы исследования и использования гидроэнергетических установок для получения электроэнергии [1, 4, 9]. Гидроэнергетика на сегодняшний день представляет зрелый и конкурентоспособный возобновляемый источник энергии, который может балансировать колебания между спросом на энергию и ее предложением. Относительно новой технологии, предназначенной для генерации электроэнергии и относящейся к возобновляемым источникам энергии, считается низконапорная гравитационная водоворотная микро-ГЭС [2, 6]. Она классифицируется как микромасштабная гидроэлектростанция и содержит водоворотную гидротурбинную систему. Установка разработана для работы в непосредственной близости от ручья на основе круглого бассейна с центральным отверстием, а также входного и выходного каналов. Общий вид установки, включая гидроагрегат, представлен на рис. 1.

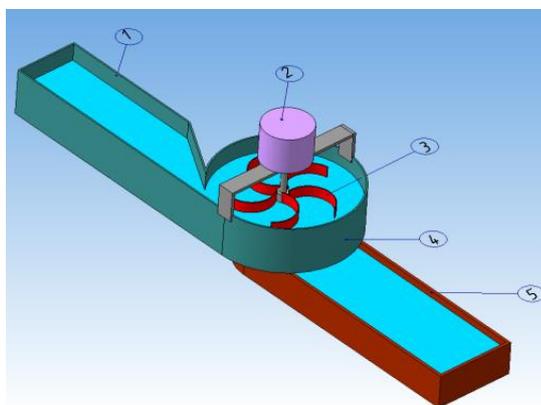


Рисунок 1 – Гравитационная водоворотная микро-ГЭС

1 – подводящий канал; 2 – гидрогенератор; 3 – гидротурбина; 4 – круглый бассейн; 5 – отводящий канал

Создание устойчивого водного вихря (воронки) над отверстием приводит в действие водяную гидротурбину, которая устанавливается на подходящей высоте. Поэтому эта установка способна преобразовывать гидравлическую энергию движущегося потока в механическую энергию вращения, используя низкий напор.

В ГВВМГЭС энергия перемещающейся водной массы преобразуется в гидравлическую энергию за счет гравитации с помощью круглого бассейна с отверстием на дне, и в центре образованного водоворота гидротурбиной извлекается механическая энергия вращения вала. Рабочий диапазон ГВВМГЭС, предложенный Тимилсиной и др. [3], показан на рис. 2 с предлагаемым диапазоном напора, который имеет гораздо больший рабочий диапазон, чем водяные колеса и винт Архимеда. Как видно, данная установка покрывает существующий пробел в эксплуатации низконапорных гидроэнергетических систем.

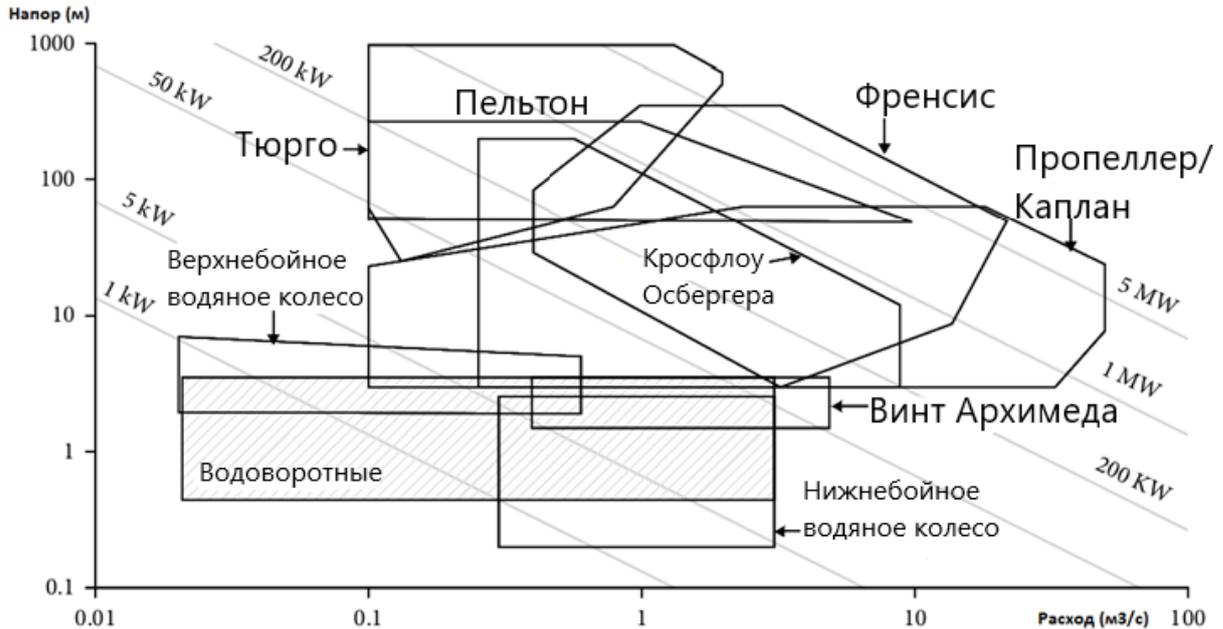


Рисунок 2 – Диапазон применения гидравлических турбин с указанием диапазона, охватываемого водоворотной турбиной

Как и во всех гидроэнергетических установках, сердцевиной ГВВМГЭС является гидроагрегат, состоящий из гидрогенератора и гидротурбины. Гидротурбина в свою очередь является первичным двигателем системы, определяющим в целом эффективность установки. Поэтому в первую очередь необходимо изучить гидродинамическую теорию решеток и рассмотреть взаимодействие гидравлической воронки с лопастной системой гидротурбины микрогидроэлектростанции.

Постановка задачи

Поставлена задача исследовать течения жидкости в ГВВМГЭС с помощью компьютерной программы KomrasFlow. Для ГВВМГЭС с тремя различными типами турбин визуально рассмотреть линии тока жидкости и определить значения скоростей во всем проточном тракте.

Основные уравнения

Уравнение Навье – Стокса движения вязкой несжимаемой жидкости [5,6]:

$$\frac{d\vec{\vartheta}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{\vartheta}, \quad (1)$$

где $\frac{d\vec{\vartheta}}{dt}$ – полное ускорение частицы жидкости; \vec{F} – ускорение от массовых сил; $-\frac{1}{\rho} \text{grad } p$ – ускорение от сил давления; $\nu \nabla^2 \vec{\vartheta}$ – ускорение от сил вязкости.

В цилиндрической системе координат упомянутое выше уравнение запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_r}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_r}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} - \frac{\vartheta_\theta^2}{r} &= 2\omega_0 \vartheta_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_r}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_r}{r^2} \right) \\ \frac{\partial \vartheta_z}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} - \frac{\vartheta_\theta^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_z}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_z}{r^2} \right) \\ \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial r} + \vartheta_z \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial z} - \frac{\vartheta_\theta \vartheta_r}{r} &= 2\omega_0 \vartheta_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vartheta_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_\theta}{\partial z^2} - \frac{\vartheta_\theta}{r^2} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vartheta_r) + \frac{\partial \vartheta_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При протекании жидкости через произвольную решетку, вращающуюся с постоянной угловой скоростью ω , происходит изменение энергии потока, точнее уменьшается.

Изменение энергии, отнесенной к единице объема жидкости, между сечениями 1 и 2 произвольной поверхности тока будет полным давлением:

$$P = \frac{dE}{dV} = \left(\gamma z_2 + p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} \right) - \left(\gamma z_1 + p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \right), \quad (3)$$

где dE – изменение энергии жидкости, dV – объем жидкости, z – высотная координата точки, p – давление, v – скорость, γ – удельная сила тяжести жидкости, ρ – плотность жидкости.

На основании уравнения Бернулли для относительного течения:

$$\gamma z_1 + p_1 + \rho \frac{w_1^2 - u_1^2}{2} = \gamma z_2 + p_2 + \rho \frac{w_2^2 - u_2^2}{2} + \Delta P_n, \quad (4)$$

где w – относительная скорость, u – окружная скорость, ΔP_n – изменение полного давления за счет гидравлических потерь на участке между сечениями 1-2.

Из (4) будет

$$(z_2 - z_1)\gamma + (p_2 - p_1) = \rho \frac{w_1^2 - u_1^2}{2} - \rho \frac{w_2^2 - u_2^2}{2} - \Delta P_n.$$

Подставив далее в (3),

$$P = \frac{\rho}{2} (v_2^2 + u_2^2 - w_2^2) - \frac{\rho}{2} (v_1^2 + u_1^2 - w_1^2) - \Delta P_n.$$

Это уравнение позволяет определить изменение удельной энергии P потока на произвольной поверхности тока по скоростям потока в сечениях 1 и 2. Из треугольника скоростей известно

$$w^2 = v^2 + u^2 - 2uv \cos \alpha,$$

поэтому

$$\begin{aligned} P + \Delta P_n &= \rho (u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_1) \\ v_u &= v \cos \alpha \\ u &= \omega r \\ P + \Delta P_n &= \rho \omega (r_2 v_{2u} - r_1 v_{1u}). \end{aligned} \quad (5)$$

Циркуляция скорости перед решеткой

$$\Gamma_1 = 2\pi r_1 v_{1u}$$

и за решеткой

$$\Gamma_2 = 2\pi r_2 v_{2u}.$$

Отсюда изменение удельной энергии потока пропорционально плотности жидкости, угловой скорости вращения решетки и разности циркуляций:

$$P + \Delta P_n = \rho \frac{\omega}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1). \quad (6)$$

Если $\Gamma_2 > \Gamma_1$, то правая часть положительная, что говорит об увеличении энергии жидкости (насос). Если $\Gamma_2 < \Gamma_1$, то жидкость теряет свою энергию, отдавая её лопастям (турбина).

В идеальном случае при отсутствии потерь в решетке теоретическое полное давление

$$P_T = \rho \frac{\omega}{2\pi} (\Gamma_2 - \Gamma_1). \quad (7)$$

С другой стороны, P_T – механическая удельная энергия, получаемая в турбинной решетке для реального течения.

Учитывая, что потеря ΔP_n всегда положительна, коэффициент полезного действия для турбинной решетки, расположенной на рассматриваемой поверхности тока,

$$\eta = \frac{P_T}{P} = \frac{P_T}{P_T + \Delta P_n}. \quad (8)$$

Мощность, отданная потоком при обтекании решетки

$$N = \bar{P}Q,$$

где \bar{P} – среднее полное давление, Q – расход жидкости через решетку, откуда гидравлическая мощность на валу турбинного колеса

$$N_T = \bar{P}_T Q = \bar{P} Q \eta = \frac{\rho Q \omega (\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_2)}{2\pi}. \quad (9)$$

Из формулы (9) момент на валу гидротурбины будет

$$M = \frac{\rho Q}{2\pi} (\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_2). \quad (10)$$

Таким образом, при заданных величинах ρ , Q , ω мощность и момент на валу рабочего колеса зависят от изменения циркуляции скорости при обтекании решетки рабочего колеса.

Описание алгоритма моделирования в компьютерной программе

KompasFlow представляет собой интегрированные в программу КОМПАС 3D v.18 модуль и адаптированную для исследователя версию универсального гидродинамического программного комплекса FlowVision[10]. Для начала формируем геометрическую модель расчетной области в программе, как показано на рис. 3.

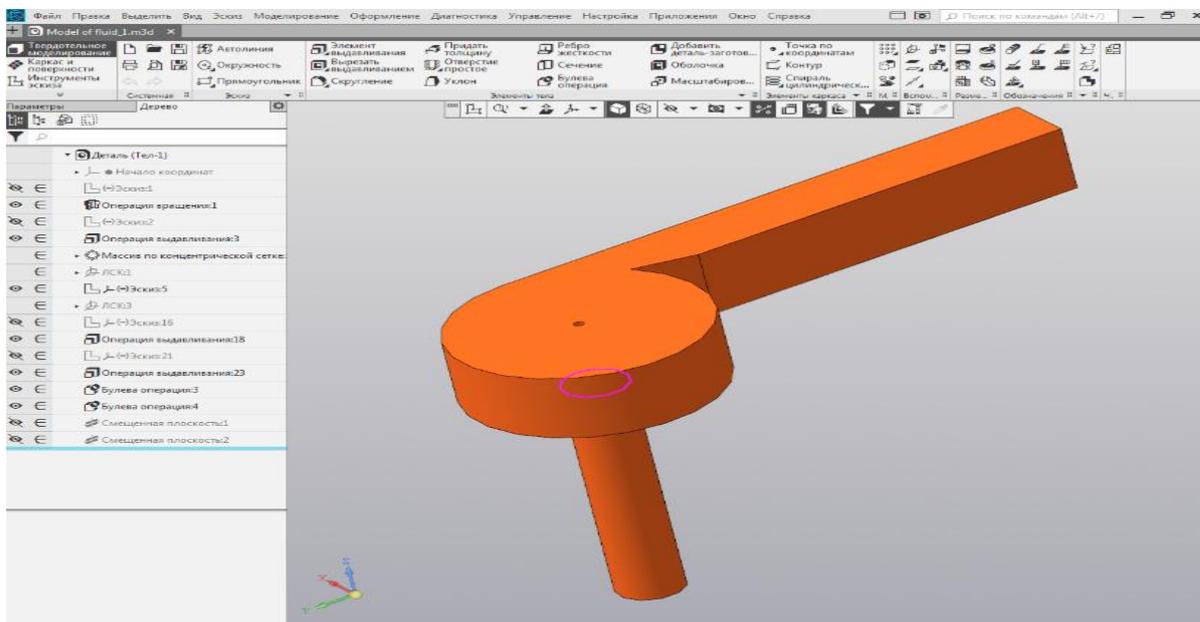


Рисунок 3 – Геометрическая модель расчетной области ГВВМГЭС

Затем в списке инструментальных панелей открываем KompasFlow, где в первую очередь задаются глобальные параметры. Для данного проекта опорное значение давления $P_{ref}=101000$ Па (атмосферное давление).

Далее выбирается вещество. В качестве рабочей среды задается вода со следующими свойствами: плотность – 1000 Кг/м^3 , молярная масса – $0,018 \text{ кг/моль}$, вязкость – $0,001 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$, теплопроводность – $0,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, удельная теплоемкость – $4217 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Затем идет набор решаемых уравнений. Поскольку в данном проекте моделируется турбулентное движение жидкости, то вместе с уравнениями движения (уравнение Навье-Стокса) необходимо применить модель турбулентности, используется стандартная k-ε модель турбулентности (k-epsilon standard).

Следующим шагом задаются граничные условия. На рис.4 представлены использованные граничные условия.

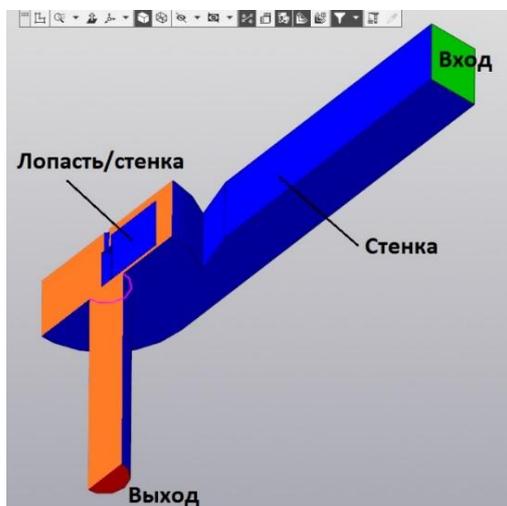


Рисунок 4 – Расстановка граничных условий

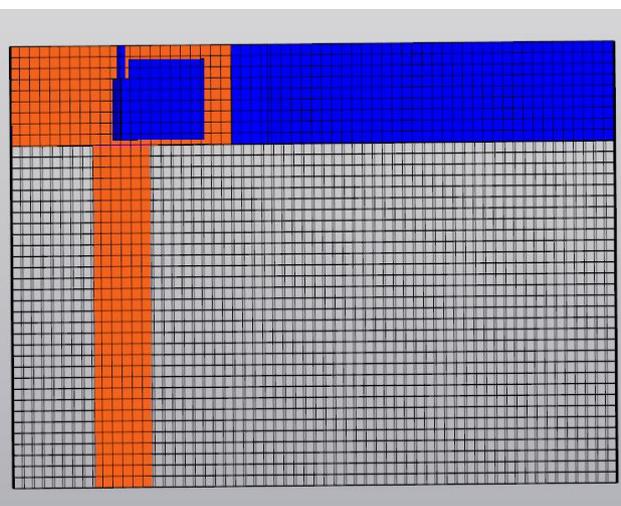


Рисунок 5 – Начальная сетка

Далее задаются начальные условия. Для ускорения сходимости решения к стационарному в проекте задается начальное приближение в виде следующих начальных условий: скорость по оси X равна 1 м/с, что соответствует расходу жидкости в сечении входа.

После устанавливается расчетная сетка, где весь расчетный объем разбивается на элементарные объемы. Для создания равномерной по всем осям расчетной сетки задана начальная сетка (рис. 5) со следующим количеством ячеек по осям: X: 200, Y: 60, Z: 40.

Параметры управления расчетом не изменяются и остаются по умолчанию (рис.6), так как их нужно менять при расчете сверхзвуковых потоков для сглаживания негативных численных эффектов.

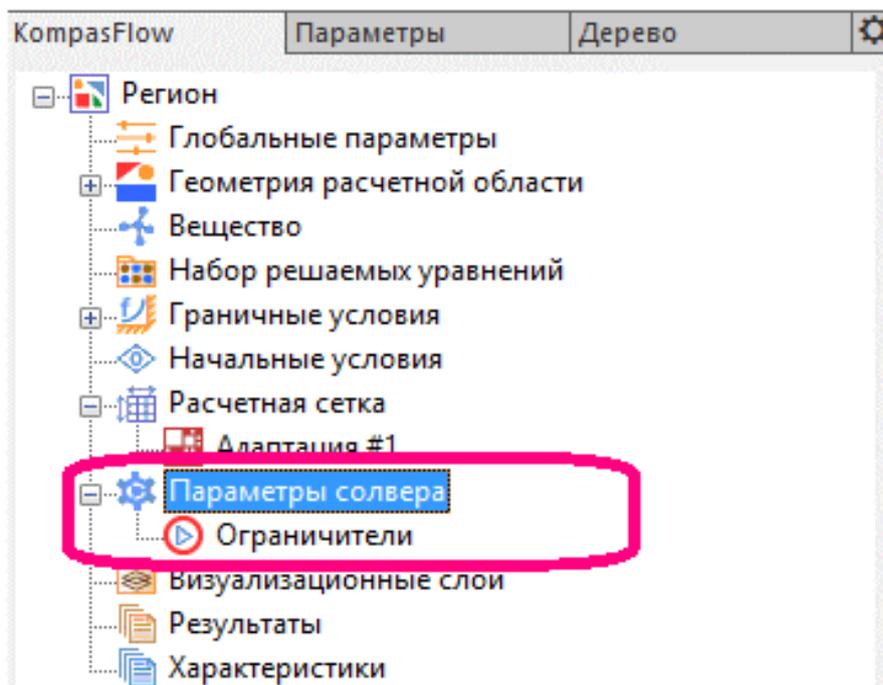


Рисунок 6 – Параметры солвера в дереве проекта

Наконец настраиваются отображения результатов расчета, где используются такие папки, как визуализационные слои, результаты, характеристики дерева проекта (рис.6).

Результаты численного эксперимента

Был проведен численный анализ трех моделей: 1) течение жидкости в установке гидротурбиной с плоскими лопастями (рис.7а); 2) течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями (рис.7б); 3) течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями и зазором между валом и ребром лопасти (рис.7в).

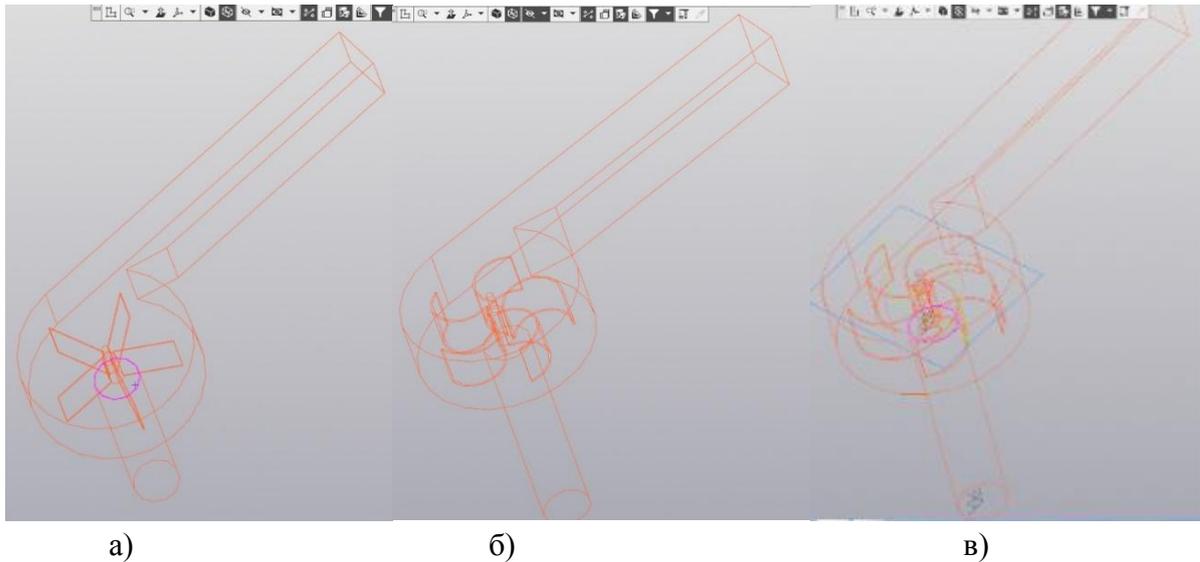
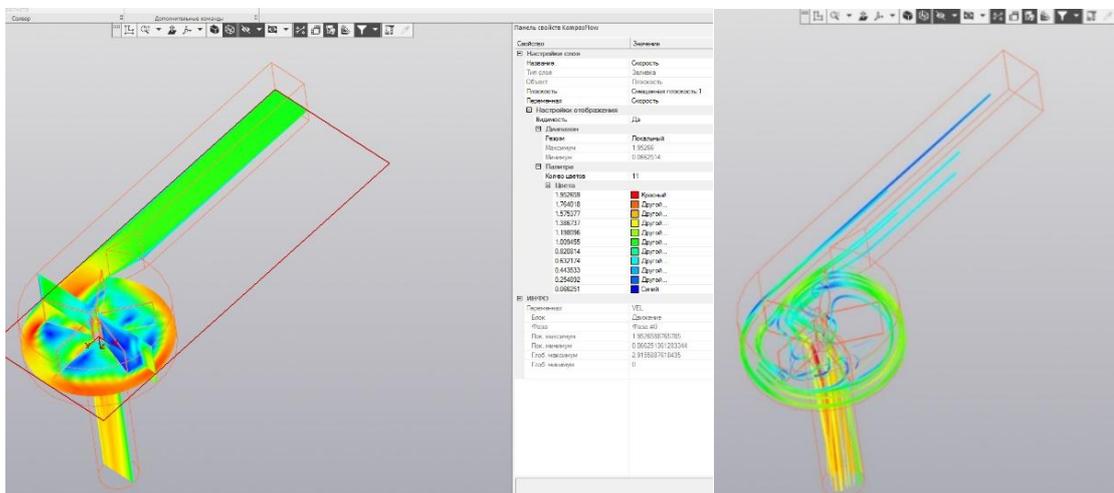


Рисунок 7 – Модели ГВВмГЭС с различными гидротурбинами

Во всех трех моделях глобальные параметры, вещество, набор решаемых уравнений и начальные условия одинаковы за исключением расчетных ячеек. Расчетная ячейка первой модели составила 62067, второй модели – 61849 и третьей модели – 62309. Шаг итерации численного расчета во всех трех моделях был принят 350.

Исследование 1: Течение жидкости в установке гидротурбиной с плоскими лопастями.

В цилиндрическом бассейне с диаметром 550 мм, высотой 220 мм, диаметром донного отверстия 85 мм, имеющим подводящий лоток и отводящую трубу, установлена гидротурбина с пятью плоскими лопастями с диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с плоскими лопастями и визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.8 представлены результаты исследования.



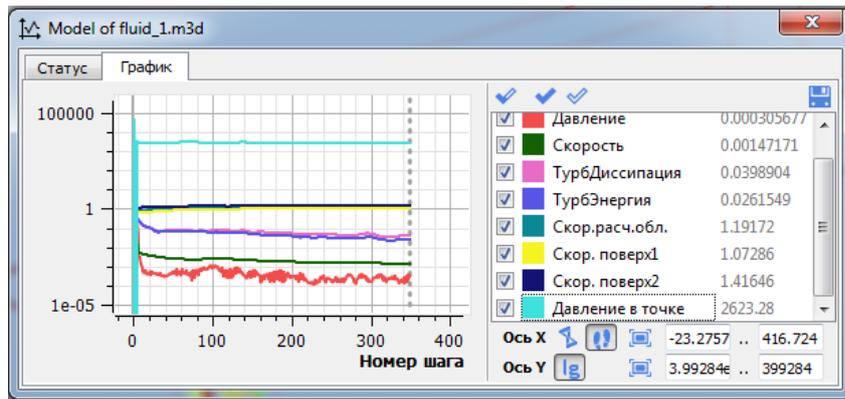


Рисунок 8 – Визуализационные слои «Заливка», «Линия тока» и график в окне мониторинга

Исследование 2: Течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями.

В том же цилиндрическом бассейне с теми же параметрами, подводящим лотком и отводящей трубой установлена гидротурбина с пятью полуцилиндрическими лопастями с радиусом изгиба 65 мм, углом входа 30° и диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с полуцилиндрическими лопастями и визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.9 представлены результаты исследования.

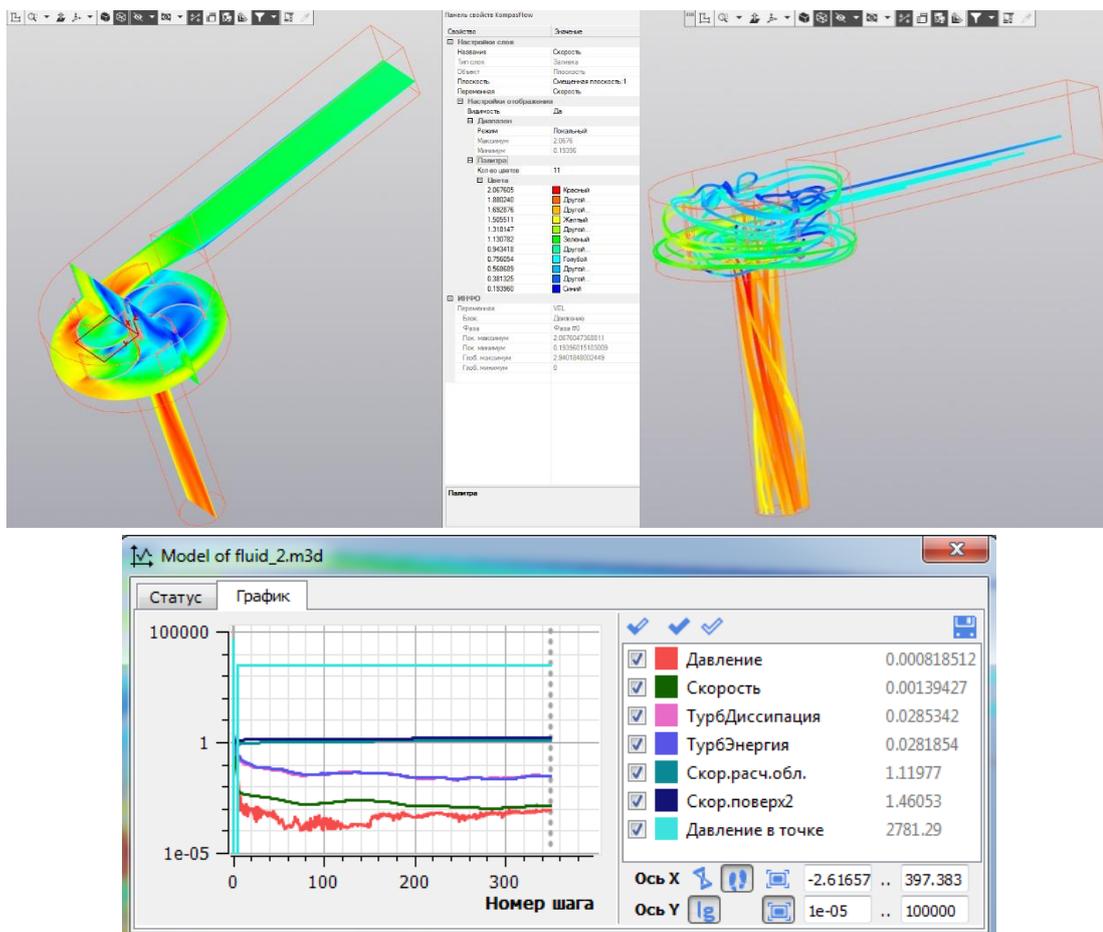


Рисунок 9 – Визуализационные слои «Заливка», «Линия тока» и график в окне мониторинга

Исследование 3: Течение жидкости в установке гидротурбиной с полуцилиндрическими лопастями и зазором между валом и ребром лопасти.

В том же цилиндрическом бассейне с теми же параметрами, подводящим лотком и отводящей трубой установлена гидротурбина с пятью полуцилиндрическими лопастями, но имеющими зазор между валом и ребром лопасти для возможности протечки потока жидкости. Радиусом изгиба лопасти 65 мм, углом входа 45°, диаметром 300 мм. С целью исследования взаимодействия потока жидкости с полуцилиндрическими лопастями, имеющими зазор между валом и ребром лопасти, визуального просмотра векторов и значений скорости в установке. На рис.10 представлены результаты исследования.

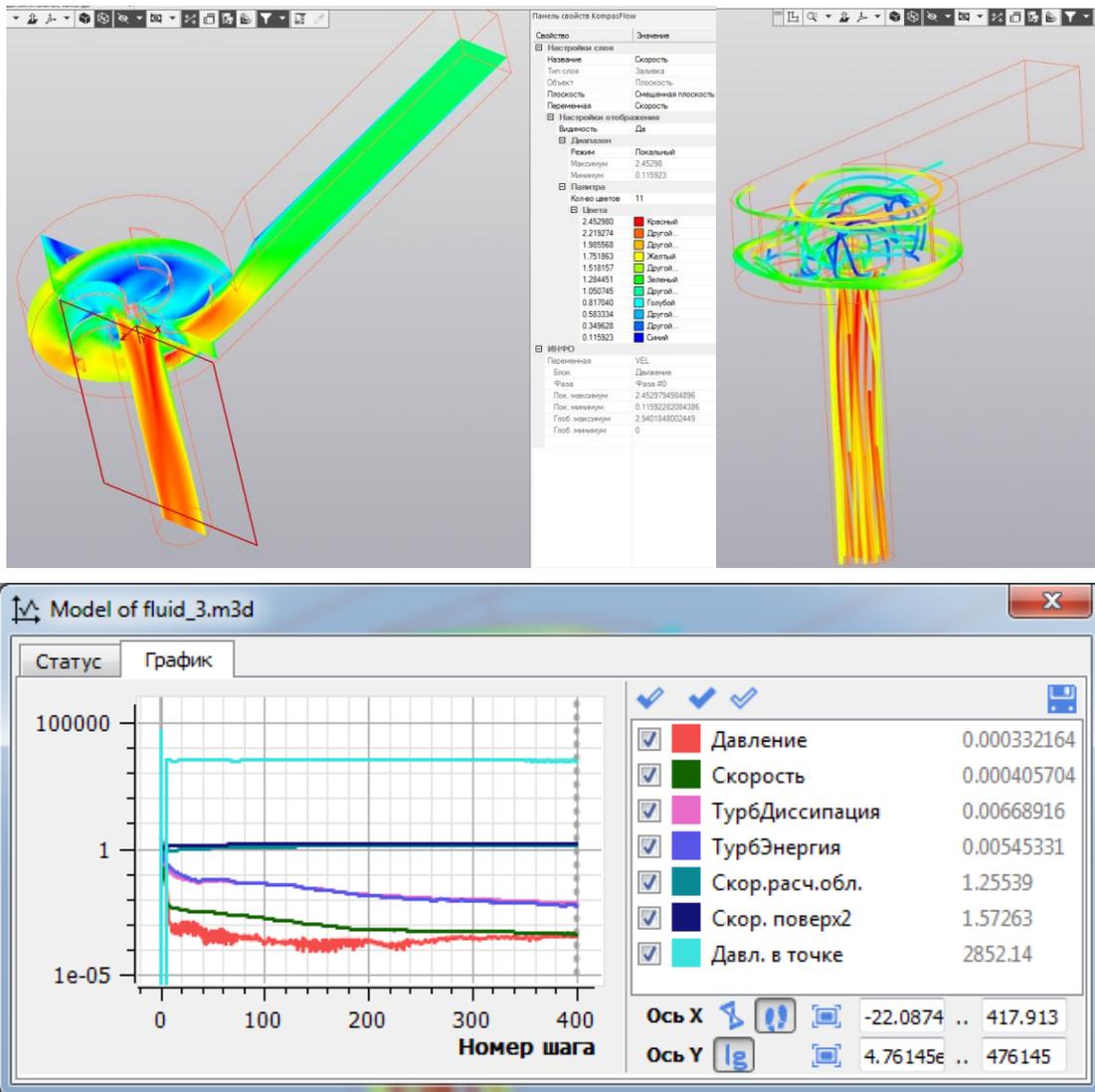


Рисунок 10 – Визуализационные слои «Заливка» по скорости, «Линия тока» и график в окне мониторинга

Заключение

В результате исследования можно визуально посмотреть течения жидкости в ГВВмГЭС, где отчетливо видно образование воронки в бассейне, циркуляцию скорости перед и за лопастями, а также распределение скорости в установке. Поток в цилиндрическом бассейне движется от периферии к центру в радиальном направлении, а затем на выходе в осевом направлении. Как показывают результаты анализа, во всех трех моделях, предложенных нами, водоворотных гидротурбин скорости на выходе будут почти одинаковыми. На входе же у модели 1 с плоскими лопастями скорости будут меньше по сравнению с моделями 2 и 3, поскольку относительная скорость, зависящая от формы

лопасти, будет меньше. На входных кромках модели 2 и модели 3 скорости будут примерно одинаковыми. А зазор, оставленный между валом и ребром в модели 3 для повышения эффективности, как оказалось, не влияет на скорости, т.к. выход осуществляется по осевому направлению, как показывает траектория движения жидкости, центральная часть гидротурбины, где имеется зазор, остается в воздушном пространстве созданной гидроворонки. Видно, что скорость потока жидкости в бассейне до взаимодействия с гидротурбиной имеет более высокое значение, а затем низкие значения после того, как отдает энергию гидротурбине. В окнах мониторинга показано, что у модели 1 давление в точке на поверхности лопасти имеет самое низкое значение из трех моделей. Из вышеизложенного предпочтение следует отдать второй модели гидротурбины.

Литература

1. Медеров, Т.Т. Моделирование и исследование процессов преобразования энергии в бироторной микро-ГЭС/ Медеров Т.Т., Обозов А.Дж., Акпаралиев Р.А., Ураимов Р.У. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – №32. – Бишкек, 2014. – С. 273– 278.
2. T.R. Bajracharya, R.M. Ghimire, A.B. Timilsina Design and performance analysis of water vortex powerplant in context of Nepal, 20th International Seminar on Hydropower Plants, 14-16 November 2018, Vienna, Austria.
3. B. Timilsina, S. Mulligan, and T. R. Bajracharya, “Water vortex hydropower technology: a state-of-the-art review of developmental trends,” *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 20, no. 8, pp. 1737–1760, 2018.
4. Медеров, Т.Т. Результаты построения гидродинамической модели турбины микро-ГЭС / Т.Т. Медеров. // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – №33. – Бишкек, 2015. – С. 273– 278.
5. Викторов, Г.В. Гидродинамическая теория решеток. – М.: «Высшая школа», 1969. – 368 с.
6. Wanchat S. and R. Suntivarakorn. Preliminary design of a vortex pool for electrical generation / S. Wanchat, R. Suntivarakorn // *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 13(1), 2011.
7. Обозов, А.Дж. Возобновляемые источники энергии./ Учебное пособие для вузов. – Бишкек, ИЦ «Техник», 2010 г. – 264 с.
8. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа/ Учеб. для вузов. – Изд. 7-е / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
9. Бакасова, А.Б. Расширенные варианты использования гидроветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы/ Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К. // *Проблемы автоматики и управления*. –2021.– №3(42). –С. 4–14.
10. https://kompas.ru/source/info_materials/2018/KompasFlow-Help.pdf (Дата обращения: 01.11.21)

УДК 631.6. (575.2)

К.А. Пресняков, д.т.н., с.н.с.,
Г.К. Керимкулова, к.ф.-м.н., gulsaat@mail.ru
Г.О. Аскалиева, к.т.н., 87guzya@mail.ru
Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЛОКАЛЬНО ИЗОТРОПНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Установлено, что реальный турбулентный поток воды является совокупностью обычной турбулентности и виртуальной локальной изотропии течения воды.

Ключевые слова: относительные пульсационные структурные функции, локально изотропная турбулентность.

Цель – установить возможность вероятного проявления элементов локальной изотропии течения в открытом турбулентном потоке воды.

Основания методики:

- рассматриваемый объект – прямолинейный открытый турбулентный поток воды (предполагается отсутствие в нем поперечных циркуляционных течений);
- выражения для пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды:

$$u'_{\Delta y} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot u'_{\Delta t}, \quad (1)$$

$$v'_{\Delta y} = -\frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} \cdot v'_{\Delta t}, \quad (2)$$

где $u'_{\Delta y}$ – флуктуация (пульсация) продольной компоненты скорости по координате на его промежутке Δy , м/с; $v'_{\Delta y}$ – флуктуация (пульсация) вертикальной компоненты скорости по координате на его промежутке Δy , м/с; $u'_{\Delta t}$ – пульсация (флуктуация) продольной компоненты скорости по времени на его промежутке Δt , м/с; $v'_{\Delta t}$ – пульсация (флуктуация) вертикальной компоненты скорости по времени на его промежутке Δt , м/с; v – вертикальная компонента скорости воды, м/с.

Эти выражения получены с учетом следующих условий:

1. равенства нулю полных производных по условию изотропности течения;
 2. $u = \text{const}(x)$, $v = \text{const}(x)$ – условия изотропного течения;
 3. $w=0$ – условие отсутствия поперечных циркуляционных течений.
- Пульсационные структурные функции:

$$D_{u'u'} = \left| \frac{u'_{\Delta y}(y_1) - u'_{\Delta y}(y_2)}{\Delta y} \right|^2, \quad (3)$$

$$D_{v'v'} = \left| \frac{v'_{\Delta y}(y_1) - v'_{\Delta y}(y_2)}{\Delta y} \right|^2, \quad (4)$$

где размерность указанных функций составляет $L^2 \cdot T^{-2}$ (или же m^2/c^2);

- относительные пульсационные структурные функции [1]

$$\tilde{D}_{u'u'} = \left| \tilde{u}'(\tilde{y}_2) - \tilde{u}'(\tilde{y}_1) \right|^2, \quad (5)$$

$$\tilde{D}_{v'v'} = \left| \tilde{v}'(\tilde{y}_2) - \tilde{v}'(\tilde{y}_1) \right|^2, \quad (6)$$

где $\tilde{u}'(\tilde{y}_2), \tilde{u}'(\tilde{y}_1)$ – относительные значения пульсаций продольной компоненты скорости воды в промежутке времени Δt с вертикальными координатами \tilde{y}_2, \tilde{y}_1 соответственно; $\tilde{v}'(\tilde{y}_2), \tilde{v}'(\tilde{y}_1)$ – относительные значения пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в промежутке времени Δt с вертикальными координатами \tilde{y}_2, \tilde{y}_1 соответственно; эти выражения получены методом обезразмеривания входящих в них характеристик;

- относительные пульсационные структурные функции с учетом распределений И.К. Никитина (относительные пульсации продольной и вертикальной компонент скорости воды) [2, с.108, ф.44 и ф.46];

$$\tilde{D}_{u'u'} = \left| \varphi(\tilde{y}_2) - \varphi(\tilde{y}_1) \right|^2; \quad (7)$$

$$\tilde{D}_{v'v'} = \left| \psi(\tilde{y}_2) - \psi(\tilde{y}_1) \right|^2; \quad (8)$$

$$\varphi(\tilde{y}) = 0,25 + \left(\frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right); \quad (9)$$

$$\psi(\tilde{y}) = \frac{0,677 \cdot \tilde{y}}{\tilde{y} + 0,036} \cdot (\tilde{y}^2 - 2 \cdot \tilde{y} + 2), \quad (10)$$

где $\varphi(\tilde{y}), \psi(\tilde{y})$ – координатные части распределений пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды соответственно; \tilde{y} – относительная вертикальная координата;

- структурные функции для области турбулентного пограничного слоя при выполнении закона «2/3» Колмогорова – Обухова [3, стр. 265, ф. 113]

$$D_{ll} = \left| u_1(M_2) - u_1(M_1) \right|^2, \quad (11)$$

$$D_{nn} = \left| v_n(M_2) - v_n(M_1) \right|^2; \quad (12)$$

- отношение указанных структурных функций (поперечной к продольной)

$$\frac{D_{nn}}{D_{ll}} = 1,33 \text{ – как один из признаков локальной изотропии течения воды.}$$

Для конкретности расчетов выберем результаты реконструированных нами опытов В.Ф. Талмазы и Г.Н. Романенко [4].

Гипотеза. Отношение относительных пульсационных структурных функций (вертикальной к продольной), равное примерно 1,33, является одним из признаков проявления локальной изотропии турбулентного течения воды.

Так как при решении поставленной задачи мы используем пульсационные соотношения И.К. Никитина, то возникает необходимость установления сопоставимости упомянутых натуральных данных и результатов лабораторных исследований И.К. Никитина.

Проведем проверку выполнения условий плоского течения жидкости, показателем которого является, в частности, величина отношения H/V , где H – средняя глубина наполнения водотока, м; V – средняя ширина потока, м.

В результате анализа натуральных данных выявлено, что отношения H/V составляют следующий ряд: 0,24; 0,26; 0,17; 0,17; 0,17; 0,42; 0,16; 0,075; 0,063, причем наибольшее значение рассматриваемого отношения равно 0,42. Необходимо отметить, что полученные величины соответствуют порядку рассмотрения соответствующих натуральных объектов.

Проведя аналогичный анализ лабораторных данных И.К. Никитина, выявили, что для опытов V серии отношение Н/В составило 0,23 и 0,15, а для опытов VI серии – 0,46.

Таким образом, анализируемые натурные данные соответствуют условию плоского течения жидкости, которое в нашем случае выглядит следующим образом: $H / B \leq 0,46$.

Сама методика заключается в том, что ведется поиск координат точки (или точек), где отношение относительных пульсационных структурных функций (вертикальной к продольной) составляет величину порядка 1,33 (таблица 1).

Таблица 1– К поиску координат точки (или точек), где отношение относительных пульсационных структурных функций составляет величину порядка 1,33

\tilde{y}_2	\tilde{y}_1	$\phi(\tilde{y}_2)$	$\phi(\tilde{y}_1)$	$\psi(\tilde{y}_2)$	$\psi(\tilde{y}_1)$	$\tilde{D}_{v'v'}$	$\tilde{D}_{u'u'}$	$\frac{\tilde{y}_2 + \tilde{y}_1}{2}$	$\tilde{D}_{v'v'} / \tilde{D}_{u'u'}$
1	0,9	0,41	0,43	0,65	0,66	$2 \cdot 10^{-5}$	0,0002	0,95	0,08
0,819	0,818	0,44	0,44	0,67	0,67	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	0,82	1,33
0,8	0,6	0,44	0,49	0,67	0,74	0,005	0,002	0,7	2,31
0,6	0,4	0,49	0,56	0,74	0,84	0,011	0,0049	0,5	2,19
0,4	0,45	0,56	0,54	0,84	0,82	$8 \cdot 10^{-4}$	0,0004	0,43	1,78
0,372	0,371	0,57	0,57	0,86	0,86	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	0,37	1,33
0,2	0,06	0,69	0,87	0,94	0,80	0,021	0,0325	0,13	0,64
0,06	0,02	0,87	0,95	0,80	0,47	0,104	0,0068	0,04	15,4

Вначале производят общую оценку возможных результатов с целью выявления тех областей потока, где возможно проявление искомого нами отношения. Далее проводят более подробный анализ окрестностей точек возможного проявления указанного соотношения (методом минимизации расстояний между измерительными точками).

Искомое отношение относительных пульсационных структурных функций определяют на основе использования координатных частей распределений пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды. Так как указанные координатные части упомянутых функций не зависят от конкретных условий проводимых натурных опытов, то результат подобного поиска будет практически одинаков. Это не должно вызывать определенных сомнений, так как наши результаты определяются пульсационными соотношениями И.К. Никитина. Надо понимать, что в случае использования других пульсационных соотношений результат может оказаться иным.

Анализ показал (таблица 1), что в реальном турбулентном потоке воды обнаруживаются две точки, в которых выполняется искомое отношение, а именно: $\tilde{y}_{cp} = 0,82$ и $\tilde{y}_{cp} = 0,37$, т.е. именно в этих точках проявляются элементы локальной изотропии турбулентного течения воды. Координата $\tilde{y}_{cp} = 0,37$ примечательна тем, что она практически соответствует координате точки измерения (0,4) средней по сечению потока скорости воды. Что же касается координаты $\tilde{y}_{cp} = 0,82$, то пока найти объяснение этому факту не удастся.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что в реальном турбулентном потоке воды имеют место быть две точки, в которых проявляются элементы локально изотропной турбулентности. Координата одной из этих точек практически совпадает с координатой точки измерения средней по сечению потока скорости воды.

Литература

1. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Сравнительный анализ пульсаций динамического давления и компонент скорости в открытом турбулентном потоке воды // Международный научный форум «Мировая наука и современные вызовы в эпоху глобализации и цифровой трансформации». – Бишкек, 2022г.
2. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963.–138с.
3. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т.1 . Структура потока. – М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. –323 с.
4. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К. Установление среднеинтегрального профиля скорости воды частично изученного открытого водотока на основе реконструкции эмпирических данных // Проблемы автоматизации и управления.– 2012.– №2.– С. 47–56.

УДК 519. 633:532.594:62-50

*Г.Ч. Тукембаева, аспирант, tukembaeva.g@gmail.com**Б.К. Темиров, д.ф.-м.н., профессор**КНУ им. Ж. Баласагына*

АНАЛИЗ УРАВНЕНИЙ СЕН-ВЕНАНА ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО УКЛОНА

Для одномерной системы нелинейных уравнений гиперболического типа – уравнений Сен-Венана получено доказательство однозначной разрешимости методом Рунге. Дифференциально-разностная задача метода Рунге преобразована в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), соответственно дивергентной форме исходной системы нелинейных уравнений мелкой воды. Так как поведение системы ОДУ определяется собственными числами, то исследуется система ОДУ без правой части для реализации волновода Лаврентьева. Из системы следует квадратное уравнение, характеризующее поведение системы ОДУ и уравнений Сен-Венана. Результаты подтверждаются доказательством справедливости выводов. По сравнению с известными методами цунами исследуется как динамическая система. Найденное решение адекватно известным результатам из других областей естествознания, что гарантирует корректность применения методов динамических систем.

Ключевые слова: уравнения мелкой воды, метод Рунге, динамические системы, условие Куранта, цунами.

Введение

Уравнения мелкой воды в виде системы нелинейных уравнений гиперболического типа описывают цунами, волны Россби. Их инициируют подводные землетрясения, извержения вулканов, оползни и ядерные взрывы, что вызывает к изучению численными методами. В одномерном (1D) случае уравнения мелкой воды описываются уравнениями Сен-Венана [1]-[6]. Шаг сетки в численных методах дается условием Куранта – неравенством, связывающим шаг по времени и расстоянию [7]-[14]. В регуляризованных уравнениях выбор шагов обоснован формулой Куранта для ячейки разностной схемы [11, с. 155], но так же, как и условие, является необходимым условием сходимости [12], [14]. Иную идею в середине прошлого века выразил М.А. Лаврентьев. Он предположил, что рельеф океанического дна порождает волновод, где цунами генерирует частоты инфразвука – «голос моря» [3], скорость звука в воде 1500 м/с. Свойства волновода выражаются рельефом шельфа от источника к оси русла подводной реки, т.е. продолжения реки на континентальном шельфе, а значит, 1D-уравнениям мелкой воды. Поэтому волновое число и длину волны волновода Лаврентьева необходимо вычислять, исходя из параметров уравнений Сен-Венана подводной реки. В настоящей статье в отличие от изучения цунами [6], двуслойных уравнений мелкой воды [13], в том числе устойчивых по Ляпунову [14] и решения методом Рунге [15], к исследованию привлечены методы динамических систем [16] и условие ортогональности. Препятствия на пути потока [9] учитываются знаком уклона. Для цунами знак уклона отрицательный. Их изучение обусловлено исследованием подводных вулканов [17]. Замыкание обратной связью, во-первых, позволяет доказать сходимость к уравнениям Сен-Венана, аппроксимированных по Рунге, так как дает условие сходимости $\tau < U^2/g\varphi_n$ [2]. Во-вторых, обоснует реализуемость волновода как канал передачи информации о катастрофических событиях из глубин океана. Такое представление значимо для схем устойчивого счета и объяснения образования волн и колебаний согласно нелинейным уравнениям мелкой воды.

Постановка задачи

В области $G = \{(t, x): t \in [0, T]; x \in [0, \infty)\}$ необходимо определить $h(t, x)$ и $u(t, x)$, заданные уравнениями Сен-Венана в дивергентной форме:

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + g \left(\frac{hu^2}{U^2} + h \frac{\partial z}{\partial x} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = f(t, x) \quad (2)$$

с начальными и граничными условиями и учетом их согласования при $t=0, x=0$:

$$h(0, x) = h_0(x), \quad u(0, x) = u_0(x), \quad x \in [0, \infty); \quad (3)$$

$$h(t, 0) = \eta(t), \quad u(t, 0) = \varphi(t), \quad t \in (0, T]; \quad (4)$$

$h(t, x)$ – глубина; $u(t, x)$ – скорость потока; $g=9.81$ м/с²; $z(t, x)=I(x)+h$ – отметка уровня свободной поверхности; $I(x)$ – уклон дна, априори, положительный. В настоящей работе исследуем общий случай, когда уклон $I>0$ и $I<0$ на отдельных участках русла. В уравнении (1) скорость потока задана формулой Шези $U=C(RI)^{1/2}$, где C – коэффициент Шези; $R(x)$ – гидравлический радиус вычисляется по сечениям h . Например, ширина потока b в широком прямоугольном русле много больше глубины $h(t, x)$ [4], поэтому $R=bh/(b+2h)\approx h, U^2\approx C^2hI$.

Преобразование методом Рунге

Согласно методу Рунге, разобьем область G на подобласти $G_n=\{(\tau, x): \tau \in [t_{n-1}, t_n]; x \in [0, \infty)\} \in G$ с шагом времени $\tau=t_n-t_{n-1}$. Тогда в G_n задача (1)-(4) дискретизируется дифференциально-разностными уравнениями с независимой переменной x

$$\frac{(hu)_n(x) - (hu)_{n-1}(x)}{\tau} + \frac{d(hu^2)_n}{dx} + \frac{g}{U_{n-1}^2} (hu^2)_n = -g \left(h \frac{dz}{dx} \right)_{n-1}, \quad (5)$$

$$\frac{h_n(x) - h_{n-1}(x)}{\tau} + \frac{d(hu)_n}{dx} = f_n(x), \quad (6)$$

а начальные и граничные условия принимают вид

$$h_{n-1}(0, x) = h_0(x), \quad u_{n-1}(0, x) = u_0(x), \quad n = 1; \quad (7)$$

$$h(t_n, 0) = \eta_n, \quad u(t_n, 0) = \varphi_n, \quad n = 1, \dots, N. \quad (8)$$

В уравнении (5) член $(hu)_n(x)/\tau$ не удовлетворяет закону сохранения в момент t_n , так как ему отвечает $(hu^2)_n(x)$ в этом уравнении. Аналогичным образом, $h_n(x)/\tau$ не адекватно закону сохранения в виде $(hu)_n(x)$, принятому в уравнении (6). Устраним их умножением $(hu)_n(x)/\tau$ и $h_n(x)/\tau$ на $u_n(x)/u_{n-1}(x) \equiv 1$, соответственно в уравнениях (5) и (6). Поэтому законы сохранения задачи (1)-(4) соблюдены в G_n , а дифференциально-разностная задача (5)-(8) выражается системой ОДУ (обыкновенных дифференциальных уравнений):

$$\frac{d(hu^2)_n}{dx} + \left(\frac{g}{U_{n-1}^2} + \frac{1}{\tau u_n} \right) (hu^2)_n(x) = \frac{(hu)_{n-1}(x)}{\tau} - g \left(h \frac{dz}{dx} \right)_{n-1}, \quad (9)$$

$$\frac{d(hu)_n}{dx} + \frac{(hu)_n(x)}{\tau u_n(x)} = f_n(x) + \frac{(hu)_{n-1}(x)}{\tau} \quad (10)$$

$$(hu^2)_{n-1}(0, x) = (\eta\varphi^2)_{n-1}(x), \quad (hu)_{n-1}(0, x) = (\eta\varphi)_{n-1}(x), \quad n = 1;$$

с начальными условиями на границе $x=0$ следующего вида

$$(hu^2)_n(t_n, 0) = \eta_n \varphi_n^2, \quad (hu)_n(t_n, 0) = \eta_n \varphi_n, \quad n = 1, \dots, N. \quad (11)$$

Перемножением искомым функций в условии (11) удовлетворены законы сохранения в точности, как в системе (9)-(10). Коэффициенты уравнений (9)-(10) содержат искомую функцию $u_n(x)$ с независимой x ; удовлетворяют законам сохранения и относительно искомым $(hu^2)_n(x)$ и $(hu)_n(x)$ являются линейными уравнениями. Если найдено ограничение на τ , то они эквивалентны уравнениям (1)-(2), где ограничение устанавливает сходимость решения задачи (9)-(11) к задаче (1)-(4). Поскольку модель описывается системой ОДУ, то для решения поставленной задачи и вычисления параметров волновода k и λ изучим уравнения Сен-Венана с учетом знака уклона $\pm I$, равного $\text{sgn } I$, как динамическую систему.

Схема Роте позволяет в момент t_n развернуть картину течения в G_n по картине течения в момент времени t_{n-1} , отвечающей G_{n-1} так, что получаем сменяемую последовательность картин $n=1, 2, \dots, N$, как кадров кинофильма. Шаг τ обеспечивает непрерывность следующих друг за другом картин течения в динамике. Правая часть (9)-(10) – это возмущения, поступающие на вход с шагом τ . Они присутствуют в коэффициентах системы, поскольку заданы формулой Шези в виде $U_{n-1}(x)=C[R(x)I(x)]^{1/2}$ в момент времени t_{n-1} .

Решение задачи

Решение задачи подразделяется на изучение сходимости, волновода Лаврентьева и цунами. Поэтому сконцентрируемся на применении методов динамических систем к этим вопросам на основе задачи (9)-(11) и сформулируем в виде теоремы так, чтобы в ходе доказательства охватить все подразделы задачи.

Теорема

Для сходимости решения системы (9)-(10) с начальными условиями (11) к (1)-(4) необходимо, чтобы на произвольном отрезке $[0, x_m] \in G_n$ длиной $\Delta s = x_m - 0$ искомые функции $u_n(x)$ и $h_n(x)$, шаг τ и $\text{sgn } I$ удовлетворяли решению квадратного уравнения:

$$g(U^2 - g\tau\varphi_n)\Delta s^2 - U^4\Delta s + \tau\varphi_n U^4(1 + \text{sgn } I) = 0.$$

Доказательство. В системе уравнений (9)-(10) переменными являются $(hu^2)_n(x)$ и $(hu)_n(x)$ в точках $x \in (0, \infty)$ подобласти G_n . Ее эквивалентность системе (1)-(2) гарантирована соблюдением законов сохранения. В плане динамической системы изучим связь искомым функций $u_n(x)$ и $h_n(x)$ в $(hu^2)_n(x)$ и $(hu)_n(x)$, когда уклон $I > 0$ и $I < 0$ на отдельных участках. Так как сходимость выражается неравенством $\tau < U^2/g\varphi_n$ [2], то подтверждением доказательства будет вывод этого неравенства из решения квадратного уравнения, заданного теоремой.

Для нахождения собственных параметров системы (9)-(10) исследуем задачу (9)-(11) без правой части. Ей отвечают интегральные уравнения Вольтерра в G_n

$$(hu^2)_n(x) = \eta_n \varphi_n^2 \exp \left\{ - \int_0^x \left[\frac{g}{U_{n-1}^2(s)} + \frac{1}{\tau u_n(s)} \right] ds \right\}, \quad (12)$$

$$(hu)_n(x) = \eta_n \varphi_n \exp \left[- \int_0^x \frac{ds}{\tau u_n(s)} \right], \quad (13)$$

так как выведены согласно законам сохранения. Делением уравнения (12) на уравнение (13), поскольку $U_{n-1}(x)$ известно с момента t_{n-1} , находим скорость:

$$u_n(x) = \varphi_n \exp \left\{ - \int_0^x \left[\frac{g}{U_{n-1}^2(s)} \right] ds \right\}. \quad (14)$$

Разделив выражение (13) на (14), получим глубину потока

$$h_n(x) = \eta_n \exp \left\{ \int_0^x \left[\frac{g}{U_{n-1}^2(s)} - \frac{1}{\tau u_n(s)} \right] ds \right\}. \quad (15)$$

Исходя из того, что требуется определить собственные параметры волновода, запишем систему ОДУ (9)-(10) без правой части:

$$\frac{du_n}{dx} + \frac{g}{U_{n-1}^2(x)} u_n(x) = 0, \quad (16)$$

$$\frac{dh_n}{dx} + \left[\frac{1}{\tau u_n(x)} - \frac{g}{U_{n-1}^2(x)} \right] h_n(x) = 0. \quad (17)$$

Для системы (16)-(17) имеют место два случая: 1) если коэффициент уравнения (17) больше нуля, то система устойчива; 2) если коэффициент меньше нуля, то она неустойчива, как динамическая система. Поэтому рассмотрим систему на произвольном участке $[0, x_m] \in G_n$, длина которого $\Delta s = x_m - 0$ с неизменным уклоном на всем участке. На этом участке знак уклона I , скрытый функцией $U_{n-1}(x)$, имеет явный вид. Далее знак уклона $\pm I = \text{sgn } I$ вынесен перед формулой Шези $\pm U^2 = C^2 R I$ для момента времени t_{n-1} . Тогда для всех $U^2 > 0$ система (16)-(17) примет вид алгебраической системы с матрицей коэффициентов:

$$\left\| \begin{array}{cc} 1 + \frac{g\Delta s}{U_{n-1,m}^2} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\Delta s}{\tau u_{n,m}} - \frac{g\Delta s}{U_{n-1,m}^2} \end{array} \right\| = -(\text{sgn } I).$$

В правой части учтен охват отрицательной обратной связью с помощью знака «-» перед $\text{sgn } I$. Интеграл в (15) является определенным интегралом, если, во-первых, на участке длиной Δs отношение $g/U^2 = \text{const} > 0$. Во-вторых, если существует ограничение на шаг τ такое, что подинтегральная функция в (15) не имеет разрывов. По сути, матрица представляет собой условие ортогональности между вектором скорости $u(t, x)$ и дельта-функцией, выражающей значение глубины $h(t, x)$ в начале координат, чем отличается от [15].

Константой является волновое число $k = 2\pi/\lambda$, где длина волны $\lambda = U^2/g = C^2 R I/g$. Тогда параметры волновода описываются рельефом дна по оси русла подводной реки на шельфе, т.е. гидравлическим радиусом R , уклоном I и коэффициентом Шези C . Подводная река представляет собой продолжение реки от ее устья (эстуария) в открытое море, где течет по шельфу в океан. Подводная долина, по которой река течет и с шельфа скатывается каскадом на дно океана, вместе с каскадом служит направляющей. По ней цунами из океана врывается в подводную долину и далее в устье реки, так как сечение подводной долины обеспечивает наибольший расход в эстуарий.

Теперь перейдем к исследованию ограничения на шаг τ . Он должен быть таким, чтобы исключить несобственный интеграл 2-го типа в (15), т.е. ограничен так, что устраняется разрыв функции.

1) Случай $U^2 > 0$, $I > 0$ отвечает распространению потока по склону. Искомое значение $u_{n,m}$ равно скорости u_n в x_m , но U – скорости u_{n-1} на том же участке Δs с уклоном $I > 0$, поэтому $\text{sgn } I = +1$. Следовательно, в произвольной точке x_m из матрицы коэффициентов получим уравнение :

$$\left(1 + \frac{g\Delta s}{U^2}\right) \left[1 + \Delta s \left(\frac{1}{\tau u_n} - \frac{g}{U^2}\right)\right] = -(\operatorname{sgn} I).$$

Тогда Δs – длину отрезка $[0, x_m]$ находим путем решения квадратного уравнения:

$$g(U^2 - g\tau u_n)\Delta s^2 - U^4\Delta s + \tau u_n U^4(1 + \operatorname{sgn} I) = 0. \quad (18)$$

Корни уравнения (18) отвечают слоям двухслойного течения:

$$\Delta s_{1,2} = \frac{U^4 \pm \sqrt{U^8 - 4g\tau u_n U^4(1 + \operatorname{sgn} I)(U^2 - g\tau u_n)}}{2g(U^2 - g\tau u_n)}.$$

Они $\Delta s_{1,2} > 0$, если выражение в знаменателе положительное, поскольку с учетом $\operatorname{sgn} I = +1$ дискриминант $D = U^8 - 8g\tau u_n U^4(U^2 - g\tau u_n) < U^8$, а значит, корень квадратный из него меньше U^4 . Скорость $U^2 = C^2 R I$ известна из предыдущего момента t_{n-1} , но $u_n(x)$ максимальна на границе $x=0$, так как задана условием (8) $u_n = \varphi_n$. Поэтому $\square \Delta s_{1,2} > 0$ произвольной длины

$$0 < \tau < U^2 / g\varphi_n. \quad (19)$$

Неравенство (19) как необходимое условие сходимости к 1D-уравнениям мелкой воды известно [2] и совпадает с методом Роте для уравнений Сен-Венана. Если $g\tau u_n = U^2$, то возникает разрыв из-за деления на нуль, а для всех $g\tau u_n > U^2$ расстояние $\Delta s_{1,2}$ в области $x \in [0, -\infty)$ или $\tau < 0$. Следовательно, в области $G_n = \{(\tau, x) : \tau \in [t_{n-1}, t_n]; x \in [0, \infty)\} \in G$ малость шага τ ведет к росту Δs , поэтому x_m стремится к правой границе $x \in [0, \infty)$, когда $\tau \rightarrow 0$. Таким образом, при переходе из G_{n-1} в G_n движение внутри отрезка $[0, x_m]$ не прерывается, если неравенство (19) включает длину волны $\lambda = U^2 / g$ в виде $\tau < \lambda / u_n$.

Отрицательный уклон

Движение потока вверх по склону (в гору) имеет место, когда $U^2 < 0, I < 0$. В природе отвечает распространению цунами над океаническим дном после взрыва подводных вулканов [17]. В этом случае в уравнениях (16)-(17) меняются знаки:

$$\begin{aligned} \frac{du_n}{dx} - \frac{g}{U_{n-1}^2(x)} u_n(x) &= 0, \\ \frac{dh_n}{dx} + \left[\frac{1}{\tau u_n(x)} + \frac{g}{U_{n-1}^2(x)} \right] h_n(x) &= 0. \end{aligned}$$

Такой системе уравнений соответствует матрица коэффициентов (условие ортогональности):

$$\left\| \begin{array}{cc} 1 - \frac{g\Delta s}{U_{n-1,m}^2} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{\Delta s}{\tau u_{n,m}} + \frac{g\Delta s}{U_{n-1,m}^2} \end{array} \right\| = -(\operatorname{sgn} I),$$

поэтому уравнение (18) примет вид:

$$g(U^2 + g\tau u_n)\Delta s^2 + U^4\Delta s - \tau u_n U^4(1 + \operatorname{sgn} I) = 0. \quad (20)$$

Так как $\operatorname{sgn} I = -1$ и $u_n = \varphi_n$, то полученное уравнение упрощается:

$$[g(U^2 + g\tau\varphi_n)\Delta s + U^4]\Delta s = 0. \quad (21)$$

Корни уравнения (22) неположительные

$$\Delta s_1 = 0; \quad \Delta s_2 = \frac{-U^4}{g(U^2 + g\tau\varphi_n)}$$

Поскольку никакие ограничения на корни не налагаются, то волна направлена в обратную сторону. Слева от $\Delta s_1=0$ образуется впадина, т.е. волна разрежения, где $\Delta s_2<0$. Тогда в целом вместо расчета интегралов (14)-(15) и отметок свободной поверхности $z_n(x)=I(x)+h_n(x)$ поведение волн на двух слоях модели определяется по их следу на поверхности русла.

Для не единичной обратной связи, например, $\text{sgn } I=-0.5$. Поэтому корни уравнения (20)

$$\Delta s_{1,2} = \frac{-U^4 \pm \sqrt{U^8 + 4g\tau\varphi_n U^4(1 - 0.5)(U^2 + g\tau\varphi_n)}}{2g(U^2 + g\tau\varphi_n)}$$

разного знака: $\Delta s_1>0$, $\Delta s_2<0$, так как радикал из дискриминанта $D=U^8+2g\tau\varphi_n U^4(U^2+g\tau\varphi_n)>U^4$. Хотя знаменатель в формуле $(U^2+g\tau\varphi_n)>0$, но неравенство (19) справедливо, поскольку уклон дна $I>0$ и $I<0$ во всей подобласти $G_n \in G$, где наименьшим τ отвечает $\max \varphi_n$. Относительно отметки свободной поверхности $z_n(x)$ волна в момент t_n набегаёт $\Delta s_1>0$, двигаясь вперед – прямой ход, затем отступает $\Delta s_2<0$, отхлынув назад – обратный ход. Такая динамика совпадает с поведением первой волны-цунами. Таким образом, пара корней $\Delta s_1>0$, $\Delta s_2<0$ определяет волнообразование и колебания. Теорема доказана.

Литература

1. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 448 с.
2. Вольцингер Н.Е. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
3. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. Очерк истории исследования проблемы цунами в Сибирском отделении Российской академии наук // Вычислительные технологии. 1999. – Т. 4, № 5. – С. 70–105.
4. Петросян А.С. Дополнительные главы теории мелкой воды. – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2014. – 64 с.
5. Шокин Ю.И. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц / Ю.И. Шокин, С.А. Бейзель, А.Д. Рычков, Л.Б. Чубаров // Матем. моделирование. – 2015. – Т. 27, № 1. – С. 99–112.
6. Марчук Ан.Г. Вычисление высоты цунами, распространяющейся над наклонным дном, в лучевом приближении // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. – Новосибирск, – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 377–388.
7. Birkhoff G. Numerical fluid dynamics // SIAM Rev. – 1983. – Vol. 25, N. 1. – P.1-34.
8. Булатов О.В., Елизарова Т.Г. Регуляризованные уравнения мелкой воды и эффективный метод численного моделирования течений в неглубоких водоемах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2011. – Т.51, №1. – С. 170–184.
9. Булатов О.В. Аналитические и численные решения уравнений Сен-Венана для некоторых задач о распаде разрыва над уступом и ступенькой дна // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2014. – Т. 54, №1. – С. 150–164.
10. Черевко А.А., Чупахин А.П. Уравнения модели мелкой воды на вращающейся притягивающей сфере 1. Вывод и общие свойства // Прикладная механика и техническая физика/ – 2009. – Т.50, №2. – С. 24–36.

11. Шеретов Ю.В. Регуляризованные уравнения гидродинамики. – Тверь: Тверской государ. ун-т, 2016. – 222 с.
12. Constantin A. Nonlinear water waves: introduction and overview // Royal Society of London. Philosophical Transactions A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 376, Issue number 2111 (20170310), 2018 Jan 28. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0310>
13. Елизарова Т.Г., Иванов А.В. Квазигазодинамический алгоритм численного расчета двуслойных уравнений мелкой воды // Препринт ИПМ им. М. Келдыша. – 2016. – № 69. – 27 с.
14. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. – М.: Наука, 1973. – 415 с.
15. Темиров Б.К., Тукембаева Г.Ч. Аналитическое решение уравнений мелкой воды методом Рунге // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. – 2020. – №3 (103). – С. 134–142.
16. Эрроусмит Д., Плейс К. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 243 с.
17. Pegler, S.S., Ferguson, D.J. Rapid heat discharge during deep-sea eruptions generates megaplumes and disperses tephra // Nature Communications. Vol. 12, No 2292. Published: 21 April 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22439-y>

УДК 537.527

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ. ВЛИЯНИЕ СЕТОЧНОГО ШАГА РАЗНОСТНОЙ ЗАДАЧИ

Урусова Индира Руслановна

кандидат физико-математических наук, доцент,

Кыргызский государственный юридический университет,

Бишкек, пр. Чуй, 180.

0700 54-02-02, e-mail: moon4ik_29@mail.ru, ORCID ID 0000-0003-2898-1069

Выполнены расчёты открытой электрической дуги в однородном внешнем аксиальном магнитном поле при различных значениях сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Установлено, что численная реализация винтовой формы дуги не зависит от величины сеточного шага и формируется в результате воздействия схемного аналога флуктуаций.

Ключевые слова: открытая электрическая дуга, внешнее аксиальное магнитное поле, винтовая форма столба дуги, численное моделирование.

Введение. Электрическая дуга во внешнем магнитном поле широко используется в научных исследованиях и технологических процессах [1–3]. Из опыта известно, что в однородном внешнем аксиальном магнитном поле (ВАМП) протяженная электрическая дуга может отклоняться от цилиндрической симметрии и принимать винтовую пространственную форму [4–6]. Подобные режимы горения дуги во внешнем аксиальном магнитном поле имеют большое прикладное значение и вызывают научный интерес [7–10]. В частности, в теоретических работах [11–14] в рамках нестационарной трехмерной математической модели в приближении частичного локального термодинамического равновесия плазмы предложен алгоритм численной реализации винтовой формы электрической дуги. Указанный алгоритм основан на применении в итерационном процессе схемного аналога флуктуаций температуры электронов.

Вместе с тем известно, что численные методы обладают рядом особенностей по сравнению с аналитическими методами решения дифференциальных уравнений. Так, например, результаты численного расчета могут зависеть от величины сеточного шага Δ разностной задачи [14–17]. Известны примеры, когда для различных значений сеточного шага получали качественно различные результаты расчёта.

На рисунке 1 показан пример [16] расчета течения изотермической жидкости в каверне в виде изолиний функции тока ψ . Расчеты проведены при различных значениях безразмерного сеточного шага: $\Delta = 1$ и вдвое меньшем значении $\Delta = 0,5$, при этом количество узлов сеточной области составляло (20×17) и (39×33) соответственно. Из рисунка видно, что при более крупном сеточном шаге $\Delta = 1$ в каверне наблюдаются основной и вторичный вихрь в нижней части каверны. Однако на более мелкой сетке шагом $\Delta = 0,5$ вторичный вихрь практически исчезает, смещаясь в нижний правый угол каверны. Теперь всю область каверны занимает основной вихрь.

На рисунке 2 представлена расчетная форма столба дуги в отсутствие ВАМП ($H^{Ext} = 0$) и при его наличии величиной $H^{Ext} = 5$ кА/м [13]. Результаты приведены для открытой электрической дуги постоянного тока межэлектродным расстоянием $L = 50$ мм, силой тока $I = 40$ А на равномерной сетке шагом $\Delta = 0,5$ мм.

Из рисунка 2а видно, что в отсутствие внешнего аксиального магнитного поля столб дуги обладает цилиндрической симметрией.

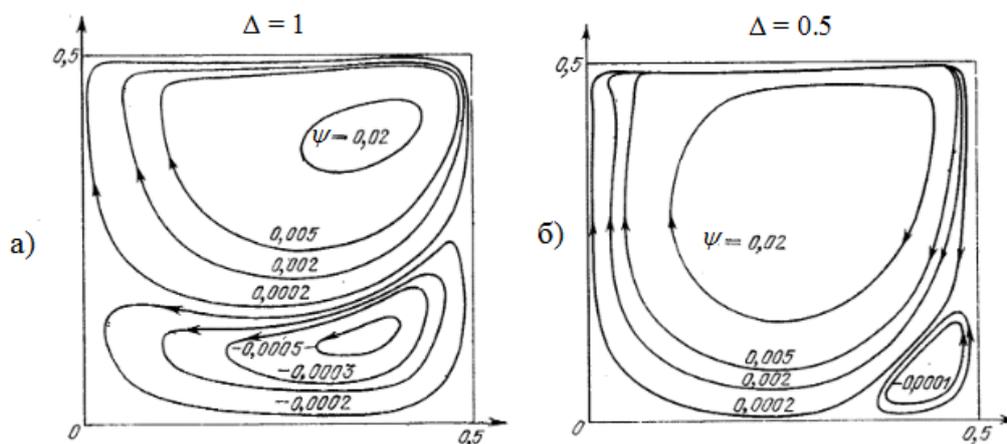


Рисунок 1– Расчетная картина течения изотермической жидкости в каверне при различных значениях сеточного шага: а) – $\Delta = 1$, б) – $\Delta = 0,5$ [16]

Однако при наличии внешнего аксиального магнитного поля H^{Ext} цилиндрическая симметрия столба дуги нарушается, и в некоторый момент времени столб дуги принимает четко выраженную винтовую пространственную форму (рис.2б).

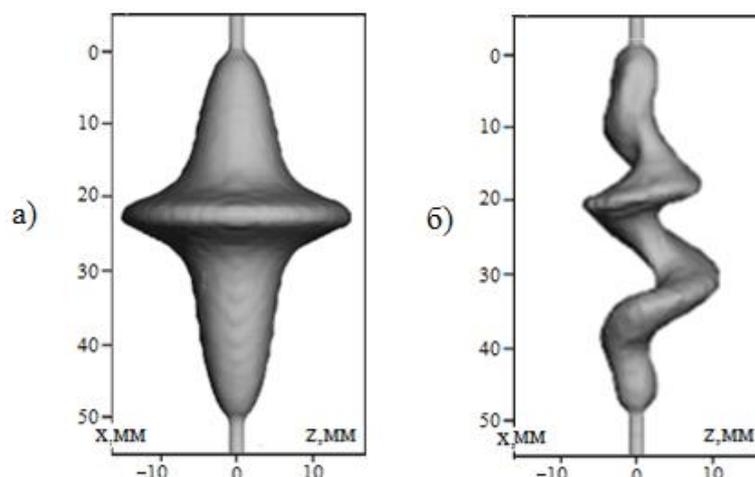


Рисунок 2 – а) расчетная форма столба дуги в отсутствие внешнего аксиального магнитного поля $H^{Ext} = 0$, б) $H^{Ext} = 5$ кА/м [13]

Правомерным является следующий вопрос – будет ли формироваться винтовая пространственная форма дуги при более мелком по сравнению с $\Delta = 0,5$ мм сеточном шаге, например, при значениях $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Сказанное выше таким образом обуславливает необходимость тестирования вычислительного алгоритма и исследования влияния сеточного шага на формирование винтовой формы дуги.

В работах [11–14] приведены результаты расчетов винтовой формы дуги на разностной сетке с постоянным и одинаковым шагом $\Delta = 0,5$ мм во всех направлениях. Следует сказать, что величина сеточного шага $\Delta = 0,5$ мм для указанных значений межэлектродного расстояния является достаточно большой, т.е. сетка является грубой. Такой грубый сеточный шаг является вынужденной мерой и обусловлен ограниченными возможностями вычислительной техники при решении трёхмерных нестационарных задач, которые требуют большого числа сеточных узлов.

Так, например, для задач [11–14] наибольшее число узловых точек расчетной области в направлениях осей (x, y, z) составляет соответственно $n_x = 140$, $n_y = 120$, $n_z = 120$. Таким образом, общее число узловых точек составляет $N = 140 \cdot 120 \cdot 120 \approx 2 \cdot 10^6$.

При этом необходимое время вычислений для получения результата нестационарной задачи достигает нескольких сотен часов. И уменьшение сеточного шага, например, в два раза по трём направлениям декартовой системы координат (x, y, z) влечёт за собой увеличение количества сеточных узлов в $2^3 = 8$ раз, т.е. почти на порядок. Соответственно это время, необходимое для проведения расчёта, значительно возрастает – до нескольких тысяч часов.

Очевидно, что проведение численных исследований в этом случае является практически нереальным. По этой причине в настоящее время приходится, во-первых, использовать достаточно грубый сеточный шаг $\Delta = 0,5$ мм и, во-вторых, ограничиваться общим числом узловых точек расчетной области около $N \approx 2 \cdot 10^6$.

Отметим, что вычисления выполняются на персональном компьютере с характеристиками CPU Intel i7, 3.2 GHz, 4×Cores, DDR 8 GB.

В свете сказанного выше следует убедиться, что численная реализация винтовой пространственной формы дуги [11–14] обусловлена не относительно грубым сеточным шагом $\Delta = 0,5$ мм, а формируется в результате воздействия именно схемного аналога флуктуаций. Необходимо показать, что винтовая форма дуги может быть получена и на более мелком сеточном шаге, например $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. При этом внешние параметры задачи L , I и H^{Ext} могут быть как одинаковыми, так и различными.

Подчеркнём, что целью работы является получение численного решения винтовой формы дуги при значениях сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Подробное обсуждение физики процессов выходит за рамки статьи и не проводится.

В настоящей работе приведены результаты тестирования вычислительного алгоритма [11–14] при значениях сеточного шага $\Delta = 0,2$ и $0,1$ мм. Сеточный шаг принят одинаковым по координатам (x, y, z) .

Поясним выбор численных значений величины межэлектродного расстояния L , силы тока I и внешнего магнитного поля H^{Ext} . Как уже отмечалось выше, для получения численного результата нестационарной задачи за реальное время общее число узловых точек расчетной области не должно значительно превышать $N \approx 2 \cdot 10^6$.

Для сеточного шага $\Delta = 0,2$ мм использовалась расчётная область с числом узловых точек $140 \cdot 120 \cdot 120$ по координатам (x, y, z) соответственно. Таким образом, протяженность расчетной области в направлении координатной оси x будет равна $n_x \cdot \Delta = 140 \cdot 0,2$ мм = 28 мм. С учётом длины катода $l_c = 4$ мм и анода $l_a = 4$ мм (рис.1) межэлектродное расстояние задаётся $L = 20$ мм. Задавать межэлектродное расстояние L значительно больше в данном случае не представляется возможным из-за ограниченных ресурсов компьютера. Радиальные размеры расчётной области в направлениях z, y также ограничены и составляют $n_z \cdot \Delta = n_y \cdot \Delta = 120 \cdot 0,2$ мм = 24 мм.

Для такой сравнительно короткой дуги и небольшими радиальными размерами следует задавать сравнительно небольшое значение силы тока. В самом деле, при больших токах $I > 50$ А собственные электромагнитные силы дуги в результате пинч-эффекта будут формировать высокоскоростные ($u > 100$ м/с) потоки плазмы со стороны катода и анода [1-4]. Потоки плазмы способствуют устойчивости столба дуги, и столб дуги будет слабо реагировать на воздействие ВАМП. Как следствие, винтовая форма дуги будет весьма незначительной. Кроме этого, вследствие джоулева тепловыделения радиальные размеры столба дуги будут достаточно большими, соизмеримыми с размерами расчетной области. Т.е. столб дуги, образно говоря, не поместится в расчетную область. По этим причинам для короткой дуги следует задавать сравнительно небольшое значение силы тока.

Из сказанного следует, что для сеточного шага $\Delta = 0,2$ мм рассчитать характеристики дуги при значениях параметров $L = 50$ мм, $I = 40$ А, как было сделано в работах [11–14] для $\Delta = 0,5$ мм, в настоящее время не представляется возможным. Этого не позволяют сделать ограниченные возможности компьютерной техники.

Таким образом, предварительные тестовые расчёты показали, что при сеточном шаге $\Delta = 0,2$ мм для реализации винтовой формы дуги с межэлектродным расстоянием $L = 20$ мм силу тока следует задавать в диапазоне $I = 20 \div 30$ А.

Величина внешнего аксиального магнитного поля H^{Ext} также выбирается по результатам предварительных расчётов из следующих требований. Величина H^{Ext} должна быть достаточно большой для формирования винтовой формы дуги, но не настолько большой, чтобы вызывать разрушение столба дуги на начальном интервале времени. Предварительные расчёты показали, что при указанных выше параметрах L и I для реализации винтовой формы дуги величина H^{Ext} должна составлять около 10 кА/м.

Итак, при сеточном шаге $\Delta = 0,2$ мм можно задавать примерно следующие значения внешних регулируемых параметров дуги: $L = 20$ мм, $I = 20 \div 30$ А и $H^{Ext} = 10$ кА/м. Заметим, что указанные значения параметров дуги L , I и H^{Ext} не являются строго обязательными, а только лишь ориентировочными для проведения расчётов.

Из таких же изложенных выше соображений задаются внешние параметры дуги при сеточном шаге $\Delta = 0,1$ мм, для которого расчеты выполнены при следующих значениях: $L = 10$ и 15 мм, $I = 15$ А и $H^{Ext} = 10$ кА/м.

Необходимо сказать, что при значениях сеточного шага $\Delta = 0,2$ и $0,1$ мм размеры расчетной области являются недостаточно протяженными. Так, для значения $\Delta = 0,1$ мм при числе узловых точек в поперечных направлениях $n_y = 120$ и $n_z = 120$ размер расчетной области составляет $D = n_z \cdot \Delta = n_y \cdot \Delta = 120 \cdot 0,1$ мм = 12 мм. Эта величина D соизмерима с межэлектродным расстоянием $L = 10 \div 15$ мм.

Вместе с тем из теории численных методов [2, 15–18] известно, что боковую границу расчетной области следует располагать на достаточном удалении от высокотемпературного столба открытой дуги. Это обусловлено тем, чтобы на боковой границе выполнялись условия гладкого сопряжения характеристик дуги с характеристиками окружающей среды. Вычислительная практика показывает, что величина D должна быть примерно в 2 – 3 больше межэлектродного расстояния L . Но при значениях $\Delta = 0,2$ и $0,1$ мм это условие выполняется недостаточно строго, и поэтому получить решение на достаточно большом временном интервале времени не представляется возможным. Как показали тестовые расчеты, начиная с некоторого момента времени поперечные размеры столба дуги превышают размеры расчетной области. В этих случаях расчет останавливался. По этой причине результаты выполненных расчетов носят в большей степени модельный характер.

Отметим, что настоящая работа является продолжением исследований [19], где были представлены результаты расчетов при других значениях внешних параметров.

Математическая модель и метод численного решения уравнений. Рассчитывается открытая электрическая дуга постоянного тока I , межэлектродным расстоянием L , горящая в аргоне при атмосферном давлении. Дуга горит в однородном внешнем аксиальном магнитном поле H^{Ext} . Нестационарная трехмерная система МГД-уравнений электрической дуги в приближении модели частичного локального термодинамического равновесия плазмы имеет вид [2, 11]:

уравнение непрерывности газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение непрерывности газа электронов

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \operatorname{div}(N_e \mathbf{V}_e) = R_e, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии газа электронов

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} k T_e N_e \right) + \operatorname{div} \left(\frac{5}{2} k T_e N_e \mathbf{V}_e \right) = \operatorname{div}(\lambda_e \operatorname{grad} T_e) + \mathbf{j}^2 / \sigma - \psi - B(T_e - T) - U_i R_e, \quad (3)$$

уравнение баланса энергии газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} k T (N_i + N_a) + \operatorname{div} \left(\frac{5}{2} k T (N_i + N_a) \mathbf{V} \right) = [\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + B(T_e - T)], \quad (4)$$

уравнения баланса импульса газа вдоль осей координат x, y, z

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} u) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_x + s_x + (\rho - \rho_\infty) \mathbf{g}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} v) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_y + s_y, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V} w) = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_z + s_z, \quad (7)$$

уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad (8)$$

закон Ома в обобщенной форме

$$\mu_0 (\mathbf{V}_e \times \mathbf{H}) + \mathbf{E} = \mathbf{j} / \sigma + (\mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H}) - \operatorname{grad} P_e) / q_e N_e, \quad (9)$$

закон Дальтона

$$P/kT = N_i + N_a + N_e T_e / T. \quad (10)$$

В уравнениях (1–10) использованы общепринятые обозначения. Принято, что дуговая плазма является однократно ионизованной, квазинейтральной, течение ламинарное, дозвуковое, излучение объемное; приэлектродные процессы не рассматриваются, катод и анод являются охлаждаемыми и неплавящимися.

Электромагнитная часть задачи решается в переменных φ, \mathbf{A} , где φ – скалярный потенциал электрического поля $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$, \mathbf{A} – векторный потенциал магнитного поля, связанный с \mathbf{H} соотношением $\operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{H}$.

Коэффициенты переноса и теплофизические свойства неравновесной аргоновой плазмы рассчитываются в соответствии с методикой [2].

Система уравнений (1–10) путём преобразований приводится к обобщенному дифференциальному уравнению [17]. Численное решение обобщенного уравнения проводится методом контрольного объема на основе конечных разностей. Динамические переменные (скорость и давление) рассчитываются по алгоритму SIMPLE'R [17]. Полученная система алгебраических уравнений решается итерационным методом Зейделя–Гаусса. Используется неявная разностная схема, временной шаг принят равным $\tau = 10^{-4}$ с.

Граничные и начальные условия. Для рассчитываемых переменных граничные условия задаются по периметру прямоугольной расчетной области (рис. 1).

На боковых границах $ABCD, EFGH, DHGC, AEFB, AEHD$ и $BFGC$ расчетной области значения температуры и концентрации электронов равны значениям для «холодного» не ионизованного газа: $T_e = T_e^{\min} = 3$ кК, $N_e = N_e^{\min} = 10^{17}$ м⁻³. Температура тяжелых частиц равна температуре окружающего газа $T = 300$ К.

При отсутствии электрического тока потенциал электрического поля φ рассчитывается из условия $\partial\varphi/\partial\mathbf{n} = 0$, где \mathbf{n} – нормаль к поверхности границы.

На внешней токоведущей торцевой поверхности катода S_c и анода S_a потенциал электрического поля φ рассчитывается из условия протекания электрического тока I по нормали к поверхности. Такое же условие используется для φ на границе «катод–плазма». Вне катода и анода электрический ток отсутствует.

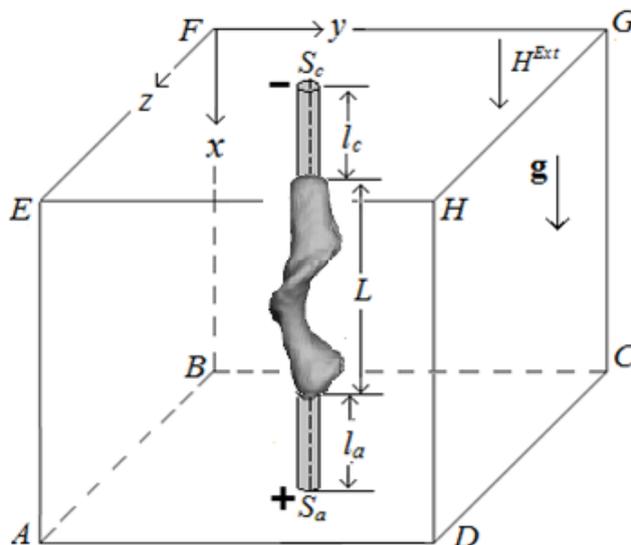


Рисунок 3 – Схема расчетной области в декартовых координатах (x, y, z)

Отметим, что в математической модели направлением электрического тока является направление движения электронов от катода к аноду.

Компоненты векторного потенциала A_x, A_y, A_z магнитного поля определяются из условия равенства нулю первой производной $\partial\mathbf{A}/\partial\mathbf{n} = 0$ по нормали к границе.

Давление P полагается равным относительному значению $P = 1$ Па. Компоненты скорости u, v, w определяются из условия равенства нулю $\partial^2\mathbf{V}/\partial\mathbf{n}^2 = 0$.

Начальные условия задаются в некоторый условный момент времени $t = 0$. В модели принято, что в начальный момент между электродами существует высокотемпературная ($T = 9$ кК) зона с неподвижным газом в форме цилиндра.

Для численной реализации винтовой формы дуги в итерационном процессе применяется схемный аналог флуктуаций температуры электронов плазмы [11–14].

Анализ результатов расчета. Сеточный шаг $\Delta = 0,1$ мм. Выполнен расчет открытой электрической дуги при значении сеточного шага $\Delta = 0,1$ мм и внешних параметрах разряда $I = 15$ А, $L = 10$ мм, $H^{Ext} = 10$ кА/м, диаметр электродов принят равным $d = 0,2$ мм. Число узловых точек в направлениях координат (x, y, z) составляет $n_x=140, n_y = n_z=120$. Напомним, что выбор численных значений внешних параметров разряда сделан согласно соображениям, рассмотренным выше (см. введение).

Поясним, что на представленных рисунках форма столба электрической дуги является 3D-поверхностью, ограниченной изотермой $T = 3$ кК. Направление обзора столба дуги перпендикулярно плоскости $x-z$, отсчет в направлении оси x ведется от поверхности катода (–), отсчет в направлениях осей y, z ведется от центральной оси. Графическая визуализация результатов расчетов сделана на основе приложения *Wolfram Mathematica 11*.

На рисунке 2 приведена эволюция пространственной формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 7 \div 47$ мс. Вначале, до выхода расчетных характеристик дуги на стационарное распределение к моменту времени $t = 7$ мс, численный расчет выполняется без внешнего магнитного поля, т.е. принято $H^{Ext} = 0$.

Затем, начиная с момента времени $t = 7$ мс, задается внешнее аксиальное магнитное поле величиной $H^{Ext} = 10$ кА/м. Анализ результатов показывает, что уже через несколько миллисекунд цилиндрическая симметрия столба дуги нарушается. Начиная примерно с момента времени $t > 10$ мс, столб дуги приобретает чётко выраженную винтовую форму.

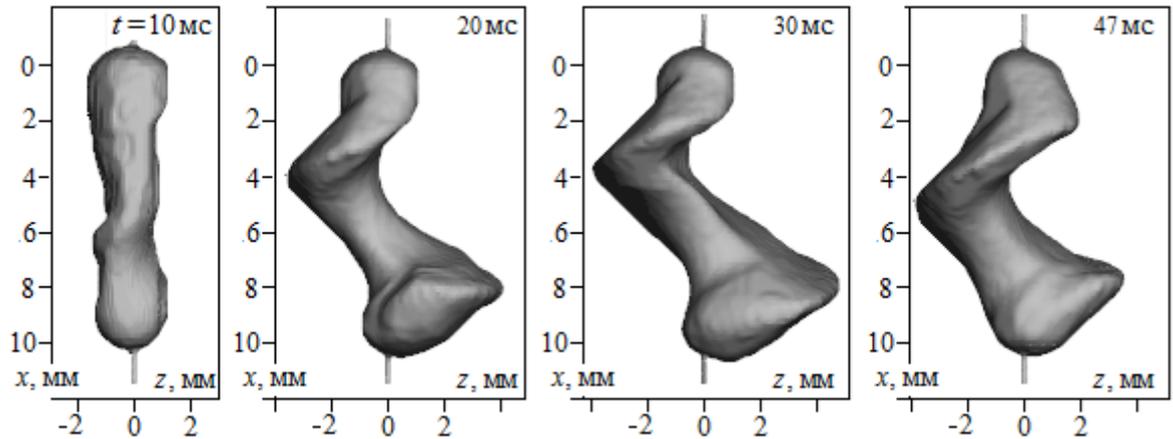


Рисунок 4 – Эволюция формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 10 \div 47$ мс.

$$\Delta = 0,1 \text{ мм}, L = 10 \text{ мм}, I = 15 \text{ А}, H^{Ext} = 10 \text{ кА/м}$$

Также выполнен расчет для дуги при большем значении межэлектродного расстояния $L = 15$ мм. Число узловых точек в направлениях координат (x, y, z) составляет $n_x=190, n_y = n_z=110$. Остальные внешние параметры разряда остаются неизменными. До выхода расчетных характеристик дуги на стационарное распределение к моменту времени $t = 10$ мс численный расчет выполняется без внешнего магнитного поля, затем налагается ВАМП величиной $H^{Ext} = 10$ кА/м. Расчетная эволюция формы столба дуги показана на рисунке 3.

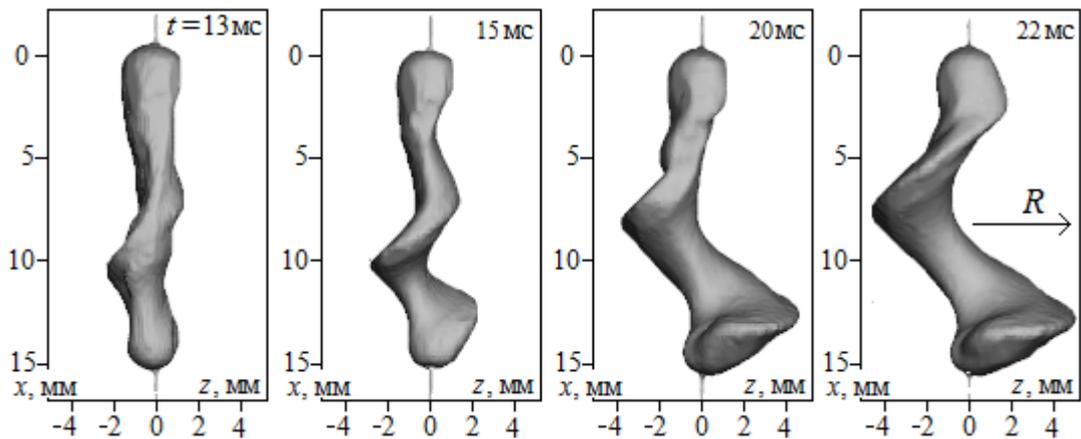


Рисунок 5 – Эволюция формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 13 \div 22$ мс.

$$\Delta = 0,1 \text{ мм}, L = 15 \text{ мм}, I = 15 \text{ А}, H^{Ext} = 10 \text{ кА/м}. R \text{ – внешний радиус винтовой дуги}$$

Как и в предыдущем варианте расчёта, видно, что столб дуги во внешнем аксиальном магнитном поле также теряет цилиндрическую симметрию и принимает винтовую пространственную форму. Таким образом, анализ результатов показывает, что при соответствующем выборе внешних параметров дуги численное решение для винтовой формы столба дуги реализуется при величине сеточного шага $\Delta = 0,1$ мм.

Сравнение результатов (см. рис.2, 3) показывает, что эволюция расчетных характеристик соответствует физическим закономерностям дуги, горящей во внешнем аксиальном магнитном поле.

В самом деле, известно [1,4–6], что в результате воздействия ВАМП электрическая дуга с большим межэлектродным расстоянием является менее устойчивой по сравнению с более короткой дугой при прочих одинаковых параметрах.

Действительно, анализ результатов расчета показывает, что, в отличие от дуги при значении $L = 10$ мм (см. рис.2), дуга при значении $L = 15$ мм подвергается большей деформации под воздействием ВАМП. Так, начиная с момента времени $t > 22$ мс, радиус R винтовой дуги возрастает настолько, что столб дуги уже выходит за боковые границы расчетной области (см. рис.3). В этой связи численный расчет был остановлен. О причинах недостаточного радиального размера расчетной области для сравнительно малых значений сеточного шага уже было сказано выше (см. введение). При этом более короткая дуга при значении $L = 10$ мм остаётся в пределах расчетной области на протяжении всего времени расчёта (см. рис.2).

Результаты расчета при сеточном шаге $\Delta = 0,2$ мм. Выполнен расчет открытой электрической дуги для значений $I = 20$ А, $L = 20$ мм, $H^{Ext} = 10$ кА/м. Диаметр электродов принят равным $d_e = 0,4$ мм. Число узловых точек в направлениях координат (x , y , z) соответственно составляет $n_x=140$, $n_y = n_z=120$.

С начала процесса вычислений, до выхода расчетных характеристик дуги на стационарное распределение к моменту времени $t = 12$ мс численный расчет выполняется без внешнего магнитного поля, т.е. принято $H^{Ext} = 0$. Затем, начиная с момента времени $t = 12$ мс, задается внешнее аксиальное магнитное поле величиной $H^{Ext} = 10$ кА/м. На рисунке 4 показана эволюция пространственной формы столба дуги на начальном интервале времени $\Delta t = 20 \div 35$ мс при наложении ВАМП.

Анализ показывает, что с момента времени примерно $t > 20$ мс столб электрической дуги отклоняется от цилиндрической симметрии и принимает винтовую пространственную форму. Затем, с момента времени $t > 35$ мс, столб дуги выходит за радиальные границы расчетной области, и численный расчет был остановлен.

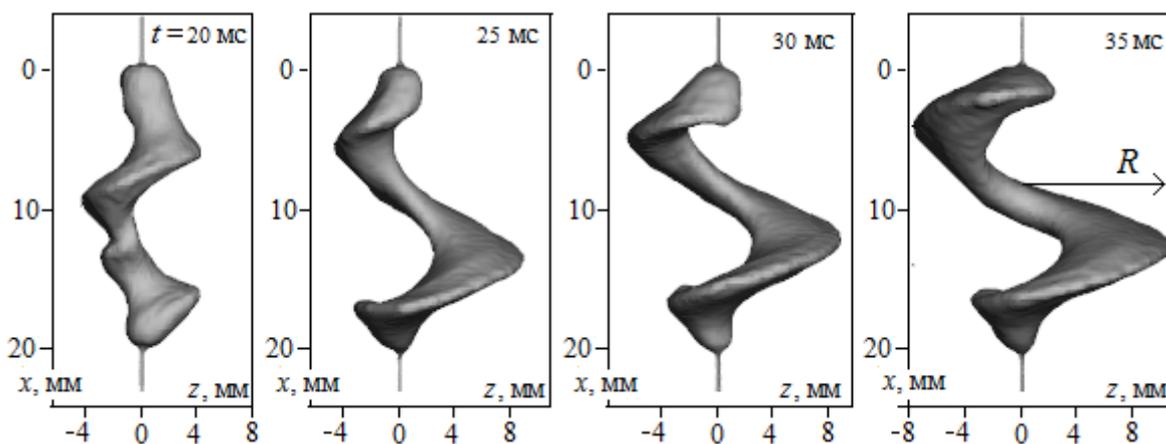


Рисунок 6 – Эволюция формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 20 \div 35$ мс.

$$\Delta = 0,2 \text{ мм}, L = 20 \text{ мм}, I = 20 \text{ А}, H^{Ext} = 10 \text{ кА/м}$$

Как отмечалось выше, значения внешних параметров дуги L , I и H^{Ext} являются в определенной степени ориентировочными. То есть допустимо их сравнительно небольшое изменение. В этой связи представляет интерес провести дополнительные расчёты с другими значениями внешних параметров дуги и убедиться, что полученное решение для винтовой формы дуги не является случайным.

На рисунке 5 показаны результаты при следующих значениях внешних параметров дуги: $L = 20$ мм, $I = 30$ А, $H^{Ext} = 10$ кА/м, $d_e = 0,4$ мм. По сравнению с предыдущим вариантом (см. рис. 4) значение силы тока I увеличено от 20 до 30 А.

До выхода расчетных характеристик дуги на стационарное распределение к моменту времени $t = 7$ мс численный расчет выполняется без внешнего магнитного поля, затем налагается ВАМП величиной $H^{Ext} = 10$ кА/м.

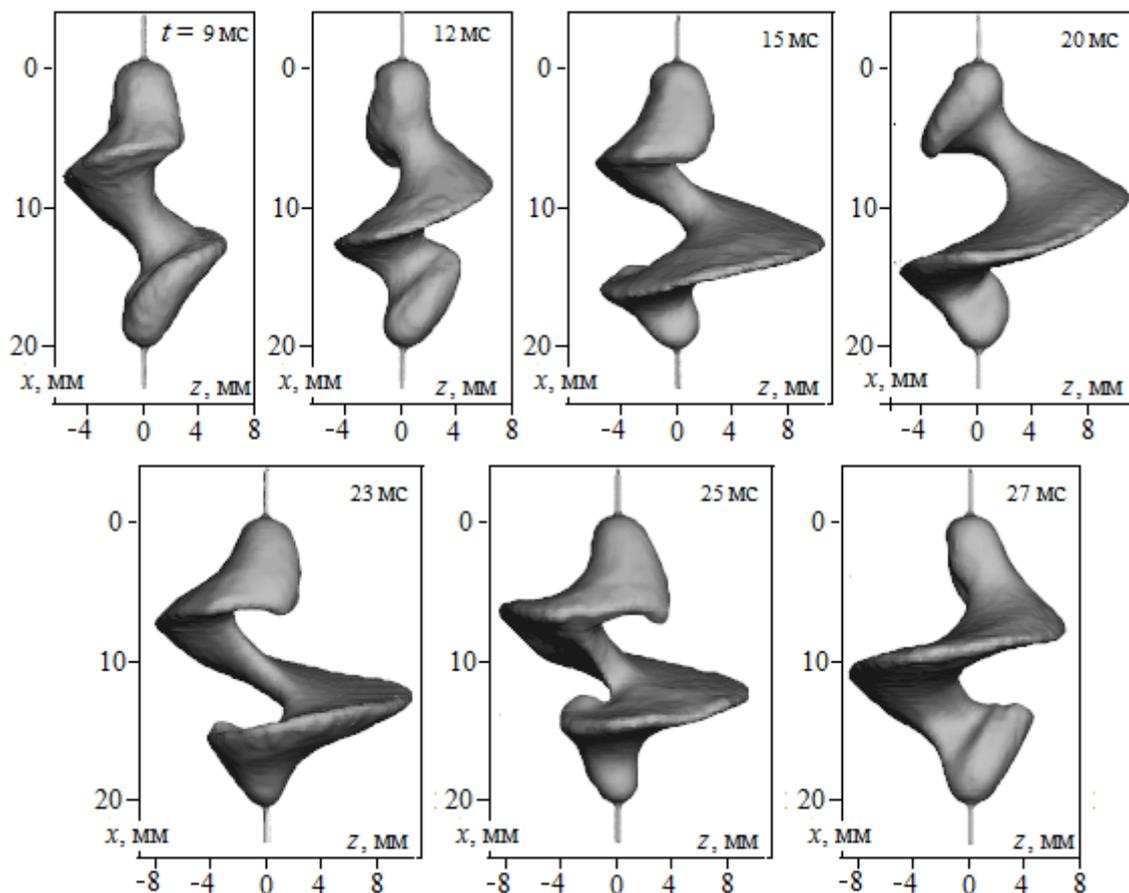


Рисунок 7 – Эволюция пространственной формы столба дуги.

$$\Delta = 0,2 \text{ мм}, L = 20 \text{ мм}, I = 30 \text{ А}, H^{Ext} = 10 \text{ кА/м}$$

Из рисунка 5 видно, что столб дуги также отклоняется от цилиндрической симметрии и принимает винтовую пространственную форму. Отметим, что в данном случае при $I = 30$ А столб дуги не выходит за боковые границы расчетной области, как это наблюдалось при $I = 20$ А. Это обусловлено тем, что с увеличением силы тока возрастает интенсивность потоков плазмы со стороны электродов, что способствует пространственной устойчивости столба дуги. Как следствие, столб дуги меньше отклоняется от центральной оси.

Таким образом, при соответствующем выборе внешних параметров дуги численное решение для винтовой формы столба дуги реализуется при величине сеточного шага $\Delta = 0,2$ мм. Анализ результатов расчётов при различных значениях сеточного шага $\Delta = 0,1, 0,2, 0,5$ мм показал, что если отключить воздействие схемного аналога флуктуаций температуры электронов (11), тогда винтовая форма дуги не формируется. Следовательно, численная реализация винтовой формы дуги обусловлена именно воздействием схемного аналога флуктуаций температуры электронов.

Заключение. Для электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле выполнены численные расчеты при значениях сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Расчеты проведены в диапазоне межэлектродного расстояния $L = 10 \div 20$ мм, силы тока $I = 15 \div 30$ А и внешнего аксиального магнитного поля $H^{Ex} = 10$ кА/м. Для значений сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм численно реализована винтовая форма столба дуги.

По сравнению с результатами расчётов при значении сеточного шага $\Delta = 0,5$ мм, для меньших значений $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм какие-либо «схемные» эффекты, обусловленные малой величиной сеточного шага, не выявлены.

Таким образом, численная реализация винтовой формы дуги не зависит от величины сеточного шага в диапазоне значений $\Delta = 0,1 \div 0,5$ мм. Винтовая форма дуги формируется в результате воздействия именно схемного аналога флуктуаций температуры электронов дуговой плазмы. Проведение численных расчетов [11–14] при значении сеточного шага $\Delta = 0,5$ мм вполне правомерно и позволяет получить физически достоверный результат.

Список литературы

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Иностранная литература, 1961. – 370 с.
2. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 1. Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 374 с.
3. Лебедев А.Д., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 7. Сильноточный дуговой разряд в магнитном поле. – Новосибирск: Наука, 1992. – 267 с.
4. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, 1978. – 160 с.
5. Недоспасов А.В. Токово-конвективная неустойчивость газоразрядной плазмы // УФН. – 1975. – Т.16. – №4. – С.643– 661.
6. Ментель Ю. Магнитная неустойчивость электрической дуги // Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1977. – 182 с.
7. Асиновский Э.И., Кузьмин А.К., Пахомов Е.П. Измерение геометрических параметров винтовой дуги // ТВТ. – 1980. – Т. 18. – № 1. – С. 9–18.
8. Синкевич О.А. Нелинейная теория винтовой неустойчивости электрической дуги во внешнем магнитном поле // ДАН. 1985. – Т. 280. – № 1. – С. 99–101.
9. Sinkevich O.A. Instabilities, waves, and nonequilibrium structures in a dense low-frequency plasma, High Temperature, 2013. – V. 51. – № 3. – P. 306.
10. Глинов А. П., Головин А. П., Шалеев К. В. Влияние внешнего магнитного поля на устойчивость протяженного дугового разряда и формирование многоканальных токовых структур // Прикладная физика. – 2018. – № 2. – С. 21– 28.
11. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – № 5. – С. 661– 668.
12. I.R. Urusova, T.E Urusova «Evolution of space open electric arc burning in the external axial magnetic field», Physics of Plasmas 25, 063511 (2018);
13. Урусов Р.М., Урусова И.Р. О механизмах формирования винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57. – № 3. – С. 328– 337.
14. R. M. Urusov and I. R. Urusova Shunting the electric arc helical spiral turns (numerical simulation) // Phys. Plasmas 27, 103510 (2020).
15. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
16. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: 1983. – 616 с.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 146 с.

18. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепломассообмена. – М.: Наука. 1984. – 288 с.

19. Компьютерное моделирование винтовой формы электрической дуги при различных значениях сеточного шага / Т. Э. Урусова, И. Р. Урусова, Э. М. Бакирова, А. Н. Сапаралиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2(41). – С. 4-10. – EDN ZWYMXX.

УДК 631.6. (575.2)

Аскалиева Гулзада Орозобаевна, к.т.н., e-mail: 87guzya@mail.ru

Пресняков Константин Александрович, д.т.н., с.н.с.,

Керимкулова Гүлсаат Кубатбековна, к.ф.-м.н., e-mail: gulsaat@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Определен спектр частот пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды. Достоинством предложенного метода является конкретизация интервала низких частот пульсаций динамического давления, что позволяет составить рациональную схему измерений указанных пульсаций в открытом турбулентном потоке воды

Ключевые слова: спектр частот пульсаций динамического давления, удельный расход пульсаций.

Введение. В литературе известен метод определения высокочастотного интервала спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды [1], заключающийся в измерении дисперсии вертикальной компоненты скорости воды и вычислении искомой частоты по формуле

$$V_1 = \frac{\sigma_v}{\lambda}, \quad (1)$$

где σ_v – дисперсия вертикальной компоненты скорости воды, м/с, λ – характерный размер высокочастотного вихря Тейлора, м, и отличающийся тем, что измеряют пульсации скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды, оценивают характерный размер вихря Тейлора с учетом ограничения его нахождения в указанной выше зоне, оценивают размеры характерных областей течения в придонной части турбулентного потока воды; вычисляют среднеквадратичное значение пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в упомянутой зоне; а также вычисляют на основе проведенных измерений значение диссипации механической энергии в теплоту в пределах ламинарного пограничного слоя воды; оценивают нижний предел искомого интервала частоты на границе турбулентного и ламинарного пограничных слоев и верхний предел указанного интервала частоты на верхней границе нижнего мономолекулярного слоя воды, находящегося в непосредственном контакте с дном водотока; составляют высокочастотный интервал спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в ламинарном пограничном слое; сравнивают теоретические и экспериментальные значения упомянутого интервала частот и делают вывод о степени сравнимости полученных значений частоты.

Основным недостатком этого метода является привязка его к размерам вихря Тэйлора, который ни рассчитать теоретически, ни определить экспериментально невозможно. Кроме того, рассматриваемый метод распространяется на область ламинарного и турбулентного пограничного слоев потока воды.

Задачи исследований – определить спектр частот пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды.

Решение поставленной задачи. Метод определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды [2] заключается в выборе области измерений, измерении в указанной области пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, – в котором в качестве области измерений полагают в целом турбулентный поток воды, измеряют в указанной области распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды $P'_d(\tilde{y})$ (где

\tilde{y} – относительная вертикальная координата), определяют удельный расход упомянутых пульсаций $M_{P'_d}$, а частоту пульсаций динамического давления находят из отношения первого ко второму.

Запишем в общем виде выражение для пульсаций динамического давления

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot (u(\tilde{y}) \cdot u'(\tilde{y}) + (v'(\tilde{y}))^2) \quad (2)$$

где P'_d – пульсаций динамического давления, Па; ρ – плотность воды, кг/м³; $u(\tilde{y})$ – распределение продольной компоненты скорости воды, м/с; $u'(\tilde{y})$ – распределение пульсаций продольной компоненты скорости воды, м/с; $v'(\tilde{y})^2$ – квадрат пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, м²/с² [3].

Для проведения конкретного анализа необходимо привлечь конкретное распределение продольной компоненты скорости воды по глубине потока и выражения для пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды:

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot (u(\tilde{y}) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})), \quad (3)$$

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot \left(u_m \cdot \left(1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (4)$$

где C – коэффициент Шези, м^{1/2}/с; $m_1 = 0,35 \cdot C + 3$ – размерный (м^{1/2}/с) параметр, зависящий от коэффициента Шези; \bar{u} – средняя скорость воды, м/с; u_* – динамическая скорость потока воды, м/с; u_m – максимальная скорость потока воды, м/с;

$\phi(\tilde{y}) = 0,25 + \left(\frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right)$ – координатная часть распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды по глубине потока; $\psi(\tilde{y}) = \frac{0,677 \cdot \tilde{y}}{\tilde{y} + 0,036} \cdot (\tilde{y}^2 - 2 \cdot \tilde{y} + 2)$ – координатная часть распределения пульсаций вертикальной компонент скорости по глубине потока.

Для дальнейшего анализа необходимо привлечь следующую гипотезу.

Распределение пульсаций динамического давления по глубине открытого бурного турбулентного потока воды содержит в неявной форме информацию о частотах указанных пульсаций.

Запишем выражение для удельного (на единицу ширины потока) расхода пульсаций продольной компоненты скорости воды

$$q_{u'} = \bar{u}' \cdot H, \quad (5)$$

где

$$\bar{u}' = 2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y}) d(\tilde{y}) = 2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\tilde{\Delta}}^1 \left(0,25 + \frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right) d(\tilde{y}), \quad (6)$$

$q_{u'}$ – м²/с.

Массовый удельный расход пульсаций продольной компоненты скорости в открытом бурном турбулентном потоке воды (или же удельный расход пульсаций динамического давления) будет иметь вид

$$M_{P'_d} = \rho \cdot \bar{u}' \cdot H, \quad (7)$$

$M_{P'_d}$ измеряется в кг/м³·с.

Разделим выражение для пульсаций динамического давления на удельный расход пульсаций динамического давления, получим в общем виде формулу для вычисления искомой частоты

$$\Omega = \frac{P'_d}{M_{P'_d}} = \frac{2 \cdot (u(\tilde{y}) \cdot u'(\tilde{y}) + (v'(\tilde{y}))^2)}{u' \cdot H}, \quad (8)$$

где Ω – круговая частота пульсаций динамического давления, Гц.

Для примера использования параболического профиля скорости воды указанная частота вычисляется по формуле

$$\Omega = \frac{2 \cdot \left(u_m \cdot \left(1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\Delta} \phi(\tilde{y}) d(\tilde{y}) \cdot H}. \quad (9)$$

На рисунке 1 приведены графики $P'_d = P'_d(\Omega)$ для опытов на каналах Туш и Меркенский [4], заметно, что пульсации динамического давления зависят от их частоты по линейному закону, где коэффициентом пропорциональности является удельный расход указанных пульсаций.

Интервал выявленных частот пульсаций динамического давления составляет совокупность значений от 17 до 55 Гц, причем максимальные значения указанной характеристики находятся в диапазоне от 24 до 55 Гц.

В безразмерном виде спектр пульсаций динамического давления представлен в таблице 1 и изображен на рисунке 2, откуда видно, что все точки, относящийся к рассмотренным объектам легли на одну прямую.

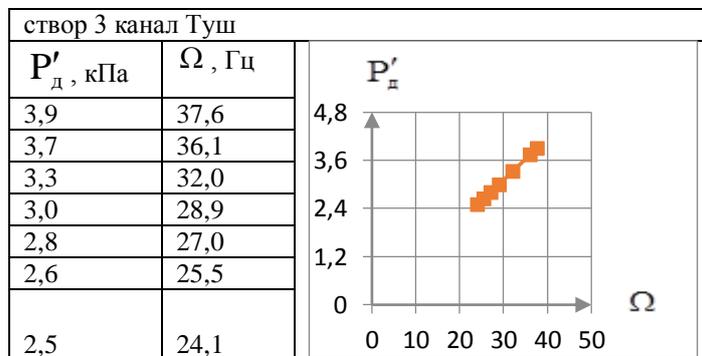


Рисунок 1 – Зависимость значений пульсаций динамического давления от их частоты в открытых бурных турбулентных потоках воды

Из гидродинамики известно [5], что крупномасштабные вихри располагаются в верхней части турбулентного потока воды, а мелкомасштабные – в придонной части его.

Таблица 1 – Низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытых бурных турбулентных потоках воды

канал Туш, створ 3		канал Туш, створ 13		канал Туш, створ 15		канал Туш, створ 25		канал Туш, створ 38		канал Меркенский, створ б		канал Меркенский, створ в	
\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,91	0,91	0,9	0,9
0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,86	0,86	0,87	0,87	0,85	0,85	0,84	0,84
0,77	0,77	0,78	0,78	0,79	0,79	0,78	0,78	0,79	0,79	0,8	0,8	0,79	0,79
0,72	0,72	0,74	0,74	0,74	0,74	0,72	0,72	0,74	0,74	0,76	0,76	0,75	0,75
0,68	0,68	0,7	0,7	0,7	0,7	0,68	0,68	0,7	0,7	0,72	0,72	0,71	0,71
0,64	0,64	0,66	0,66	0,66	0,66	0,64	0,64	0,66	0,66				

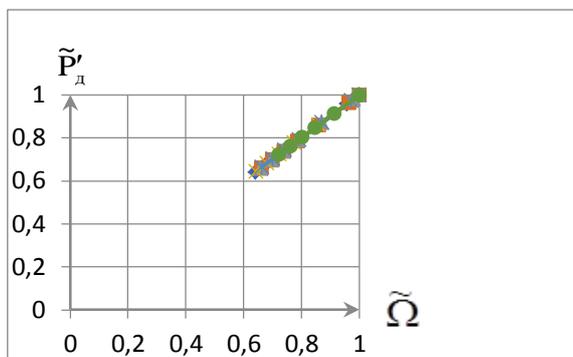


Рисунок 2 – Низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытых бурных турбулентных потоках воды

Соответственно этому, распределение продольной компоненты скорости по глубине турбулентного потока воды согласуется с указанным распределением вихрей, т.е. максимум продольной скорости наблюдается в приповерхностном слое, а ее минимальные значения в придонной его части [6].

Значения пульсаций продольной компоненты скорости воды изменяются с вертикальной координатой по кривой с максимумом в придонной части потока [7].

Подобное увеличение пульсационных характеристик по глубине турбулентного потока воды наблюдается и для пульсаций динамического давления [3], максимум которого выявлен на выступе шероховатости.

В упомянутой работе М.А. Великанова имеется графическое изображение частотного спектра пульсаций продольной компоненты скорости турбулентного потока воды [5, рис. 49, стр. 258], которое в схематичном виде представлено на рисунке 3.

$F(\Omega), \text{Гц}$

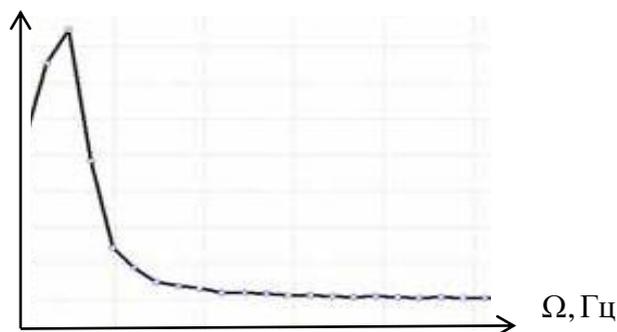


Рисунок 3 – Схематичное изображение частотного спектра пульсаций продольной компоненты скорости турбулентного потока воды (наподобие рисунка 49 из монографии М.А. Великанова [5, рис. 49, стр. 258]).

Указанный спектр состоит из восходящей и нисходящей ветвей, причем левая часть рассматриваемого спектра представляет собой прямую линию.

Сопоставление наших результатов (рис. 1) с упомянутым спектром М.А. Великанова позволяет заключить, что нами установлена низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытом бурном турбулентном потоке воды.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для случаев использования параболического профиля скорости воды, а также для применения пульсационных соотношений И.К. Никитина. Действительно, анализируя формулу частоты пульсаций динамического давления, можно заметить, что основные характеристики рассматриваемых объектов (динамическая скорость u_* и относительная шероховатость $\tilde{\Delta}$) входят в указанную формулу не равноправным образом, а именно: динамическая скорость, как можно показать, входит множителем как числитель, а также и в знаменатель, рассматриваемого выражения, а относительная шероховатость может иметь косвенное значение через нижний предел интеграл

$$\int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y})d(\tilde{y}).$$

Правда, в круглой скобке числителя после осуществленной операции с u_* , во втором члене остается динамическая скорость в первой степени. Но ее влияние на рассматриваемую величину, по сравнению с первым членом, где фигурирует продольная компонента скорости, достаточно слабо.

Оценка значений интеграла приводит к следующему результату (таблица 2). Значение указанного интеграла практически не зависит от относительной шероховатости (среднее значение его равно $0,56 \pm 0,01$)

Таблица 2 – Оценка значений интеграла

створ	$\tilde{\Delta}$	$\int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y})d(\tilde{y})$
канал Туш		
3, 25	0,020	0,560
13, 38	0,018	0,562
15	0,024	0,556
канал Меркенский		
б	0,009	0,572
в	0,010	0,571
среднее		$0,56 \pm 0,01$

Таким образом, показана независимость частоты пульсаций динамического давления от динамической скорости потока и относительной шероховатости его дна. Повторимся, что этот результат имеет место для применения параболического профиля скорости воды и пульсационных соотношений И. К. Никитина.

Метод определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды осуществляют следующим образом (рис. 4):

- ✓ выбирают области измерений (блок 1);
- ✓ измеряют в указанной области распределение пульсаций динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды (блок 2, 3);
- ✓ вычисляют удельной расход пульсаций динамического давления для рассматриваемых объектов (блок 4);
- ✓ определяют частоты пульсаций динамического давления путем деления первого на второе (блок 5);

- ✓ формируют частотный спектр пульсаций динамического давления (блок 6);
- ✓ сравнивают полученный спектр с частотным спектром пульсаций скорости турбулентного потока воды (блок 7);
- ✓ анализируют полученные результаты, что позволяет классифицировать установленный частотный спектр как низкочастотную часть спектра пульсаций динамического давления (блок 8).



Рисунок 4 – Структурная блок-схема метода определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды.

Заключение. Достоинством предложенного метода является конкретизация интервала низких частот пульсаций динамического давления, что позволяет составить рациональную схему измерений указанных пульсаций в открытом турбулентном потоке воды.

Литература

1. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О., Першакова Е.Ю. Способ определения высокочастотного интервала спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды / Патент КР №2197.–Бишкек: Кыргызпатент.–Бюллетень патентов и товарных знаков КР.–№3.– 31.03.2020. –10с.
2. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Способ определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды / Заявка №3756 от 29.04.2022 г.–Бишкек: Кыргызпатент.
3. Керимкулова, Г. К. Исследование пульсаций динамического давления в открытом бурном турбулентном потоке воды (на основе параболического профиля скорости воды) / Г. К. Керимкулова, К. А. Пресняков, Г. О. Аскалиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 61-71. – EDN IELPFZ.
4. Талмаза В.Ф., Романенко Г.Н. Распределение осредненных скоростей в бурных потоках // Вопросы водного хозяйства (гидротехника). – Фрунзе: Кыргызстан, 1972. – Вып. 26. – С. 99–109.
5. М.А.Великанов. Динамика русловых потоков, Т.1 Структура потока. М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954, 323 с.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
7. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области.– Киев: Изд-во АН УССР, 1963.

УДК 621.316.9.

¹ А.К. Асанов, asanov_ak@mail.ru

² Б.Ж. Джолдошбеков, bakyt.zholdubay.79@mail.ru

³ Н.К. Джусунбекова, nazika11612@mail.ru

⁴ М.К. Аркарчиева, arkarchieva@gmail.ru

^{1,3} Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

² ОАО «Национальная электрическая сеть Кыргызстана»

⁴ Нарынский государственный университет им. С. Нааматова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ (НА ПРИМЕРЕ НАРЫНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Сопротивление заземляющего устройства зависит от удельного сопротивления грунта, поэтому при расчетах проектирования и реконструкции по усилению заземляющих устройств необходимо учитывать структуру и слоистость грунтов, климатические условия региона. Статья содержит экспериментально-расчетные результаты влияния свойств грунтов на величину их удельных сопротивлений. На примере удельного электрического сопротивления грунта в местах расположения энергообъектов Нарынской области произведен расчет сопротивления вертикального заземлителя с учетом верхнего и эквивалентного сопротивления верхнего и нижнего слоев грунта. Определены погрешности расчетов при учете только верхнего слоя. Приведены графики зависимости вертикального заземлителя от его длины с учетом и без учета неоднородности земли и климатических условий Нарынской области. Показан сравнительный анализ применения различных вариантов вертикальных заземлителей.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление грунта, эквивалентное сопротивление грунта, заземляющее устройство, вертикальный заземлитель, климатический коэффициент, сопротивление растеканию заземляющего устройства, структура грунта.

Введение

Заземляющие устройства (ЗУ) электроустановок напряжением выше 1 кВ в сетях с эффективно заземленной нейтралью следует выполнять с соблюдением требований по обеспечению нормального функционирования электроустановки либо по обеспечению безопасности людей при замыкании токоведущих частей на землю, а также защиты электрооборудования от перенапряжений [1].

Согласно правилу устройства электроустановок (ПУЭ) [2], заземляющее устройство (ЗУ), отвечающее вышеперечисленным требованиям, его сопротивление, должно иметь в любое время года не более 0,5 Ом с учетом сопротивления естественных и искусственных заземлителей. Но в районах с большим удельным сопротивлением земли $\rho > 500$ Ом·м допускается повысить требуемые значения сопротивлений ЗУ в 0,002 раза.

Основным параметром для расчета сопротивления ЗУ является удельное электрическое сопротивление грунта. А оно в свою очередь зависит от состава грунта (глина, суглинок, супесь, песок, щебень, известняк и др.), размеров и плотности прилегания друг к другу его частиц, влажности и температуры, концентрации в нём растворимых химических веществ (солей, кислотных и щелочных остатков), а также влияния грунтовых вод. Сопротивление верхнего слоя грунта изменяется в зависимости от атмосферных и климатических условий: в зимний период времени промерзает, увеличивая сопротивление грунта, а с наступлением теплоты тает и увлажняет грунт, что является благоприятным условием для ЗУ, а летом может высыхать, что приводит к увеличению сопротивления грунта, что сказывается неблагоприятно для ЗУ.

В настоящей работе представлено исследование удельного сопротивления грунта на объектах электроэнергетики Нарынской области и их влияние на сопротивление ЗУ.

Обслуживание высоковольтных объектов электроэнергетики Нарынской области осуществляется Нарынским предприятием высоковольтных электрических сетей (НПВЭС). НПВЭС является структурным подразделением ОАО «Национальная электрическая сеть Кыргызстана».

На балансе НПВЭС находится одна подстанция (ПС) 220/110/10 кВ мощностью 250 МВА, 17 ПС 110/35/10 кВ суммарной мощностью более 275 МВА, ВЛ-110 кВ – 928 км, ВЛ-220 кВ – 145 км и ВЛ-500 кВ – 205,64 км [3].

В апреле 2022 года осуществили инструментальное обследование параметров электромагнитной обстановки и электрических характеристик грунтов ПС НПВЭС. Измерения производились на ПС: 220 кВ – «Ак-Кыя», 110 кВ – «Кочкор», «Чолпон», «Нарын-1», «Муз-Тор».

Обследуемые ПС расположены от 1830 м до 3200 м над уровнем моря (рис.1).

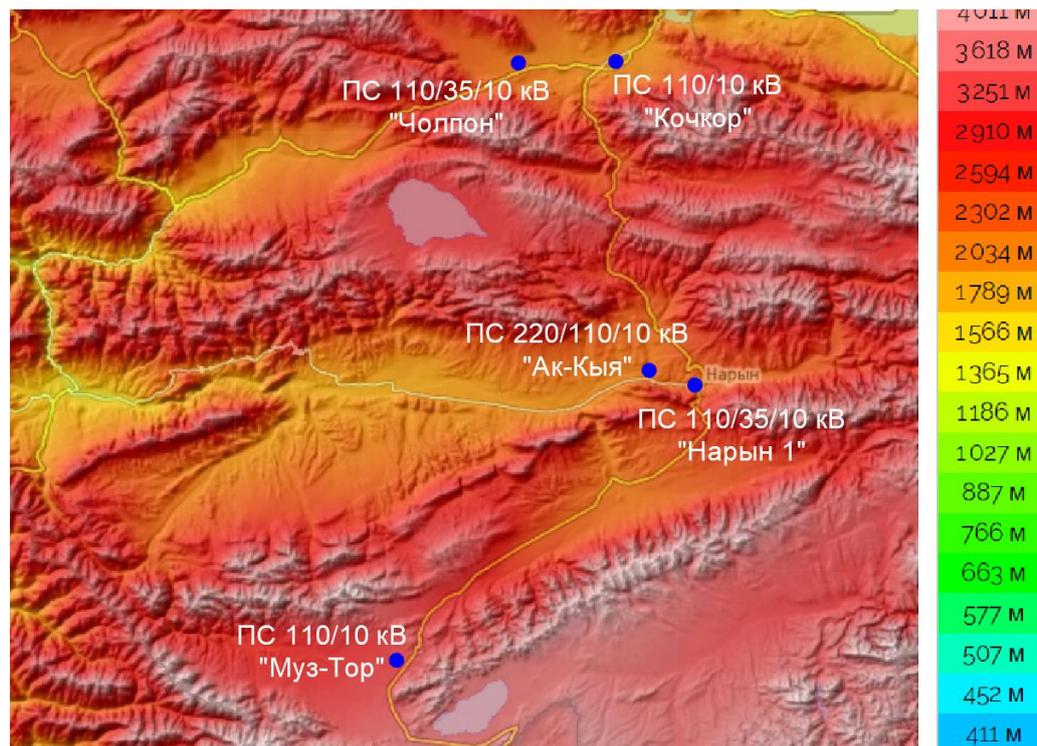


Рисунок 1 – Топографическое расположение исследуемых объектов Нарынской области

Измерения удельного сопротивления грунта проводились за пределами подстанции по методу вертикального электрического зондирования. Согласно результатам измерений и аппроксимации [4], а также по данным [1, 2, 4, 5] приняты параметры эквивалентной модели грунта, которые представлены в табл. 1.

Сопротивление растеканию измерялось с помощью классического метода «амперметра-вольтметра» интегрированным прибором MRU-120. Токовый и потенциальный зонды были вынесены за территорию ПС на расстояние порядка 3D (диагональ) метров соответственно. Измеренное сопротивление растеканию с учетом естественных заземлителей (система «трос–опора», брони кабелей и др.) сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Экспериментально-расчетные параметры ЗУ ПС

Электрические характеристики ПС		ПС 220кВ «Ак-Кыя»	ПС 110 кВ «Нарын-1»	ПС 110 кВ «Муз-Тор»	ПС 110 кВ «Кочкор»	ПС 110 кВ «Чолпон»
Характеристика грунта	$\rho_1, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	240	230	350	820	260

	$h_1, \text{ м}$	-	3	1,5	7	4
	$\rho_2, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	-	755	645	570	640
Сопротивления растеканию ЗУ $R_{\Sigma}, \text{ Ом}$	Измеренное	0,3*	0,59*	2,7*	0,37***	0,405***
	Расчетное	-	-	4,9**	-	-
Примечание: * - с учетом заземлителей системы «трос-опора»; ** - без учета системы «трос-опора», *** - по данным НПВЭС.						

В конфигурации ЗУ основным элементом являются вертикальные заземлители, так как их нижняя часть менее подвержена к климатическим изменениям. Горизонтальные и верхняя часть вертикальных электродов в зимнее время при промерзании грунта увеличивают их сопротивление. В этом случае представляет интерес глубокий вертикальный заземлитель, размещенный в пробуриваемом в грунте отверстии. Чем длиннее вертикальный электрод, тем больше площадь соприкосновения с грунтом, что создает благоприятные условия перехода токов в грунт.

Для расчета рассмотрено сопротивление одиночного заземлителя [4] по упрощенной и сложной методике с применением двух вариантов вертикального заземлителя: круглого сечения $d=20\text{ мм}$ и стального уголка с шириной полки $b=50\text{ мм}$.

$$R_B = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{v} + 0,5 \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом*м; l – длина заземлителя, м; v – диаметр вертикального электрода (d) или $(0,95b)$ ширина полосы стального угольника, умноженные на 0,95; $t = t_0 + 0,5l$, где t – расстояние от поверхности земли до середины вертикального электрода, $t_0=0,7\text{ м}$ – глубина залегания вертикального электрода [10].

В упрощенной методике учитывалось сопротивление верхнего слоя грунта, а по сложной методике учитывалось ρ_{Σ} – эквивалентное удельное сопротивление грунта, Ом·м, зависящее от параметров электрической структуры земли (ρ_1/ρ_2 и ρ_2) и от конструктивных параметров заземлителя, м: толщины верхнего слоя h_1 , глубины заложения заземлителя t_0 и длины вертикального электрода l_e .

Эквивалентное удельное сопротивление грунта определялось по равенству [10]:

$$\rho_{\Sigma} = \rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\alpha}, \quad (2)$$

$$\alpha = 0,19 \left(1 + \lg \frac{4,8h_1}{l_B} \right) \quad \text{при } 0,1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} < 1, \quad (3)$$

$$\alpha = 0,43 \frac{h_1 - t_0}{l_B} + 0,27 \lg \frac{a}{l_B} \quad \text{при } 1 \leq \frac{\rho_1}{\rho_2} < 10. \quad (4)$$

Характеристика грунтов Нарынской области представлена преимущественно галечниками, валунниками, щебнем, песками, песчаниками, глинами, суглинками, конгломератами, алевролитами, мергелами [6].

Для расчета сопротивления одиночного вертикального электрода применялась структура грунта, представленная в табл. 1.

На рисунке 2 представлены зависимости сопротивления вертикального электрода от ее длины, рассчитанные для ПС 110 кВ «Кочкор», «Чолпон», «Нарын», «Муз-Тор», а ПС 220 кВ «Ак-Кыя» имеет однослойный грунт и не представляет интереса для данного расчета. В левой части рисунков представлены графики для электрода круглого сечения диаметром 20 мм, а в правой части – для стальной полосы шириной полки 50 мм.

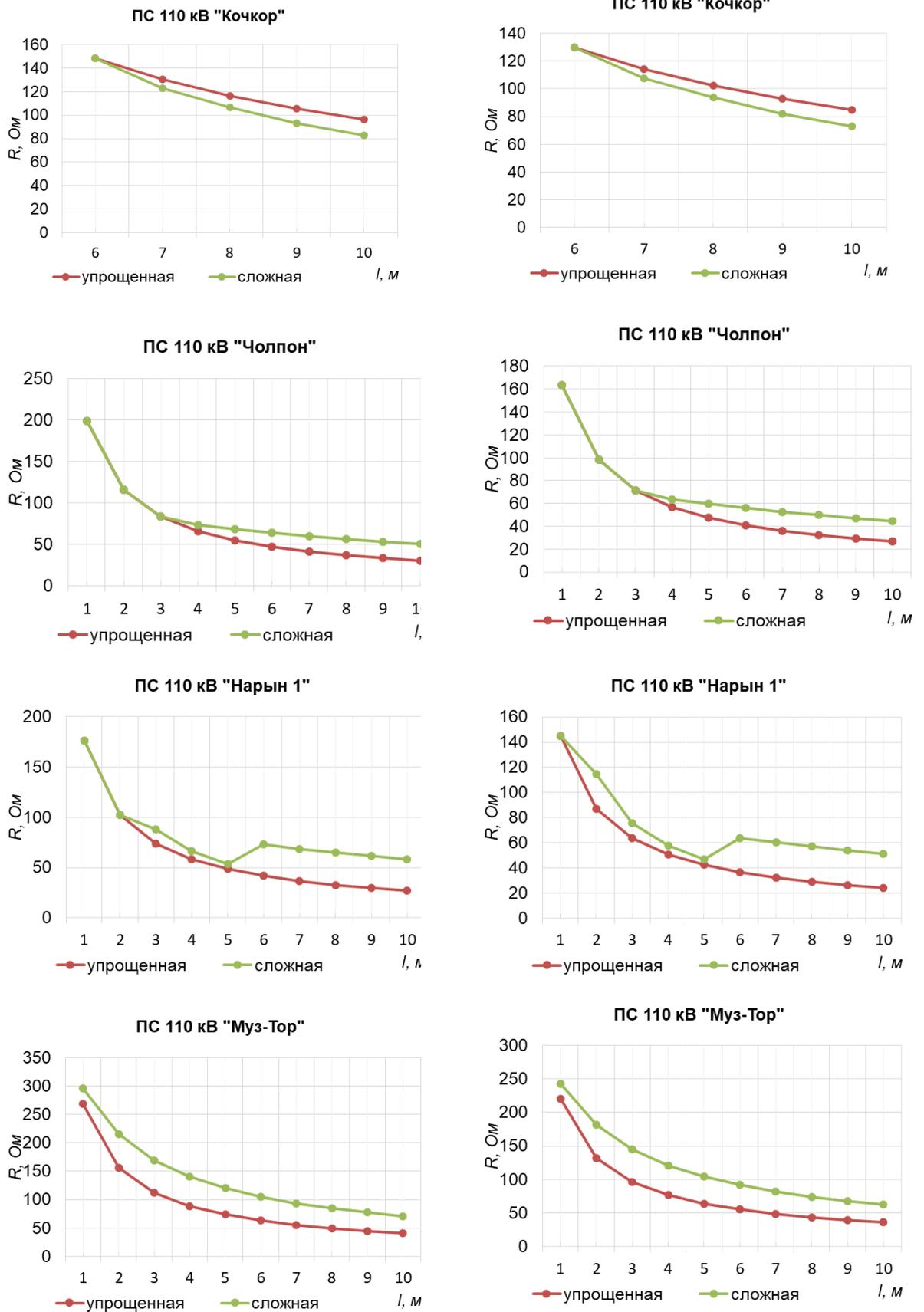


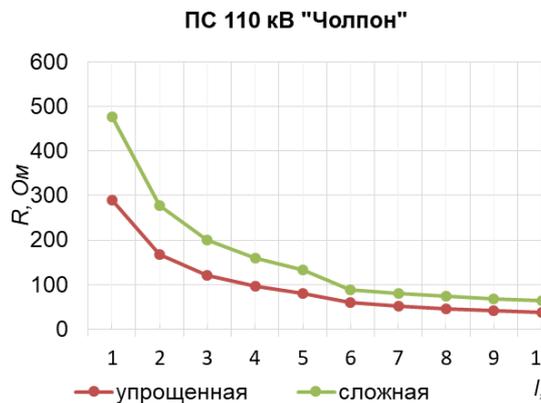
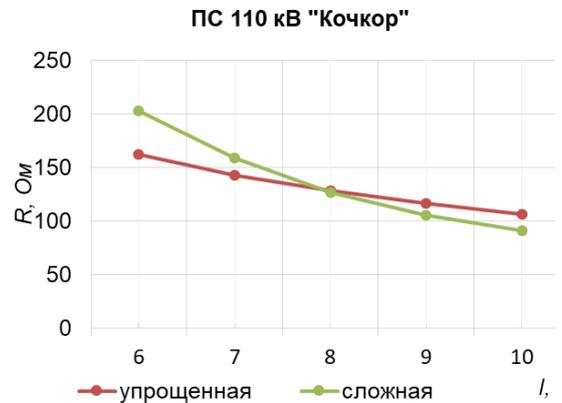
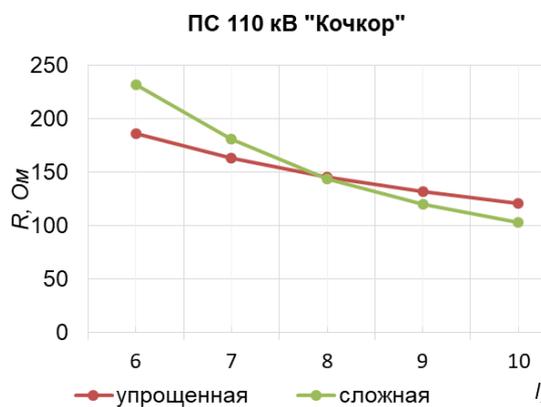
Рисунок 2 – Зависимость сопротивления вертикального электрода от ее длины для рассматриваемых ПС 110 кВ

Как видно из графиков, погрешность расчетов может составлять от 10 до 70 %. Для ПС «Нарын» и «Муз-Тор» погрешность в расчетах может составлять для всех длин

электрода, а для ПС «Кочкор» погрешность начинается от длины электрода 7 метров, для ПС «Чолпон» – от длины 4 метров.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления вертикального электрода от ее длины, рассчитанные для вышеперечисленных ПС 110 кВ с учетом климатического воздействия на верхние слои грунта.

Для расчета были определены климатические коэффициенты для данных регионов[6]. ПС 110 кВ «Муз-Тор» находится на высоте 3200 м над уровнем моря, средняя многолетняя низшая температура января составляет $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$, а средняя многолетняя высшая температура июля составляет $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. При таких средних температурах ПС относится к первой климатической зоне, где глубина промерзания грунта составляет 2,2 м. Климатические коэффициенты для вертикальных электродов длиной 3–4 метра $\psi=1,65$, для электродов длиной 5 м 1,35. А для ПС 110 кВ «Нарын- 1», «Кочкор», «Чолпон» средние многолетние температуры составляют: низшая январская от $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ – до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, высшая июльская $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые можно отнести ко второй климатической зоне. Где глубина промерзания грунта составляет 2,0 м. Климатические коэффициенты для вертикальных электродов длиной 3–4 метра $\psi=1,45$, для электродов длиной 5 м 1,25.



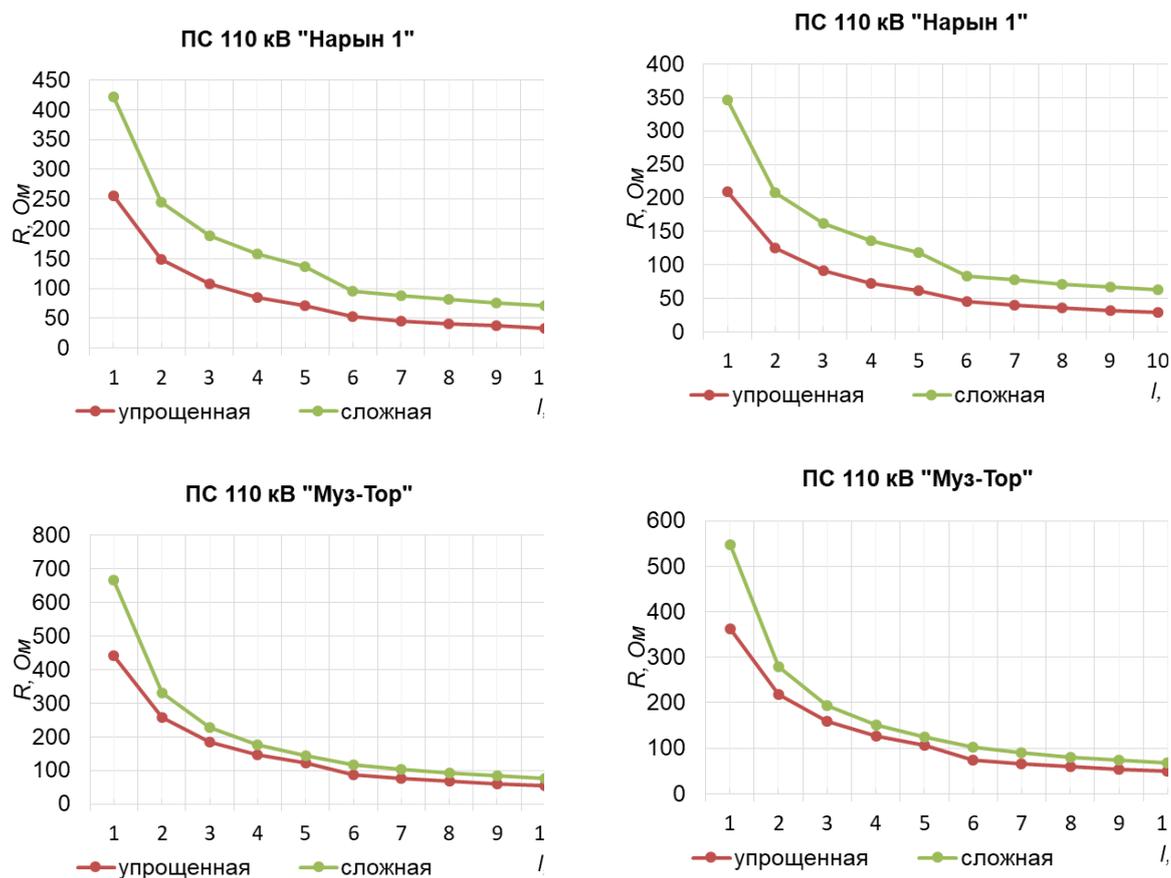


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления вертикального электрода от ее длины для рассматриваемых ПС 110 кВ с учетом климатических коэффициентов

Из представленных графиков (рис. 3) можно сделать следующий вывод, с увеличением длины вертикального электрода влияние сезонного коэффициента мала, т.к. только верхний слой подвержен климатическому влиянию. Погрешность в расчетах может составлять от 10 до 100 %.

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что при проектировании и реконструкции заземляющих устройств необходимо учитывать структуру и слоистость грунта и климатическое влияние. Применение упрощенных методик без учета неоднородности земли может привести к существенным отклонениям в расчетах.

Более эффективными оказались вертикальные электроды, стальные угольники с большей площадью соприкосновения с землей, в сравнении электродами с круглым сечением.

Результаты данных можно применить при выборе длины вертикальных электродов для усиления заземляющего устройства по обеспечению электромагнитной совместимости и электробезопасности данных подстанций и для энергообъектов, расположенных в одной региональной и климатической зонах.

Список литературы

1. Дьяков А.Ф. и др. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике./ Учебник для вузов // 2-е изд. - М.: Изд-ский дом МЭИ, 2011. – 544 с.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
3. Данные ОАО «НПВЭС» за 2022 г.

4. Борисов Р.К. и др. Заземляющие устройства электроустановок. Требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение. –М.: Изд-кий дом МЭИ, 2013. – 360с.
5. СО 153-34.21.122-2003. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.
6. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M005_Kyrgyzstan_1980_Geology.jpg
Геологическая карта Кыргызской Республики, 2008г.
7. http://ru.mes.kg/Kniga/book_rus044.html Часть II. Мониторинг и прогноз чрезвычайных ситуаций в пределах областей и районов Кыргызской Республики. Глава 6. Нарынская область.
8. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6 -750 кВ. ОАО «ФСК ЕЭС», 2009.

УДК: 004.94:621.315.1: 681.518.5

Г.Ш. Эралиева, eralieva.gulmira@mail.ru

Г.Н. Ниязова,

Ч.М. Бузурманкулова,

Ж. А. Сулайманова

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕСТА ОБРЫВА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПРОВОДА НОВОГО ТИПА

В статье проведен анализ возможности идентификации места обрыва воздушной линии электропередачи, выполненной на основе провода нового типа (ПНТ). ПНТ конструктивно подобен обычному, алюминиевому неизолированному проводу для линий электропередачи, отличающемуся тем, что один из проводов токопроводящей жилы изолирован от остальных. Следовательно, ПНТ состоит из двух составляющих, силового и информационного проводов. В конце линии информационный провод (ИП) накоротко соединяется с силовым проводом (СП). Идентификацию участка, где произошёл обрыв провода ВЛ, предполагается реализовать по величине сигнала (значение разности потенциалов между СП и ИП или по характеру изменения этой разности потенциалов, связанного с переходным процессом в момент обрыва). Для обоснования этого положения построена компьютерная модель рассматриваемой задачи в среде Simulink/SimPowerSystems. Результаты моделирования показали работоспособность способа.

Ключевые слова: воздушные линии; способ обнаружения обрыва провода воздушной линии; переходный процесс; компьютерное моделирование; Simulink/SimPowerSystems; схема замещения.

Введение

В [1] проанализированы проблемы, возникающие при диагностировании и мониторинге линий электропередачи в Казахстане. При некоторых особенностях аналогичные проблемы возникают и в Кыргызской Республике (КР).

В КР большая часть линий электропередачи (ЛЭП) проложена в условиях высокогорья вне населённых пунктов и имеет значительную протяжённость. В таком же положении находятся и высоковольтные линии (ВЛ) 110 – 500 кВ, которые являются стратегическими для системы электроэнергетики Кыргызстана. Следовательно, аварии на них могут нанести ощутимый ущерб. К тому же длительные и частые аварии, включая распределительные воздушные линии 10 – 35 кВ, проложенные в сельских районах, приводят к серьёзным бытовым неудобствам населения и могут создать социальную напряжённость.

Как отмечено в [1 - 3], «...современный уровень развития программно-аппаратной автоматизации обеспечивает возможность создания систем дистанционного управления с передачей информации по радиоканалам, однако разработок в области создания распределённых систем передачи информации по высоковольтным линиям электропередачи нет. Для обеспечения непрерывного измерения состояния изоляции высоковольтных изоляторов и обледенения токоведущих проводов требуется разработка специализированных датчиков-индикаторов, ориентированных на применение в рамках существующих конструкций линий электропередачи...».

В данной работе предлагается способ идентификации места обрыва воздушных линий, выполненный на основе запатентованного в КР провода нового типа (ПНТ), который, по мнению авторов, мог бы решить некоторые задачи, рассмотренные в [1].

Постановка задачи 1

Рассмотрим задачу о возможности идентификации места обрыва провода воздушной линии (ВЛ), выполненной на основе ПНТ (рис.1, а) [4]. ПНТ конструктивно подобен обычному алюминиевому неизолированному проводу для линий электропередачи марок А, АКП, АС, скрученному концентрическими повивами в чередующихся направлениях из алюминиевых проволок АТ, АТП, но отличается тем, что

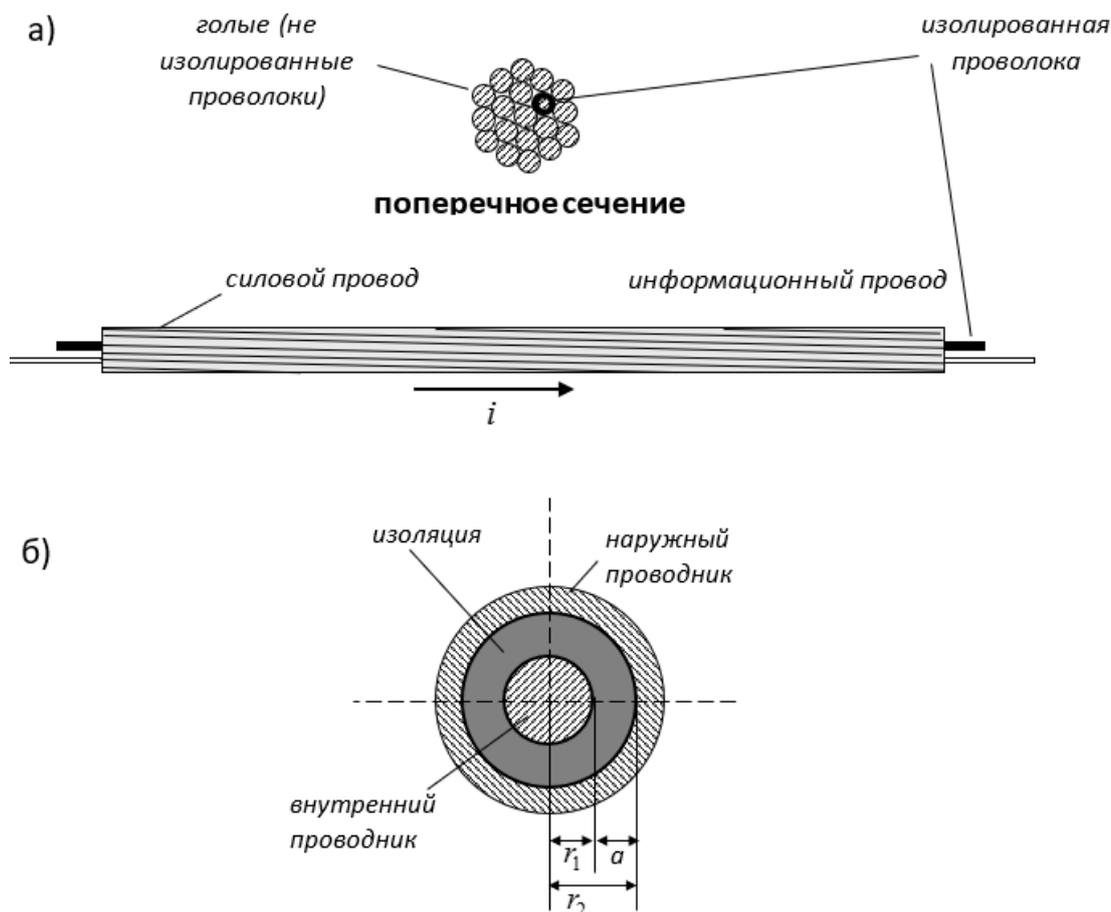


Рисунок 1 – Провод нового типа (ПНТ) для воздушной ЛЭП (а); представление ПНТ в виде коаксиальной пары (б), где r_1 – радиус информационного провода, r_2 – радиус поверх изоляции информационного провода

один из проводов токопроводящей жилы изолирован от остальных, как показано на рис.1, а. Следовательно, многофункциональный провод (МП) состоит из двух составляющих: силовой провод (СП), предназначенный для передачи электрической энергии; информационный провод (ИП).

При анализе электромагнитных процессов ПНТ можно представить как коаксиальный кабель [5] (рис. 1, б), схема замещения которого представляет собой электрическую цепь с распределенными параметрами.

В [6] рассмотрена схема обнаружения обрыва провода воздушной линии (ВЛ), где использован ПНТ. В данном разделе работы проведен анализ возможности идентификации места обрыва провода ВЛ с использованием ПНТ более простым способом.

Решение задачи

При решении задачи приняты следующие допущения: не рассматриваются вопросы состояния изоляции ИП при обрыве высоковольтных проводов; на значение разности потенциалов между СП и ИП в момент обрыва высоковольтного провода не оказывают существенного влияния фазы высоковольтного напряжения.

Рассмотрим ЛЭП (230 кВ), представляющую трехфазную воздушную линию электропередачи длиной $l = 18$ км, выполненную проводом нового типа. На рис.2 изображена только одна фаза, где к приемному концу линии передачи подключена нагрузка Z_n (75 МВт, 20 МВАр). Электрические параметры ВЛ: $L_0 = 0,92 \cdot 10^{-3}$ Гн/км, $R_0 = 0,035$ Ом/км, $C_0 = 0,00645 \cdot 10^{-6}$ Ф/км. В конце линии информационный провод накоротко соединен с силовым проводом. В начале линии в соответствии с поставленной задачей проводится анализ разности потенциалов $V(t)$ между СП и ИП.

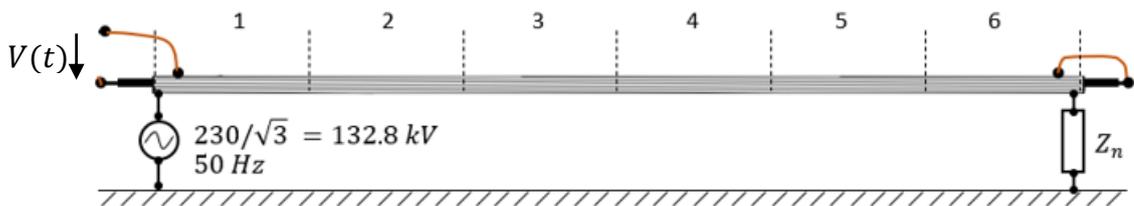


Рисунок 2 – ЛЭП на 230 кВ; Z_n – нагрузка; $V(t)$ – разность потенциалов между СП и ИП

Установление участка (1–6, рис.2), где произошёл обрыв провода ВЛ, осуществляется по величине сигнала (значение разности потенциалов между СП и ИП или по характеру изменения этой разности потенциалов, связанного с переходными процессом в момент обрыва).

Для обоснования этого положения построена компьютерная модель (рис.3) рассматриваемой задачи в среде Simulink/SimPowerSystems.

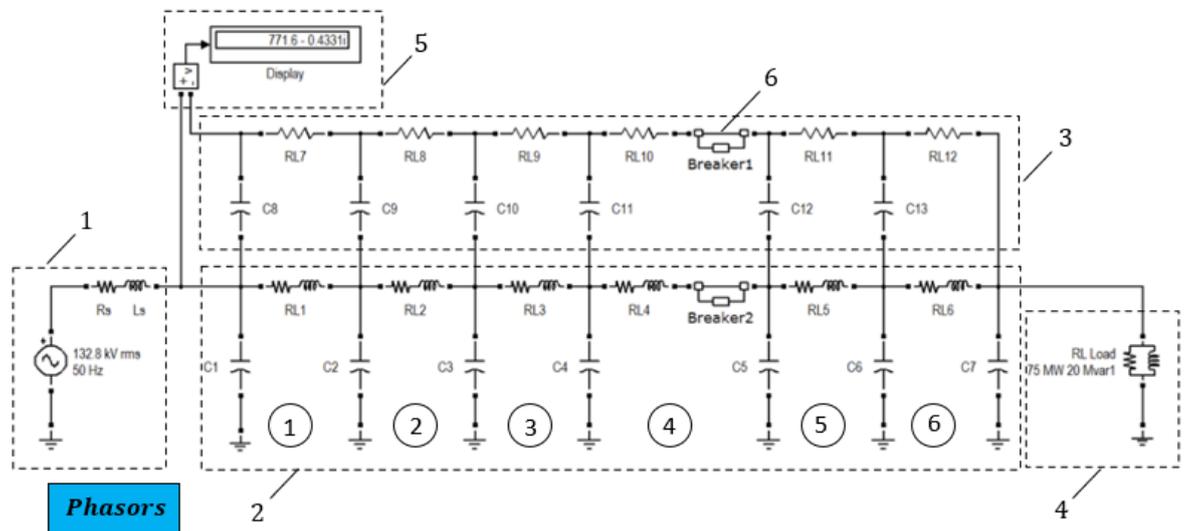


Рисунок 3 – Компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems, в режиме Phasors

Используя эту модель, рассчитаем величину сигнала, представляющую собой разность потенциалов между СП и ИП, а также проанализируем характер переходных процессов при обрыве провода на различных участках линии. По нашему мнению, сравнение величин этих сигналов, а также сопоставление переходных процессов позволит идентифицировать место обрыва провода ВЛ.

На рис.3 представлена в среде Simulink/SimPowerSystems компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ, где: 1 – эквивалентный источник моделируется источником напряжения (230 кВ_{RMS}/sqrt(3) или 132,8 кВ, 50 Гц), соединенным последовательно с полным внутренним сопротивлением (R_s и L_s); 2, 3 – схемы замещения силового и информационного проводов с использованием блоков PI Section Line; 4 – схема замещения RL – нагрузки; 5 – измеритель разности потенциалов между СП и ИП; 6 – Breaker выключатель для моделирования обрыва провода; окружности с цифрами 1 ÷ 6 – номера участков ЛЭП, в пределах которых с помощью выключателей моделируются обрывы ПНТ; Phasors – блок Powergui, представляет собой инструмент графического интерфейса пользователя. С помощью этого блока можно решить многие задачи (11), включая расчёты схем векторным методом (Phasorsimulation).

Блок PI Section Line [7] создаёт однофазную линию передачи с параметрами, объединенными в секции PI. Все параметры воздушной линии электропередачи распределены равномерно вдоль линии. Математическая модель линии электропередачи создаётся путём каскадирования шести идентичных секций PI (рис. 3 (2, 3)). Количество используемых секций зависит от представляемого частотного диапазона, который необходимо охватить при моделировании.

Наиболее приближенное значение максимального диапазона частот линии PI определяется [7]:

$$f_{max} = \frac{Nv}{8l},$$

где f_{max} – максимальная частота, Гц; $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – скорость распространения, км/с; l – длина линии, км; N – число секций при измерении индуктивности (Гн/км) и емкости (Ф/км).

Например, для воздушной линии длиной 100 км со скоростью распространения 300 000 км/с максимальный частотный диапазон, представленный одной секцией PI, составляет примерно 375 Гц. Для изучения взаимодействия между энергосистемой и системой управления этой простой модели достаточно. Однако для исследования процессов с участием высокочастотных переходных процессов в диапазоне кГц следует использовать гораздо более короткие участки PI [7].

В нашем случае общая длина линии $l = 18$ км, а количество секций – 6, следовательно, длина каждой секции $l_{sec} = l/6 = 3$ км. По мнению [7], для коротких участков линии (приблизительно $l_{sec} < 50$ км) параметры RLC, которые должны использоваться для каждого участка линии, задаются следующим образом:

$$R = R_0 \cdot l_{sec}, L = L_0 \cdot l_{sec}, C = C_0 \cdot l_{sec}.$$

Следовательно, электрические параметры каждой секции силового провода равны: $R = 0,035 \text{ Ом/км} \cdot 3 \text{ км} = 0,105 \text{ Ом}$, $L = 0,92 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км} \cdot 3 \text{ км} = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$, $C = 0,00645 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/км} \cdot 3 \text{ км} = 0,01935 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$. Для информационного провода электрические параметры приняты приблизительно такими же, за исключением емкости. Так как расстояние между электродами коаксиальной системы маленькое, то значение этой емкости оценено приблизительно значением $0,01935 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$. Параметры элементов компьютерной модели (рис.3) вводятся с помощью окон задания параметров.

При проведении численного эксперимента (ЧЭ) с целью определения разности потенциалов между СП и ИП в предположении, что на каком-то участке линии произошёл обрыв провода, устанавливаем на этом участке выключатель как в силовом, так и информационном проводах и задаем момент времени обрыва путем его настройки. В нашем случае контакты выключателя изначально находятся в замкнутом состоянии. Через промежуток времени, равный $11/60 = 0,183$ сек машинного времени, контакты выключателя (Breaker) переходят в разомкнутое состояние, моделируя обрыв как

силового, так и информационного проводов. На рис.3 выключатели Breaker1 и Breaker2 моделируют обрыв СП и ИП в шестой секции ВЛ.

Результаты моделирования

С целью идентификации места обрыва ВЛ, используя векторный метод (Phasorsimulation), рассчитаем в схеме (рис.3) разности потенциалов между СП и ИП при обрыве ПНТ в различных секциях ВЛ. В результате получаем комплексные токи и напряжения, т.е. синусоидальные напряжения и токи (таблица 1). Для выполнения этого метода необходимо в окне Powergui выбрать режим расчета Phasorsimulation (PS) и задать частоту источников в графе Frequency.

Таблица 1
Результаты моделирования при обрыве ПНТ в различных секциях ВЛ

Номера секций, где произошло обрыв провода	1	2	3	4	5	6
Показания вольтметров	3087 + +50.24 · j	1544 + +11.92 · j	1029 + +3.8 · j	771.6 – –0.4331 · j	616.8 – –4.017 · j	513.3 – –7.748 · j
Разности показаний вольтметров	$V_1 - V_2 =$ 1543 + 38,32 · j	$V_2 - V_3 =$ 515 + 8,12 · j	$V_3 - V_4 =$ 257,4 + 4,233 · j	$V_4 - V_5 =$ 154.8 + 3.584 · j	$V_5 - V_6 =$ 103.5 + 3.731 · j	

В табл. 1: первая строка – номера секций, где произошел обрыв провода; вторая строка – соответствующие значения разности потенциалов между СП и ИП; третья строка – разности показаний измерителей напряжения в смежных секциях.

Сопоставляя разности потенциалов между СП и ИП и номера секций, где произошёл обрыв провода, замечаем, что существует между ними взаимосвязь. Следовательно, есть возможность идентификации места обрыва ВЛ.

Чтобы выяснить возможность идентификации места обрыва провода с помощью сравнения характера переходных процессов [8, 9, 10] в момент обрыва провода на различных участках ВЛ, проанализируем их гармонический состав. Для этого проведем модификацию модели рис.3 путем подключения измерителя тока в СП, замены блока Display на Scope и настройки компьютерной модели на режим Continuous (рис.4).

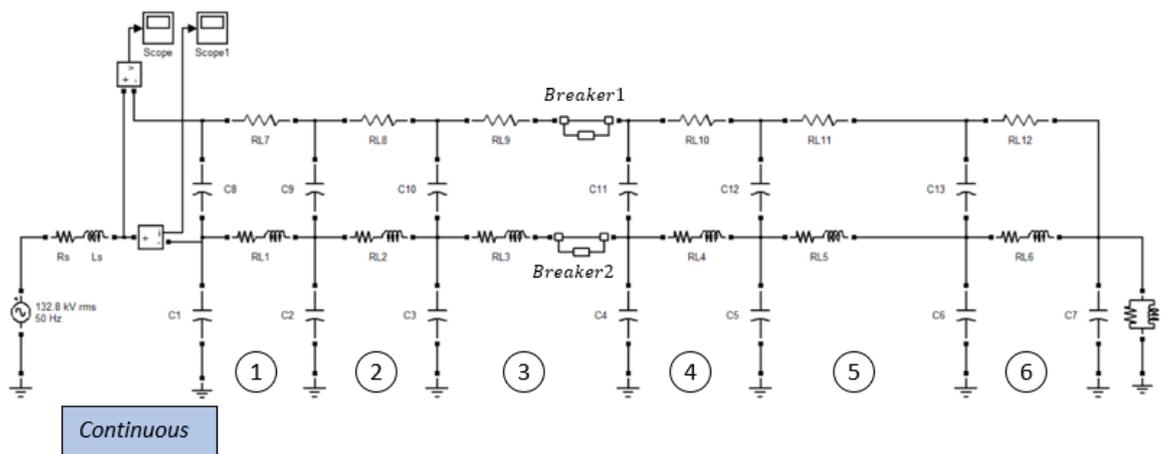


Рисунок 4 – Компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems, обрыв провода в секции 3, моделирование реализовано в режиме Continuous

На рис.4 выключатели установлены в третьей секции, следовательно моделируется обрыв провода в этой секции. Выключатели Breaker1, Breaker2, установленные соответственно в информационном и силовом проводах ПНТ, настроены так, что они

срабатывают через 0,183 с после запуска программы и обрывают соответственно ИП и СП воздушной линии.

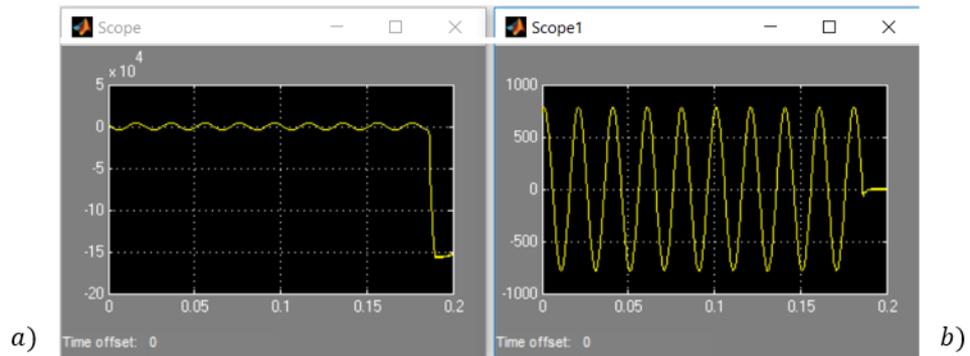


Рисунок 5 – Осциллограммы зависимостей:

a) – разности потенциалов между СП и ИП;

b) – ток в силовом проводе ПНТ в момент 0,182 с, когда произошёл обрыв провода

Для моделирования обрыва проводов на другой секции, например, пятой, выключатели будут перенесены на эту секцию. На рис.5, a), b) соответственно представлены осциллограммы зависимостей разности потенциалов между СП и ИП и тока в силовом проводе ПНТ в момент 0,182 с, когда произошёл обрыв провода.

Результаты моделирования

Результаты гармонического анализа зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП в момент времени (0,182 с) срабатывания выключателей.

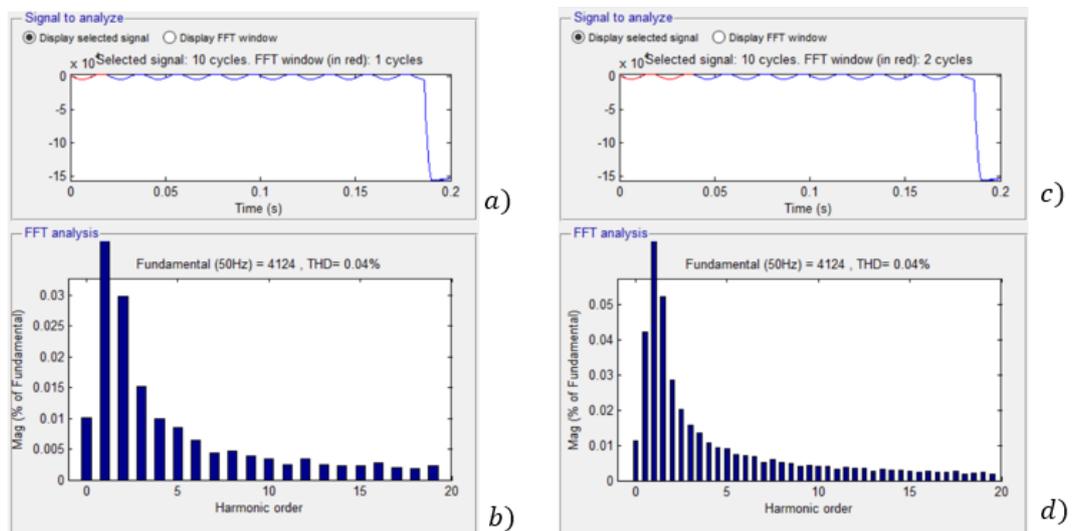


Рисунок 6 – a) – осциллограмма зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП до момента срабатывания выключателей с одним выделенным периодом (красным цветом); b) – гистограмма амплитуд гармоник, соответствующая выделенному красным цветом одному периоду зависимости; c), d) – аналогичные зависимости для двух периодов зависимости (выделена красным цветом). Вышеприведенные зависимости соответствуют моменту обрыва провода в третьей секции ВЛ

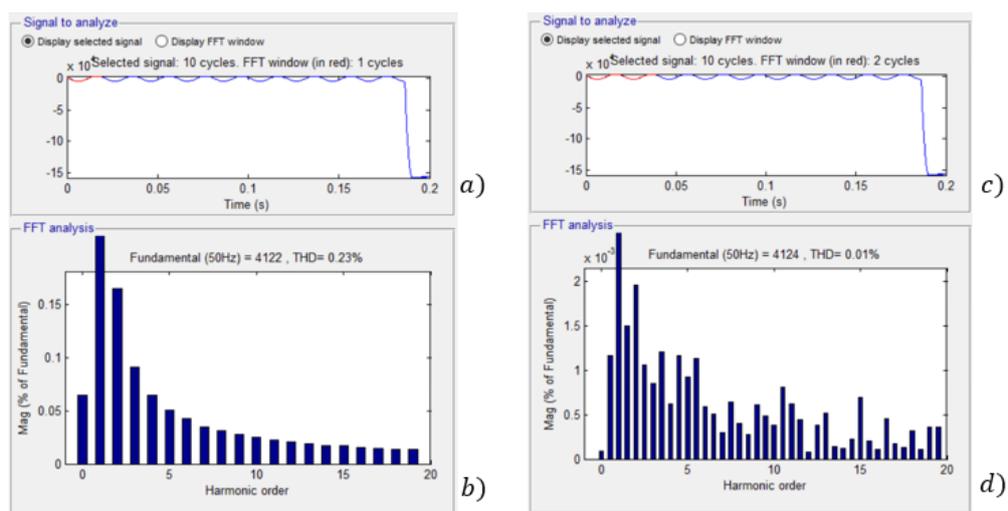


Рисунок 7 – Те же зависимости, что и на рис. 6, при обрыве провода в пятой секции ВЛ

На рис. 5, а) – представлена осциллограмма зависимости по времени разности потенциалов между СП и ИП до момента срабатывания выключателей. В рассматриваемом варианте выполнен гармонический анализ только для выделенного участка (красным цветом) длительностью в один период; б) – результат гармонического анализа в виде гистограммы амплитуд гармоник выделенного участка зависимости; с), d) – аналогичные зависимости, когда выделены два периода. Вышерассмотренные зависимости соответствуют моменту обрыва провода в третьей секции ВЛ.

На рис.6 представлены те же зависимости, что и на рис. 5, только предполагается, что обрыв провода произошёл в пятой секции ВЛ.

Сопоставление результатов гармонического анализа показывает возможность идентификации места обрыва провода, что позволяет диагностировать состояние ВЛ.

Заключение

Проведен анализ возможности идентификации места обрыва провода ВЛ с использованием ПНТ более простым способом. Для обоснования способа идентификации места обрыва построена компьютерная модель ЛЭП с проводом ПНТ в среде Simulink/SimPowerSystems и проведено компьютерное моделирование. Проведенный анализ результатов моделирования показал возможность идентификации места обрыва провода на линиях электропередачи.

Литература

1. Бейсенби М.А., Булатбаева Ю.Ф., Закарина А.Ж. Системы контроля и мониторинга линии электропередачи// http://rusnauka.com/39_FPN_2016/Tecnic/12_217596.doc.htm.
2. Самарин А., Масалов В. Современные технологии мониторинга воздушных электросетей ЛЭП. // Control Engineering . – 2013 –№ 3(45). – С. 88 – 94.
3. Брейдо И.В. Разработка распределенных программно-технических комплексов защит и диагностики элементов высоковольтных линий электропередачи. // Отчет о научно-исследовательской работе. – Караганда. – 2014.
4. Токпроводящая жила проводов и кабелей [Текст] / [С.М. Асанова, Ж.С. Иманакунова, К.А. Сатаркулов и др.] // ГАНИС при правительстве КР (Кыргызпатент). – Патент KG №1187. – 2009 г.
5. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи [Текст]: Учеб. пособие для вузов / П.Н. Матханов. – М.: ВШ, 1977. – 272 с.

6. Asanova S.M., Ahyoev J.S., Askarbek N., Suerkulov S.M., Asanova D.U., Safaraliev M. Method for designing drop-of-wire recognition systems on sections of undistorted two-wire power transmission lines. [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 966, 15th International Conference on Industrial Manufacturing and Metallurgy 18-19 June 2020, Nizhny Tagil, Russia.](#)
7. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
8. Исследование переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе компьютерного моделирования / Г. Ш. Эралиева, Ж. К. Абдыбаева, А. Асан уулу, Н. А. Суюнтбекова // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 2(41). – С. 100-108. – EDN BNZONQ.
9. Применение среды Labview для исследования переходных процессов в силовых кабелях с целью контроля состояния его изоляции / А. Т. Асиев, Т. Кабаев, З. А. Узагалиев, Р. К. Мусаев // Проблемы автоматизации и управления. – 2021. – № 3(42). – С. 111-120. – EDN USRRDD.
10. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. [Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами](#) // [Известия КГТУ им. И. Раззакова](#). – 2012. – № 26. – С. 105 – 111.

УДК 621.3.019.3

А.Д. Обозов,

К.Н. Оразбаев

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ГИДРОПОТОКА ГРАВИТАЦИОННОЙ МИКРО-ГЭС

В статье рассматриваются вопросы преобразования и передачи энергии в низкопотенциальной гравитационной микрогидроэлектростанции. Обсуждается методика расчета мощности гидротурбины в зависимости от геометрических и кинематических параметров водного потока. Получены зависимости изменения коэффициента трансформации от величины напора и скорости гидропотока.

Ключевые слова: камера, гидротурбина, напор, скоростной напор, лопасти, мощность, энергия, расход.

Введение

Современные темпы развития общества требуют все большего удовлетворения потребностей человека в его социально-экономической жизни, что определяет в конечном итоге уровень его благосостояния и комфортности, а это невозможно без достаточного потребления энергии, следовательно, одним из основных критериев успешного развития общества является развитие энергетики.

В последние годы в результате научно-технической революции и активного роста экономического потенциала промышленно развитых и развивающихся стран резко возросло потребление энергоресурсов, основанное на использовании традиционного углеводородного топлива, как уголь, газ, нефть и т.д. Исследования показывают, что при таких темпах развития запасы этих традиционных источников могут быть исчерпаны в ближайшие 50–100 лет [1], и человечество встанет перед проблемой поиска и использования других источников энергии.

Конечно же, уже сегодня необходимо об этом думать. Во-вторых, активное использование традиционного углеводородного топлива привело к появлению еще одной планетарной проблемы – это загрязнение окружающей среды. Как показывает практика, альтернативой традиционной энергетике становится энергия, основанная на использовании возобновляемых источников. По совокупности имеющихся ресурсов энергии ВИЭ (солнце, ветра, биомассы, геотермальной энергии и др.) в сотни, тысячи раз превышают имеющиеся все мировые запасы углеводородного топлива [2]. Темпы роста использования ВИЭ уже сегодня значительно выше темпов использования традиционных источников [2]. Сегодня можно с уверенностью утверждать, что будущее энергетики за ВИЭ.

Из большого многообразия ВИЭ наиболее интересным и привлекательным для республики является энергия малых водотоков. Ресурс этих водотоков оценивается [3] в 6-7 млрд. кВт/ч.

На сегодняшний день имеется достаточно большое количество различных типов и конструкций микро-ГЭС. Все их можно разделить на две большие категории: это высоконапорные и низконапорные. В последние годы низконапорные гравитационные микро-ГЭС находят все большее применение в практике благодаря таким свойствам, как простота конструкции, экологическая привлекательность, высокая надежность и эффективность, возможность достаточно просто размещать их на реках [4]. Экологическая безопасность, обусловленная возможностью свободно проходить рыбам через турбинный тракт без повреждений, делает их неопенимыми в деле охраны окружающей среды. Гравитационные микро-ГЭС в основном используют энергию движущейся массы воды, а не потенциальную энергию напора, водного столба.

Проведенный анализ использования различных типов водных турбин показал, что наиболее приемлемым и практически оправданным типом турбин для гравитационных микро-ГЭС являются роторные гидротурбины [5]. Роторные турбины представляют собой

две полуцилиндрические лопасти, имеющие одну общую ось вращения, расположенную вдоль образующихся полуцилиндров. Как видно из рис. 1, если расположить данную турбину в движущийся поток воды, то под его воздействием она будет вращаться вокруг оси 0-0.

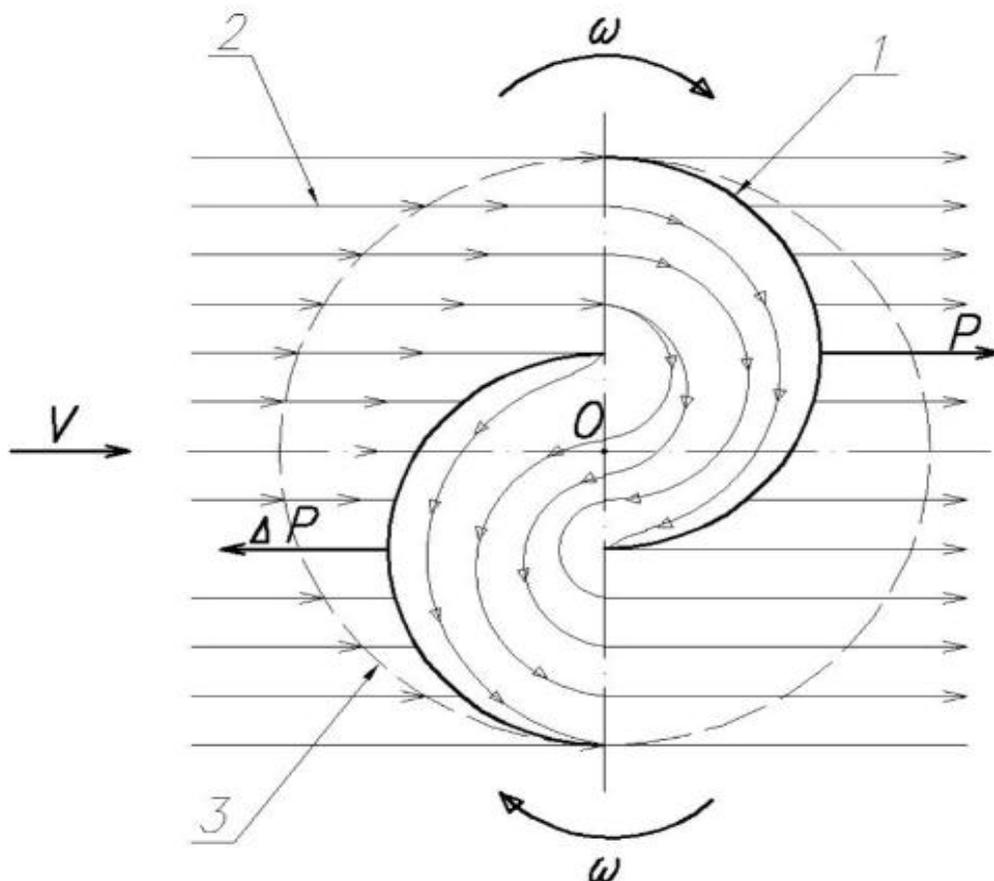


Рисунок 1 – Схема взаимодействия водного потока с лопастями роторной турбины:
 1– лопасти, 2– водный поток, 3– отмечаемая окружность граней турбины.
 ω –угловая скорость, v – скорость водного потока, P , ΔP – усилия на лопастях турбины, 0– ось вращения турбины

Как правило, такие роторные турбины имеют большое количество лопастей, от которых в конечном счете зависит ее развиваемая мощность.

Рассмотрим гравитационную микро-ГЭС вихревого типа, где в качестве турбинной камеры используется открытая цилиндрическая ёмкость с выходным отверстием на дне, а внутри ей установлена турбина, соединенная с гидрогенератором (рис. 2).

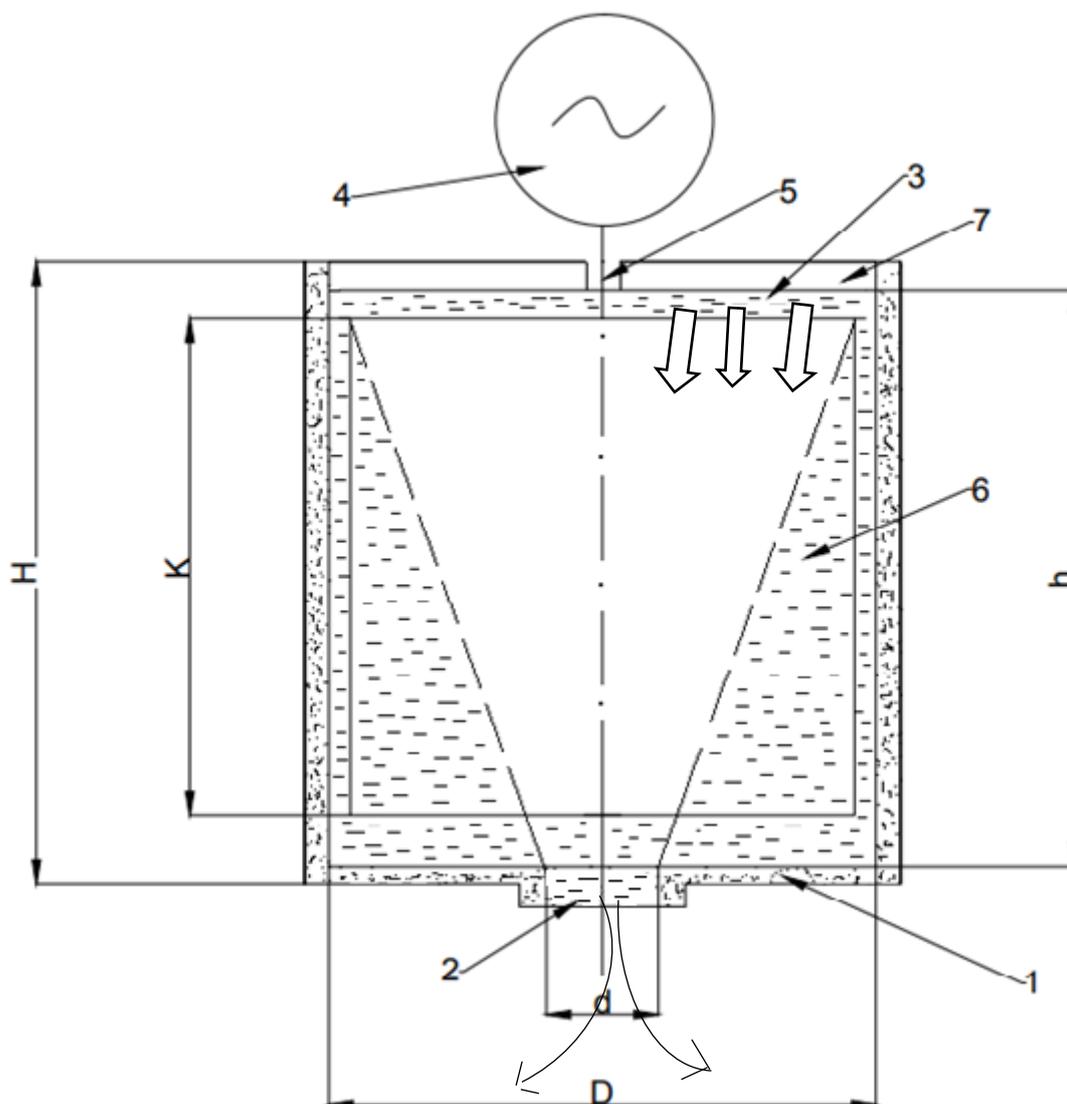


Рисунок 2 – Схема гравитационной водоворотной микро-ГЭС:
 – камера гидротурбины, 2 – нижнее отверстие в камере, 3 – подводной канал, 4 – генератор, 5 – вал турбины, 6 – лопасти турбины

Работает система следующим образом. При помощи подводного канала 3 (открытая деривация, труба, бетонированный желоб) вода из реки подается в камеру 1. Камера выполнена в виде открытого цилиндра высотой H , диаметром D и с отверстием 2 в донной части. Диаметр отверстия d . Вода из подводного канала подается по касательной к образующей поверхности камеры 1 таким образом, что после вхождения в нее вода в ней закручивается. Поступательное движение водного потока переходит во вращательное. При определенной линейной скорости (v) подаваемого водного потока и соответствующих геометрических параметров камеры (D, d, H) в ней образуется водяная воронка. Теперь если в эту воронку установить турбину 6, то под действием вращающегося водного потока она начнет вращаться и передавать вращающийся момент на вал 5 генератора 4, который будет вырабатывать электрическую энергию. Таким образом поступательное движение водного потока преобразует свою кинетическую энергию в электрическую. Как видим, схема достаточно проста, не требует сложных и громоздких, конструктивных решений и имеет предельно малое количество преобразовательных элементов. Установка может быть легко смонтирована на речном потоке. Такое решение имеет огромную перспективу для использования в равнинных и предгорных районах, где отсутствуют большие уклоны

местности и водный поток в основном использует кинетическую энергию движущейся массы воды, а не давления столба воды закрытого трубопровода.

Несмотря на достаточно простую схему установки для обеспечения ее эффективной работы, высокой надежности, к.п.д., и технико-экономической привлекательности, необходимо исследовать и решить ряд задач, связанных с расчетом и выбором геометрических параметров турбинной камеры, изучением закономерностей изменения кинематических параметров как движущейся массы воды в воронке, так и турбины, взаимодействующей с ней. Следует определить наиболее рациональный тип используемой турбины и оптимизировать ее геометрическую форму и размеры лопастей. Исследовать особенности преобразования и передачи кинетической энергии гидропотока в электрическую. Решать вопросы синхронизации и управления выходными параметрами генератора с нагрузкой на потребителе. Настоящая статья посвящена решению одной из этих задач, это исследование преобразования и передачи энергии гидравлического потока воды валу гидротурбины и генератора. Определению мощности установки в зависимости от геометрических параметров камеры и кинематических параметров водного потока.

Рассмотрим особенности использования энергии гидропотока в свободно поточных гравитационных микро-ГЭС. Как было ранее отмечено, особенностью работы свободно-поточных гравитационных микро-ГЭС является в первую очередь использование движущейся массы воды и составляющая потенциальной энергии гидравлического потока. На основе проведенного ранее анализа [5] и изучения опыта эксплуатации существующих микро-ГЭС было определено, что наиболее эффективным типом турбины, используемой в низконапорных микро-ГЭС, являются роторные турбины. [6,7]. Рассмотрим некоторые взаимосвязи между параметрами набегающего потока с геометрией лопастей турбины, возникающие на его валу, вращательном моментом и выходной мощностью генератора.

Любой движущийся водяной поток в свободнопоточной системе обладает как кинетической, так и потенциальной энергией. Полная энергия движущегося потока может быть записана, как

$$W = W_k + W_n \quad (1),$$

где W – полная энергия движущейся массы воды, W_k – кинетическая энергия. W_n – потенциальная энергия или с учетом, что

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{mv^2}{2}; \\ W_n &= mgh, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса воды; v – линейная скорость воды в подающем лотке; g – ускорения свободного падения; h – перепад высот между входом и выходом потока напора.

Можно записать

$$W = \frac{mv^2}{2} + mgh \quad (3).$$

Если теперь рассмотреть механизм прохождения этого водного потока через турбину, то можно определить мощность микро- ГЭС на валу гидротурбины:

$$N_T = \frac{d(W)}{dt} \cdot \eta_0, \quad (4)$$

где N_T – мощность на валу гидротурбины; η_0 – к.п.д. турбины, T – время, в течение которого происходит изменение единичной массы воды, проходящей через турбину.

Перепишем (4) в виде

$$N_T = \frac{d}{dt} \left(\frac{mv^2}{2} + mgh \right) \eta_0. \quad (5)$$

Если допустить, что за некоторый малый промежуток времени (dt) через турбину проходит определенная масса (dm) воды с объемом (dV), то можно записать с учётом плотности воды (ρ)

$$\rho = \frac{dm}{dV}; \text{ или } dm = \rho dV; \quad \text{где } dV = F d\vartheta, \quad (6)$$

где ρ – плотность воды; F – площадь поперечного сечения подводного канала.

Теперь если представить, что жидкость не сжимаемая, то изменение количества движения можно записать как

$$m_1 v_1 = m_2 v_2 = const \quad (7),$$

где соответственно

v_1, v_2 – абсолютные скорости потока воды перед входом и после выхода из турбинной камеры.

С учётом (6) и (7), (5) можно представить в виде:

$$N_T = \frac{d}{dt} \left(\frac{vFv^3}{2} + vF \cdot \vartheta gh \right) \eta_0. \quad (8)$$

Если теперь допустить, что режим подачи потока воды в турбинную камеру стационарный, то (8) можно представить в виде

$$N_T = \frac{d}{dt} \left(\frac{vFv^3}{2} + \vartheta Fvgh \right) \eta_0. \quad (9)$$

Таким образом можно видеть, что в общем случае величина мощности, развиваемая на валу гидротурбины, зависит от площади напорного сечения подводного трубопровода (F), абсолютной скорости подводящего потока (ϑ), гидравлического напора h и коэффициента полезного действия турбины. (η_0). Представим (9) через объемные расходы воды в подводящем трубопроводе.

$$G = F\vartheta; \quad (10)$$

тогда получим

$$N_T = \eta_0 \vartheta G (0.5\vartheta^2 + gh). \quad (11)$$

Выражение в скобках практически показывает, какую долю от общей энергии турбины составляет кинетическая энергия движущейся массы воды.

Введем некоторые обозначения

$$K = \frac{2h}{0.5\vartheta^2};$$

тогда (11) примет вид

$$N_T = \frac{h_0 + G\vartheta^2}{2} (1 + K) \quad (13),$$

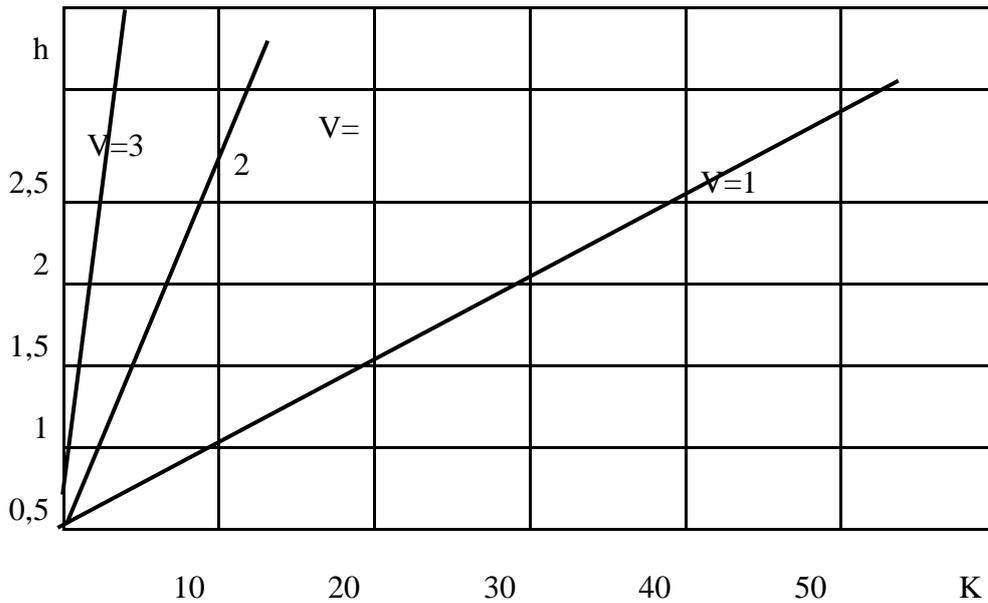
где K – коэффициент трансформации.

Приведенный коэффициент трансформации (K) практически представляет физическую величину, показывающую, какая доля мощности приходится на потенциальную составляющую гидротурбины при определенных значениях абсолютной скорости водного потока. Определим зависимость данного коэффициента от величины гидравлического напора гравитационной равниной микро-ГЭС при различных величинах скорости полного потока. Для гравитационных микро-ГЭС значение напора находится, как правило, в интервале от нуля до 3 м. То есть

$$0 \leq h \leq 3.$$

Построим графики зависимости k от h при изменении скорости в диапазоне от $0 \leq \vartheta \leq \vartheta_n$.

На рис 3. представлены диаграммы этих зависимостей при различных значениях скорости водного потока.



Рисунок

3 – Диаграмма изменения коэффициента трансформации (К) от величины напора (h)

Если внимательно посмотрим на полученные гистограммы, то можно видеть, что зависимость коэффициента (k) имеет линейную зависимость от величины напора (h). Причем эта зависимость тем меньше, чем выше скорости потока (v). Что это означает? Это означает, что с увеличением абсолютной скорости водного потока, подводимого к турбине гравитационной микро-ГЭС, доля и значимость потенциальной составляющей резко меняется. То есть коэффициент трансформации (k) может быть использован как мера оценки величины потенциальной энергии водного потока по отношению ко всей возможной преобразованной энергии в турбинном тракте гравитационной микро-ГЭС. Физический смысл данного коэффициента говорит о том, что чем меньше его величина, тем меньше доля потенциальной энергии водного потока участвует в работе гидротурбины. Данный коэффициент также может быть использован при построении расчетной модели взаимодействия водного потока с турбиной микро-ГЭС; при оценке погрешности и точности от реальной величины, получаемых гидродинамических параметров (момент на валу, мощность и т.д.).

Для оценки доли потенциальной составляющей энергии от величины скорости водного потока были построены диаграммы, приведенные на рис.4. Из полученных диаграмм можно видеть, что доля величины потенциальной составляющей есть функция асимптотическая, и с увеличением (v) доля потенциальной составляющей снижается.

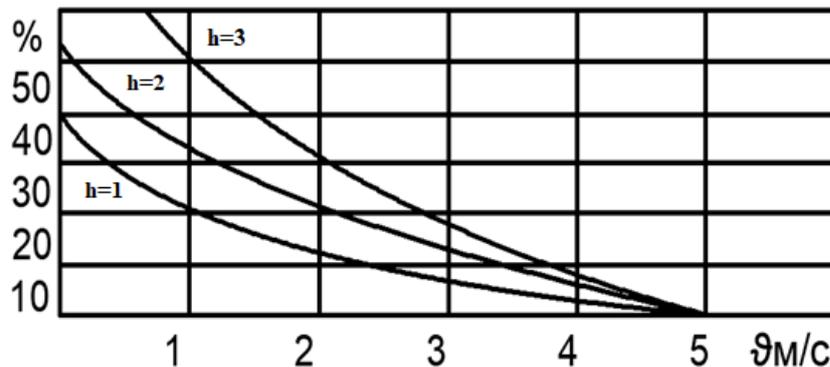


Рисунок 4 – Диаграммы изменения доли потенциальной энергии в (%) при различных значениях (v) и (h)

Полученные результаты говорят о том, что практически при определении динамических параметров, как момент на валу гидротурбины, его мощность значения потенциальной энергии водного потока, гравитационная микро-ГЭС уже при скорости потока 5 м/с и напоре менее 3 м можно пренебречь, а величина ошибки не будет превышать 0,4 %.

Литература

1. Обозов А.Д. Перспективы использования ВИЭ в горноклиматических условиях Кыргызстана. Мат. межд. науч. симпозиума. ВИЭ – проблемы и перспективы. – Худжант, Таджикистан, 2011.
2. Обозов А.Д., Ботпаев А.М. Возобновляемые источники энергии. – Бишкек: ИЦ «Техник», 2010.
3. Энергетика Кыргызстана, АБР. – Бишкек, 2020.
4. Женишбек У.К., Медеров Т.Т. и др. Микрогидроэлектростанции с использованием гидроворонки. Изв. КГТУ им. И.Раззакова. – №59. – Бишкек, 2017.
5. Медеров Т.Т. Исследование и разработка бироторной микрогидроэлектростанции. Авт. канд. диссер. – Бишкек, 2016.
6. [http:// www. cink-hydro- energy.com/ru](http://www.cink-hydro-energy.com/ru)
7. <https:// www. turbvlent. be/ru>
8. О методе анализа надежности и диагностики состояний микрогэс для автономного электроснабжения / А. Б. Бакасова, К. Сатаркулов, Г. Н. Ниязова, Т. К. Сатаркулов // Проблемы автоматики и управления. – 2020. – № 1(38). – С. 15-20. – DOI 10.5281/zenodo.3904087. – EDN KPOIZT.

УДК 539.4

И.В. Брякин, д.т.н., профессор

Е.И. Дьяченко, аспирант

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

В настоящей статье рассмотрены особенности реализации процесса волочения металлических технологических объектов. Анализируются основные структурные элементы материала технологического объекта и обосновывается механизм управления параметрами технологического процесса. Предлагается новый метод активизации набора дополнительных физических эффектов в структуре материала технологического объекта с целью формирования в нем необходимых физико-технических свойств, которые в своей совокупности обеспечат оптимизацию соответствующих параметров процесса волочения.

Обосновывается целесообразность применения аппарата синергетики для более детального описания процесса волочения в режиме активации физических эффектов в структуре материала.

Ключевые слова: активация, волочение, дефекты, дислокации, домены, деформация, зерна, напряжения, наклеп, процесс, параметры, проволока, пластичность, резонанс, малый параметр, структура, синергетика, физические эффекты, физические поля

Введение

С давних исторических времен человечеству известен такой способ обработки металлов давлением, как волочение. В наше время этот способ массово применяется для получения большего ассортимента изделий, в частности, проволоки круглого, фасонного и т.п. профилей.

Кроме того, существует множество исследовательских и практических работ, касающихся вопросов волочения, которые лежат в сфере интересов таких наук, как физика твердого тела, механика деформируемого твердого тела, материаловедение и т.д.

Такой широкий и актуализированный интерес к проблемам процесса волочения связан с тем, что во время технологической обработки проволока испытывает на себе воздействие ряда физических полей, например, таких как механическое воздействие, термическое, акустическое, магнитное (эффект обратной магнитоstriction) [1]. Кроме того, волочение приводит к тому, что материал, подвергшийся протягиванию, становится в каком-то смысле композиционным, т.к. при этом имеет сердцевину, менее подвергшуюся наклепу, чем ее периферийная часть. Все упомянутые факторы в своей совокупности указывают на нетривиальность происходящих физических процессов при реализации волочения.

Ввиду того, что сам технологический процесс обработки требует прогнозирования свойств изделий, а также расчета различных технологических параметров, необходима точная, отражающая физику всех происходящих процессов физическая модель, наличие которой позволит выявить механизмы возможной оптимизации самого технологического процесса волочения и повысить его эффективность.

Обрабатываемый материал технологического объекта можно считать активной физической средой, в которой возникающие физические эффекты являются факторами, определяющими основные протекающие в ней процессы и влияющими на параметры физико-технического состояния структуры этого материала.

Традиционно для изменения каких-либо свойств объекта технологического процесса (ОТП) в качестве конкретного воздействия активации используется определенное высокоэнергетическое физическое поле, например, магнитное, электрическое, акустическое и т.д. В результате такого воздействия улучшаются некоторые параметры самого технологического процесса обработки.

«Например, придавая волочиальному инструменту вибрации (колебательные движения), можно в некоторых условиях процесса добиться значительного снижения сил и напряжений волочения по сравнению с процессом без вибрации. Вибрации могут быть осевыми, поперечными и вращательными (крутильными). При этом используемые вибрации имеют как низкочастотные (звуковые 25÷500 Гц), так и высокие (ультразвуковые 16÷800 кГц) колебания. Кроме того, мощность используемых вибраторов должна быть достаточной для обеспечения колебаний волокна без затухания под действием силы волочения. Обычно для получения колебаний низких частот используют мощные вибрационные устройства (0,5÷3,0 кВт) с механическим или гидравлическим приводом» [2].

В качестве другого примера можно привести «способ волочения алюминиевой проволоки, заключающийся в воздействии перед волочением на заготовку импульсным магнитным полем, индукция которого не превышает 0,7 Тл, создаваемым посредством установленного перед волокой индуктора, на который подают импульсы тока с амплитудой от 2 до 30 кА и частотой от 10 до 1000 Гц от источника токовых импульсов» [3].

Для решения указанной задачи предлагается использовать целенаправленное многофакторное резонансное воздействие активации в виде физических полей с малыми параметрами для формирования требуемых свойств структуры материала объекта технологического процесса при его обработке волочением, которое в итоге существенно повлияет на качественные показатели процесса волочения при его реализации.

Для обоснования данной концепции необходимо рассмотреть особенности процесса обработки металлов давлением и провести детальный анализ физических факторов, влияющих на процесс волочения.

Особенности процесса обработки металлов давлением

Известно, что способность материала получать остаточные деформации без разрушения и сохранять их после снятия нагрузки обуславливается пластичностью материала, которая основана на возможности движения кристаллической решетки [4].

Кристаллическая решетка всех реальных материалов имеет множественные дефекты, которые появляются и движутся практически постоянно. При этом именно эти дефекты позволяют материалам, не разрушаясь, изменять свою форму [5]. В свою очередь материалы с идеальной кристаллической решеткой обладают достаточно высокой прочностью. Практически при любом воздействии на материал его кристаллическая решетка изменяется, меняя свойства материала. Основанный на пластичности технологический процесс получения заготовок или деталей в результате силового воздействия инструмента на обрабатываемый материал фактически представляет собой обработку материалов давлением, которая включает в себя прокатку, прессование, ковку, штамповку, волочение и прочие.

В процессе обработки давлением физико-механические свойства материала достаточно сильно изменяются (рис. 1).

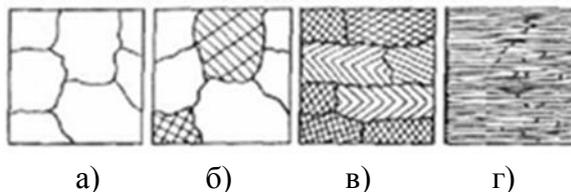


Рисунок 1 – Изменение микроструктуры поликристаллического металла при деформации: а – $\varepsilon = 0\%$; б – $\varepsilon = 1\%$; в – $\varepsilon = 40\%$; г – $\varepsilon = 90\%$

При деформации поликристаллов деформация зерен начинается сразу по нескольким системам скольжения и сопровождается изгибами и поворотами плоскостей скольжения.

Пока деформация мала, порядка 1%, зерна деформируются неоднородно в силу их разной ориентации по отношению к приложенной нагрузке. С ростом деформации различия в ориентации между зернами уменьшаются, и изменяется микроструктура: зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения (рис. 1, в). Внутри зерна повышается плотность дефектов. При значительных деформациях образуется волокнистая структура, где границы зерен различаются с трудом (рис. 1, г).

В результате холодного пластического деформирования металл упрочняется, изменяются его физические свойства. Целый спектр параметров, например, таких как предел прочности, предел пластичности, шероховатость поверхности и т.д., изменяется как в одну, так и в обратную сторону [6]. В результате такой обработки материалов часто наблюдается эффект образования наклепа, являющегося упрочнением металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации [7].

Наклеп сопровождается выходом на поверхность материала дефектов кристаллической решетки, увеличением прочности и твердости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера), что говорит о существенных изменениях в материале, вносимых наклепом.

При деформировании увеличиваются такие прочностные характеристики, как твердость, временное сопротивление σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел упругости $\sigma_{упр}$. Кроме того, наблюдаются понижение пластичности и вязкости. Металлы интенсивно наклепываются в начальной стадии деформирования, затем при возрастании деформации механические свойства изменяются незначительно.

С увеличением степени деформации предел текучести $\sigma_{0,2}$ растет быстрее временного сопротивления σ_b . Обе характеристики у сильно наклепанного металла сравниваются, а удлинение δ становится равным нулю. Такое состояние наклепанного металла является предельным, т.е. при попытке продолжить деформирование металл разрушается.

Например, путем наклепа твердость и временное сопротивление σ_b удается повысить в 1,5÷3 раза, а предел текучести $\sigma_{0,2}$ в 3÷7 раз.

С ростом степени деформации возрастают удельное электрическое сопротивление, коэрцитивная сила, понижаются магнитная проницаемость и плотность металла.

Как указывалось ранее, одним из основных видов обработки материалов давлением является волочение, представляющее собой технологический процесс, при котором длинномерные изделия (заготовки) поперечным сечением в виде круглого или фасонного профиля протягиваются через круглое или фасонное отверстие, сечение которого меньше сечения заготовки (рис. 2).

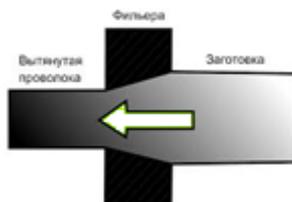


Рисунок 2 – Общая схема процесса волочения

В результате площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а ее длина увеличивается. Волочение происходит в несколько проходов, постепенно уменьшая поперечное сечение заготовки до требуемого. В ходе этого процесса свойства заготовки крайне сильно изменяются.

Непосредственно сама деформация заготовки происходит в фильере, представляющей собой специальный инструмент с сужающимся каналом. Волочение

сопровождается нагревом и достаточно большим давлением в очаге деформации. Обработка производится в несколько итераций с шагом от 0,5 до 0,05 мм. Степень обжатия зависит от величины наклепа металла, что в определенных случаях требует дополнительного отжига материала.

Во время волочения свойства обрабатываемого технологического объекта резко изменяются, что проявляется в росте временного сопротивления разрыву σ_b , предела текучести σ_t , уменьшении шероховатости поверхности и т.д. [6]

Внутренняя структура заготовки ориентируется вдоль линии действия силы волочения. Наклеп концентрируется на периферии профиля подвергающемуся волочению и постепенно направляется к центру. По мере волочения, с увеличением суммарного обжатия заготовки, рост временного сопротивления разрыву σ_b идет нелинейно. По множественным данным, предел прочности σ_b изменяется по кривой, имеющей рост σ_b в течение первого этапа деформации, ускоряющемся ростом на следующих этапах, и наконец на последнем этапе деформации, при определённой (критической) величине обжатия, чрезвычайно интенсивным ростом σ_b , получившим название сверхнаклеп (рис. 3).

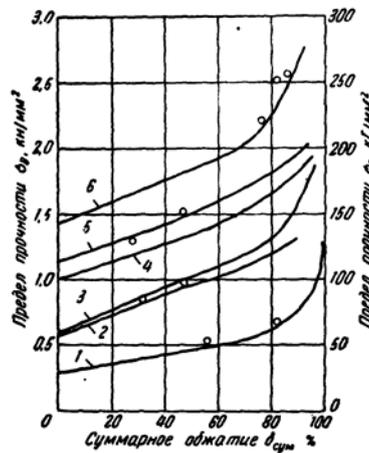


Рисунок 3 – Изменение предела прочности σ_b сталей различных марок и термической обработки: 1 – 0,02% C; 2 – отожжённая 0,9% C; 3 – патинированная 0,3% C; 4 – тоже 0,5% C; 5 – то же 0,7% C; 6 – то же 0,9% C

Для подсчета теоретического σ_b наклепанной стальной проволоки довольно широко используют формулы, предложенные различными авторами. Наибольшее применение нашла формула Потемкина К.Д. [6]:

$$\sigma_s = 10 \left[\sigma_{вн} + \frac{0,6(C + \frac{d_n}{40} + 0,01\delta_{ед}^{cp})\delta_{сум}}{\lg \sqrt{100 - \delta_{сум}} + 0,0005\delta_{сум}} \right], \quad (1)$$

где: σ_b – предел прочности наклепанной проволоки, н/м² (кг/см²); $\sigma_{вн}$ – предел прочности проволоки, подвергаемой волочению (кг/см²); C – содержание углерода в стали, %; d_n – диаметр проволоки, подвергаемой волочению, мм; $\delta_{ед}^{cp}$ – среднее единичное обжатие проволоки; $\delta_{сум}$ – суммарное обжатие проволоки.

Данные многочисленных экспериментов показывают, что пластическая деформация поликристаллов металлов и сплавов протекает локализовано на всех этапах волочения, приобретая при этом форму макромасштабного специфического физического процесса, тип которого определяется действующим на соответствующей стадии законом

деформационного упрочнения. В этом случае разномасштабная пространственная локализация является атрибутом деформационных процессов независимо от их природы.

Имеющиеся эмпирические формулы [8] для расчета значения σ_b после волочения с прохождением точки появления сверхнаклепа не дают хорошей сходимости результатов. Требуется либо уточнение имеющихся формул, либо нахождение конкретных зависимостей, учитывающих всю гамму протекающих явлений.

Кроме того, существующая задача точного моделирования технологического процесса волочения с целью последующего анализа результатов его реализации предъявляет высокие требования к соответствующим физическим моделям [9], отражающим соответствующие физические процессы.

Обобщая, можно констатировать, что проблема точного описания происходящих при обработке материалов давлением, а именно при волочении, явлений решена лишь отчасти. Имеющиеся эмпирические формулы не отражают реально происходящих процессов, а позволяют лишь делать приближенные инженерные расчеты. В связи с этим должны быть найдены новые пути для решения данной проблемы. Один из возможных путей решения задачи является рассмотрение происходящих процессов при волочении с позиции синергетики.

Анализ физических факторов, влияющих на процесс волочения

Известно, что фундаментальным принципом самоорганизации служит возникновение нового порядка и усложнение систем через флуктуации состояний их элементов и подсистем. «Благодаря притоку энергии извне и усилению неравновесности отклонения со временем возрастают, накапливаются, вызывают эффект коллективного поведения элементов и подсистем и, в конце концов, приводят к “расшатыванию” прежнего порядка и через относительно кратковременное хаотическое состояние системы приводят либо к разрушению прежней структуры, либо к возникновению нового порядка. Поскольку флуктуации носят случайный характер, то состояние системы после бифуркации обусловлено действием суммы случайных факторов.

Таким образом, самоорганизация, имеющая своим исходом образование через этап хаоса нового порядка или новых структур, может произойти лишь в системах достаточного уровня сложности, обладающих определённым количеством взаимодействующих между собой элементов, имеющих некоторые критические параметры связи и относительно высокие значения вероятностей своих флуктуаций. В противном случае эффекты от синергетического взаимодействия будут недостаточны для появления коллективного поведения элементов системы и тем самым возникновения самоорганизации. Иными словами, недостаточно сложные системы не способны ни к спонтанной адаптации, ни тем более к развитию и при получении извне чрезмерного количества энергии теряют свою структуру и необратимо разрушаются» [10].

Исходя из того, что любой поликристаллический материал имеет сложную структуру и дальний порядок в районе тех или иных структурных несовершенств (дефектов), а процесс волочения изменяет эту структуру и создает дальний порядок во всем сечении, то можно считать, что происходит своего рода процесс самоорганизации.

Поэтому для более полного представления о влиянии воздействий различных физических полей на параметры состояния объекта технологического процесса необходимо исследовать структурные элементы материала объекта, свойства которых лежат в основе синергетических процессов

При этом следует отметить, что реальные кристаллические тела (и тем более поликристаллические) всегда содержат те или иные структурные несовершенства, оказывающие огромное влияние на все структурно чувствительные свойства этих тел.

Рассмотрим основные несовершенства поликристаллических структур по геометрическому признаку:

1. «Точечные дефекты, имеющие размеры, которые в трех измерениях по порядку величины сопоставимы с размером атома. К ним относятся вакансии (дефекты Шоттки), т.е. атомы, находящиеся в междоузлиях; примесные атомы внедрения и замещения, имеющие размер, отличающийся от размера основных атомов, образующих решетку; а также комбинация этих несовершенств» [11].

2. *Линейные дефекты*, имеющие размеры, близкие к атомным в двух измерениях и значительную протяженность в третьем. К этому виду дефектов относятся дислокации, простейшими из которых являются краевые, винтовые и смешанные. Следует отметить, что дислокации легко размножаются и при больших деформациях их плотность может достигать $\sim 10^{12}$ см⁻². Дислокации обладают высокой подвижностью, под действием внешних приложенных напряжений способны к направленным перемещениям и вследствие этого вносят основной вклад в пластическую деформацию кристаллических тел.

3. *Поверхностные (или плоские) дефекты*, имеющие значительную протяженность в двух направлениях. К таким дефектам относятся малоугловые границы между субзернами (субграницы), которые повернуты относительно друг друга на малый угол; большеугловые границы зерен; межфазные границы; дефекты упаковки; двойниковые границы; скопление дислокаций в одной плоскости скольжения и некоторые другие комбинации линейных дефектов.

4. *Объемные дефекты*, имеющие значительную протяженность «во всех трех измерениях. К ним можно отнести скопления точечных дефектов типа пор, а также системы дислокаций, распределенных в объеме кристалла. Другими словами, благодаря наличию в кристалле точечных, линейных и плоских дефектов кристаллическая решетка может отклоняться от идеальной структуры в больших объемах кристалла. Кроме того, к объемным дефектам, например в монокристалле, можно отнести кристаллики с иной структурой или ориентацией решетки» [12]. В этом случае в структуре кристалла будут значительные различия между центром дефекта и матрицей, в которой в свою очередь возникнут смещения атомов, убывающих с удалением от ядра дефекта. Поэтому наличие фаз, дисперсных выделений, различных включений, в том числе неметаллических, неравномерность распределения напряжений и деформаций в макрообъемах также можно отнести к объемным дефектам.

Все перечисленные дефекты кристаллической решетки материала вызывают ее искажение и вследствие этого являются источниками внутренних напряжений, что в конечном счете влияет на пластичность и прочность кристаллических материалов в целом.

При этом следует отметить особую роль дислокаций в рассматриваемом технологическом процессе, связанную с тем, «что взаимодействие движущихся к поверхности дислокаций со ступеньками скольжения, которые под нагрузкой действуют как концентраторы напряжений с областью напряжений ближнего порядка, образует в поверхностной области материала слой с повышенной плотностью дислокаций (debris-слой), действующий как барьер, задерживающий дислокации, генерированные в процессе деформации внутренними источниками» [13].

Иными словами, накопленные в объеме материала дислокации сначала испускаются их источниками, а потом тормозятся в результате реакций с другими дислокациями. При этом само размножение дислокаций и их реакции с другими дислокациями являются случайными процессами.

Следует отметить, что даже в том случае, когда к материалу с дислокациями не приложены никакие внешние напряжения, в нем имеются внутренние напряжения, источником которых являются дислокации, большая часть энергии которых связана с упругими деформациями, распространяющимися далеко в объеме внутренней структуры материала.

«Дислокации также косвенно влияют на свойства кристаллов, зависящих от характера распределения и перемещения в них точечных дефектов (примесей, вакансий,

центров окраски и др.). Это связано прежде всего со следующими факторами: 1 – при формировании характера движения дислокация испускает или поглощает вакансии, изменяя их общее количество в структуре материала; 2 – скорость диффузионного перемещения точечных дефектов вдоль оси дислокации, как правило, больше, чем скорость их диффузии через объём регулярного кристалла» [14].

Как известно, для развития пластической деформации необходимо выполнение силовых условий скольжения дислокаций. В случае поликристаллической структуры, кроме распределенных «внутри» зерен препятствий, характеризующихся величиной σ_0 , появляется новый вид «барьеров», связанных с границами зерен, для «преодоления» которых необходимо выполнение следующего силового условия деформации:

$$r \geq r_0 + r_i^{(b)},$$

где r – внешнее приложенное напряжение, $r_i^{(b)}$ – «сопротивление» границ зерен пластической деформации».

Кроме того, указанная величина может быть представлена в виде суммы дальнедействующего поля r_i^L , связанного с внесенными в границы зерен дефектами, и короткодействующего «геометрического» сопротивления границ r_i^S . При этом существенным остается факт того, что границы зерен сами являются источником дислокаций.

Известно, что существуют закономерности влияния размеров зерна поликристаллических материалов на пластические и прочностные характеристики этих материалов. Например, хорошо известна взаимосвязь напряжения течения σ с размером зерна d в виде соотношения Холла-Петча (ХП):

$$\sigma = \sigma_0 + k \times d^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ – предел текучести; d – размер зерна; k – коэффициент зернограницного упрочнения, характеризующий вклад границ зерен в упрочнение; σ_0 – предел макроупругости.

Следует отметить, что данное соотношение (2) выполняется в широком интервале размера зерна от 10^{-8} м до 10^{-2} м и при различных степенях деформации вплоть до разрушения.

Исходя из соотношения Холла-Петча, можно предположить, что рост σ обусловлен уменьшением размера зерна. Возникающий при этом эффект сверхнаклепа после прохождения определённой точки этой размерности говорит о том, что данная точка является моментом перехода материала технологического объекта из исходного состояния, когда у нее есть две зоны, менее наклепанная сердцевина и более наклепанная периферия, в другое, характеризующееся наличием только одной общей наклепанной зоны. В таком новом состоянии последующий наклеп порождает в материале другие движения дислокаций с уже большей степенью упорядоченности, что приводит уже не к количественным, а к качественным изменениям свойств материала технологического объекта.

Следует добавить, что начало пластической деформации поликристаллических материалов определяется прежде всего напряжением срабатывания источников дислокаций в границах зерен, что говорит о наличии дислокационно-аккумуляционного механизма возможного изменения прочности поликристаллических структур.

«Процесс пластического течения зерен поликристаллических материалов сопровождается непрерывным изменением плотности его структурных факторов, выраженных сложным процессом деформационного упрочнения и разупрочнения, которые обусловлены неустойчивостью дефектной структуры и стремлением системы к минимуму внутренней энергии. Подобные разнонаправленные деформационные процессы в основном обусловлены междислокационными взаимодействиями, но при этом между ними имеется принципиальное различие: для первого вида деформационного процесса

взаимодействия являются атермическим процессом, а для второго – термоактивируемым процессом.

Относительный вклад рассмотренных дефектов кристаллической решетки материала в динамику и кинетику деформации в основном зависит от степени деформации, плотности дефектов, скорости и температуры деформации и др.» [15]. Следует отметить, что в процессе деформации также меняются и размеры самих зерен.

Кроме того, «наблюдаемые изменения величины микротвердости материала в процессе его технологической обработки говорят также о различных по величине барьерах, созданных дефектной структурой. Характеристики приграничных прослоек наряду со структурой самих границ чрезвычайно важны для формирования механических свойств поликристаллических агрегатов, а активное участие границ зерен в пластической деформации связано с прохождением части их сдвига через границы зерен и с организацией скольжения по границам зерен.

При этом преодоление границ зерен сдвигом и распространение части сдвига из одного зерна в соседнее происходят посредством следующих механизмов: 1 – прохождение нескольких дислокаций через границу зерна; 2 – генерация дислокаций с границы зерна под воздействием полей напряжений, возникших в соседнем зерне. В этом случае рассматриваемые процессы в большей мере влияют на пластические свойства, чем на микротвердость».[16]

В случае, если материал объекта является еще и ферромагнетиком, то его можно рассматривать уже в качестве системы с обратной связью, роль которой выполняют главным образом дальнедействующие, следовательно, необменные силы, которые для рассматриваемого случая могут быть магнитными.

При наличии магнитостатической силы, которая относится к магнитным силам, возможно образование доменной структуры, изменяющееся в той или иной степени после каждой ее очередной перестройки. Из этого следует, что перестройка доменной структуры происходит в твердом теле со всеми его дефектами внутреннего строения, т.е. дислокациями, включениями, пустотами, микронапряжениями и т.п.

Таким образом, можно считать, что упругое взаимодействие движущихся доменных границ с дефектами, сопровождающимися в том числе и необратимыми явлениями, например скачками Баркгаузена, а также расход магнитной энергии вызывают соответствующие изменения ориентации и местоположения самих дефектов.

Поэтому одновременно с перестройкой доменной структуры происходит перестройка и дефектной структуры, что сказывается определенным образом при стремлении системы с обратной связью к устойчивому состоянию, т.е. к симметрии динамической петли гистерезиса ферромагнетика. При этом следует отметить существенно разное время перестройки доменной и дефектной структур. Первая, в силу чрезвычайной подвижности доменных границ, фактически «стирается» и воспроизводится в каждом полцикле перемагничивания, а вторая изменяется на протяжении многих циклов, поскольку изменение ориентации и местоположения дефектов подчинено «медленным» законам пластической деформации [17]. Поэтому «повторяемость» актов взаимодействия доменных границ с одними и теми же дислокациями на протяжении сотен и тысяч циклов перемагничивания и является физической предпосылкой для появления возможных изменений состояния пластичности материала технологического объекта.

Обобщая вышесказанное, можно выделить следующие основные элементы структуры материала технологического объекта, состояние которых существенно влияет на параметры технологического процесса обработки материала технологического объекта: 1 – дислокации; 2 – зерна кристаллической структуры; 3 – доменные структуры.

Фактически речь идет об элементах, посредством которых при воздействии на них соответствующих физических полей может быть реализован механизм активации физических эффектов, существенно влияющих на параметры самого технологического

процесса волочения.

Например, известно, что при одновременном воздействии постоянного магнитного поля и «в широком диапазоне частот переменного магнитного поля на металлические материалы прослеживаются различные механизмы бесконтактного преобразования электромагнитных и звуковых волн на границе металла, объединяемые общим понятием электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП). Суть ЭМАП состоит в том, что в среде, не обладающей ни пьезоэлектрическими, ни магнитоэлектрическими свойствами, под действием падающей электромагнитной волны возбуждаются ультразвуковые волны той же или кратной частоты. При этом наличие границы раздела сред как места сосредоточения источника возбуждения имеет принципиальное значение».

«Нетривиальность этого преобразования как физического явления определяется рядом обстоятельств: 1 – электромагнитная волна, падающая на границу раздела, возбуждает акустические колебания электрически нейтрального тела; 2 – наличие реальных механизмов, обеспечивающих взаимное преобразование электромагнитных и акустических волн в металлах; 3 – наличие ряда четко проявляющихся физических эффектов, наблюдаемых при изучении чисто акустических свойств (затухания и скорости распространения ультразвука)» [18].

Кроме того, в магнитоупорядоченных средах распространение акустических волн связано с трансформацией волн на доменных границах и возбуждением связанных магнитоупругих колебаний. Для такого процесса необходимо, чтобы упругие колебания $u(k_n, t)$ сопровождалось колебаниями намагниченности [17]:

$$\Delta M_u(k_n, t) = \lambda \times u(k_n, t), \quad (3)$$

где коэффициент λ зависит от величины магнитоупругого тензора \mathbf{b} , волнового вектора k_n и разности частот спиновой и упругой волн.

Магнитоупругий механизм возбуждения и преобразования акустических волн наиболее эффективен при условии, что амплитуда колебаний намагниченности будет превосходить саму намагниченность или хотя бы будет сравнима с ней:

$$\Delta M_u(k_n, t) / M_u(k_n, t) = \eta(k_n, t) \geq 1, \quad (4)$$

где η – магнитоупругий коэффициент усиления колебаний намагниченности.

В отличие от обычных границ раздела сред, доменные границы могут перемещаться по ферромагнетику под внешним управляющим воздействием, которое может быть магнитным или акустическим полем.

В этом случае колебания доменных границ, возбужденные в образце первичной акустической волной, будут сопровождаться возбуждением вторичных акустических волн. Тогда движущуюся доменную границу можно рассматривать как своеобразную волну возмущения (волну параметра), бегущую в покоящейся среде. Сильная подвижность, а также большая нелинейность такой магнитной подсистемы оказывают значительное влияние на физико-механические характеристики этих материалов. Здесь, в отличие от большинства случаев релаксационных явлений в акустике, представляются возможности управления этими характеристиками (временем релаксации и т.д.) с помощью внешних магнитных полей.

Следует отметить, что при этом благодаря возникновению эффекта магнитоэлектрики устанавливаются взаимодействия между элементами доменной и дислокационной структур ферромагнетика, интенсивность которых и будет определять уровень возможного регулирования этих взаимодействий.

Предполагается, что при соответствующем резонансном режиме воздействия на перечисленные выше структурные элементы материала технологического объекта постоянным и переменным магнитными полями на доменной границе возможно возбуждение первичной акустической волны с определенными параметрами, обеспечивающей появление эффектов магнитоупругого взаимодействия и

электромагнитно-акустического преобразования. Подобное одновременное и согласованное возбуждение большого числа дислокационных сегментов и доменных структур за счет воздействия указанных физических полей активации должно существенно повлиять на начальное состояние параметра пластичности материала технологического объекта.

В случае реализации такого многофакторного резонансного воздействия активации, имеющего «многомасштабный» характер, плотность силы, действующей на кристаллическую решетку металла, в первом приближении можно представить в виде трех слагаемых [19]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_{ST} + \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_{Def}, \quad (5)$$

где $\mathbf{f}_{ST} = \frac{m}{e} \times \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = -\frac{i \times \omega \times m}{e} \times \mathbf{j}$ – сила Стюарта-Толмена, m и e – масса и заряд электрона, ω – частота, \mathbf{j} – плотность тока; $\mathbf{f}_L = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_0] / c$ – сила Лоренца, c – скорость света в вакууме, которая проявляется лишь при наличии постоянного подмагничивающего поля \mathbf{H}_0 и зависит от соотношения глубины скин-слоя и длины упругой волны; \mathbf{f}_{Def} – плотность деформационной силы.

Роль различных компонент силы \mathbf{F} в процессах электромагнитно-акустического преобразования зависит от многих факторов и параметров задачи (частоты, магнитного поля \mathbf{H}_0 , температуры и др.).

Общей чертой Стюарт-Толменовского и Лоренцова взаимодействий является то, что они оба выражаются через плотность переменного тока, возбуждаемого в скин-слое падающей на границу раздела электромагнитной волной.

В случае возбуждения как продольной, так и поперечной плоских монохроматических акустических волн уравнение вынужденных акустических колебаний, распространяющихся от границы раздела, может быть записано в виде [20]:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - v^2 \times \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho \times c} \times [\mathbf{j} \times \mathbf{H}_{CM}], \quad (6)$$

где \mathbf{H}_{CM} – векторная величина напряженности постоянного магнитного поля (магнитное поле ПМ); \mathbf{j} – векторная величина плотности переменного тока в скин-слое; ζ – вектор смещения; v – скорость акустической волны в материале ферритового стрежня; ρ – удельная плотность материала ферритового стрежня; c – скорость света.

Полагая, что переменное магнитное поле (поле возбуждения) изменяется по закону $\exp[i \times (\omega \times t - k \times z)]$, для плотности переменного тока в скин-слое можем записать:

$$\mathbf{j}(z, t) = \frac{(1+i) \times c}{4\pi\delta} \times H_{1m} \times \exp\left[-(1+i) \times \frac{z}{\delta}\right] \times e^{i\omega t}, \quad (7)$$

где H_{1m} – амплитуда переменного магнитного поля; $\delta = c \times \sqrt{2\pi\omega\sigma}$, σ – проводимость металла; ω – циклическая частота.

На расстояниях, превышающих мощность скин-слоя, и с учетом (6) решение уравнения (7) примет вид:

$$\zeta_m = \frac{H_{CM} \times H_{1m}}{4\pi \times \rho \times v \times \omega} \times \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}}, \quad (8)$$

где $\beta = q^2 \times \delta^2 / 2$, $q = 2\pi / \lambda$, λ – длина акустической волны.

Важно подчеркнуть, что указанные явления имеют принципиально динамический характер и представляют значительный интерес для понимания природы пластической деформации твердых тел.

Таким образом, можно с полной уверенностью констатировать, что инициируемое изменение в поликристаллическом материале, как в своеобразной макросистеме, является совокупным следствием изменений ее подсистем и элементов и не определяется простой суммой этих изменений. Иными словами, для рассматриваемого случая подобная макросистема обладает свойством эмерджентности, которое является проявлением, как минимум, трех факторов: 1 – резкое нелинейное усиление ранее малозаметного свойства; 2 – непредсказуемая бифуркация какой-либо подсистемы; 3 – рекомбинация связей между элементами.

Заключение

Проведенный феноменологический анализ основных факторов, ответственных за особенности пластического течения в приповерхностных слоях материалов при их волочении с позиций учета закономерностей зарождения, размножения и активируемого воздействия физическими полями движения дислокаций вблизи свободной поверхности твердого тела, говорит о том, «что основное изменение механизмов деформации с увеличением среднего размера зерна заключается в переходе от зернограничных эффектов, связанных с перемещением свободного и стесненного объемов; зернограничной диффузии и зернограничного скольжения к дислокационному скольжению в теле зерен с постепенно увеличивающимся вектором Бюргерса от частичных дислокаций к полным» [21].

«При определенном граничном значении размера зерна возможны скачкообразные изменения коэффициентов соотношения Холла-Петча, временного сопротивления, скорости распространения автоволн локализованной пластичности, характера кривой пластического течения, зависимости длины автоволны от размера зерна, а также скорости распространения ультразвука» [22].

Одновременное и согласованное резонансное воздействие постоянного и переменного магнитных полей с малыми параметрами на элементы структуры материала технологического объекта вызывает появление эффектов магнитоупругого взаимодействия и электромагнитно-акустического преобразования, которые в свою очередь вызывают следующие физические процессы: 1 – резонансные кооперативные движения дислокаций и доменных границ; 2 – активизация эволюционирующей перестройки дислокационной и доменных структур в приповерхностных и внутренних слоях материала; 3 – инициация взаимодействия дислокационной и доменных структур с границами зерен; 4 – перевод дислокации в режим «дренажных трубок», по которым точечные дефекты довольно легко могут перемещаться на большие расстояния во всем объеме материала.

Наложение подобного комбинированного воздействия указанными физическими полями на технологический процесс волочения длинномерного металлического объекта позволит изменить его соответствующие физико-технические параметры, например, понизить предел текучести $\sigma_{0,2}$ и повысить пластичность материала технологического объекта, что в целом оптимизирует параметры самого технологического процесса.

С полной уверенностью можно констатировать, что характеристики прочности и пластичности материалов являются структурно чувствительными свойствами, в частности, также определяются размером зерна d . Поэтому обоснованным является предположение о существовании более глубокой синергетической связи между автоволновыми характеристиками локализованного пластического течения и размером зерна при ее активации внешними физическими полями.

Поэтому, используя известный понятийный аппарат синергетики, можно более детально описать смены устоявшегося режима волочения, происходящего в определенной точке (точка бифуркации), после которой изменяется закон роста предела прочности [23]. В этом случае происходит переход от симметрии в границах зерна (рассматриваемое

структурное несовершенство) к симметрии по всему сечению, что в свою очередь является фазовым переходом, а параметром порядка – количество дислокаций в материале.

Следует отметить, что для окончательного обоснования и понимания протекающих процессов в пластически деформированных зернах материала требуется более полная информация о поведении размеров зерна и дефектной структуры в результате совместного резонансного активизирующего воздействия постоянного и переменного магнитных полей с малыми параметрами, которую можно получить при проведении соответствующих дополнительных экспериментальных исследований.

Литература

1. Миркин Л.И. Физические основы прочности и пластичности. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 538 с.
2. http://studopedia.net/9_740_volochenie-v-voлокah-s-podvizhnimi-kontaktimi-poverhnostyami.html (дата обращения: 03.06.22).
3. <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497617.html> (дата обращения: 03.06.22).
4. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
5. Гунн Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
6. Юхвец И.А. Волоочильное производство. – М.: Машиностроение, 1987. – 319 с.
7. Калинин Б.А. Физическое материаловедение. – Т. 1. – М.: МИФИ, 2007. – 636 с.
8. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2011. – 126 с.
9. Иванов К.М., Лясников А.В., Новиков Л.А., Юргенсон Э.Е. Математическое моделирование процессов обработки давлением. – СПб.: Инвентекс, 1997. – 102 с.
10. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23697127> (дата обращения: 03.06.22).
11. <http://mash-xxl.info/info/329493> (дата обращения: 03.06.22).
12. <https://mash-xxl.info/info/379698> (дата обращения: 03.06.22).
13. <http://dep.nlb.by/jspui/handle/nlb/42297> (дата обращения: 03.06.22).
14. http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=241069 (дата обращения: 03.06.22).
15. <http://elibrary.ru/item.asp?id=18758057> (дата обращения: 03.06.22).
16. <http://ibooks.ru/reading.php?short=1&productid=341782> (дата обращения: 03.06.22).
17. Брякин, И.В. К вопросу снижения уровня ложных сигналов в феррозондах // Проблемы автоматизации и управления. – Бишкек: Илим, 2009. – №2. – С.125–133.
18. <http://elibrary.ru/item.asp?id=30480050> (дата обращения: 03.06.22).
19. Шуман В.Н. Электромагнитно-акустические преобразования и высокоразрешающие зондирующие системы: новые возможности и новые формулировки старых вопросов // Геофизический журнал. – Киев: 2012. – 34, №3 – С. 32–39.
20. Васильев А. Н., Бучельников В. Д., Гуревич С. Ю. Электромагнитное возбуждение звука в металлах. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 339с.
21. <http://elibrary.ru/item.asp?id=16757206> (дата обращения: 03.06.22).
22. <http://elibrary.ru/item.asp?id=17829408> (дата обращения: 03.06.22).
23. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 226 с.

УДК.: 681.5.01:626.823.5

*Р.А. Акпаралиев, ruslan.akparaliyev@gmail.com**Т.Т. Медеров, mtt-kg@mail.ru**Институт машиноведения и автоматизации НАН КР***АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШЛЮЗА ГИДРОСТЕНДА**

В статье рассматривается разработка автоматизированного управления одного шлюза гидростенда. На гидростенде установлены три шлюза, которые управлялись без автоматизированного процесса. В данной работе описывается разработка автоматизированного управления шлюза с помощью логического модуля Logo и его программы. Рассматривается оснащение шлюза магнитными сенсорами, двигателями, а также разными электротехническими приборами для создания автоматизированного управления. В работе разработан алгоритм действий для автоматизации шлюза и построены схемы блок-команд управлений с распознаванием для языка Logo.

Ключевые слова: шлюз, гидростенд, автоматизированное управление, модуль, Logo, блок, двигатель, сенсор, программа, алгоритм, прибор, схема, команды, позиции.

Введение

Экспериментальный гидростенд предназначен для исследования потока жидкостей, режимов течения потоков, а также для исследования взаимодействий потоков гидравлической жидкости с лопастями гидротурбин микро- и малых ГЭС[1]. Настоящий гидростенд, разработанный кафедрой «Возобновляемые источники энергии» КГТУ им. И. Раззакова, функционирует следующим образом:

Гидравлический насос 3, подключенный к двигателю 4, выкачивает водную массу из нижней емкости 1 в трубопровод 2. Далее гидравлический поток по трубопроводу 7 направляется в верхнюю емкость 8. После наполнения верхней емкости 8 при открытии шлюзов 10,12 водяной поток течет по открытому стеклянному каналу 9 и направляется опять в нижнюю емкость. В таком замкнутом контуре циркулирует гидравлический поток[2].

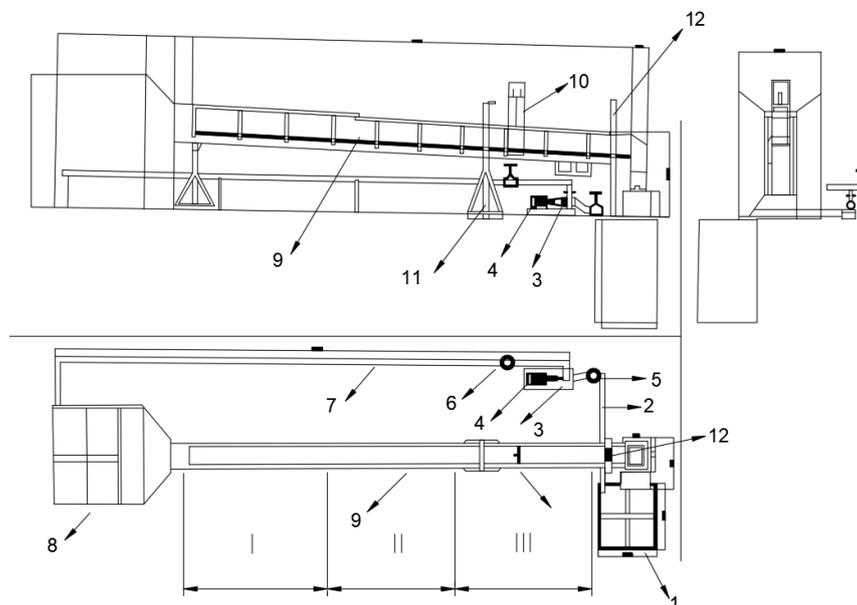


Рисунок 1– Гидростенд:

1–нижняя емкость, 2–трубопровод, 3–насос, 4–трехфазный двигатель, 5–вентиль до насоса, 6–вентиль после насоса, 7– трубопровод, 8–верхняя емкость, 9– открытый канал, 10 –шлюз, 11–регулятор, 12–шлюз

Величина гидравлического расхода в гидростенде регулируется при помощи шлюзов 10,12. Однако шлюзы 10,12 гидростенда регулируются механически (вручную) через

резьбовое соединение. Для равномерного и оперативного регулирования шлюзов необходимо автоматизировать систему работы шлюзов гидростенда.

Постановка задачи

В работе поставлена задача – разработать автоматизированное управление одного шлюза гидростенда с помощью программного продукта и модуля Logo.

Предлагаемый объект и задачи исследования

Сегодня оснащение автоматизированными системами различного рода гидроэнергетических установок, гидростендов является нормой.

В связи с этим приступим к автоматизации одного шлюза 12 гидростенда. На поверхность гидростенда установим малооборотный двигатель, который будет соединен с резьбовым валом шлюза (рис.2). Задача двигателя – автоматически открывать или закрывать шлюз на необходимый уровень, а команда двигателю на открытие или закрытие должна подаваться с помощью определенной компьютерной программы через контроллеры управления.

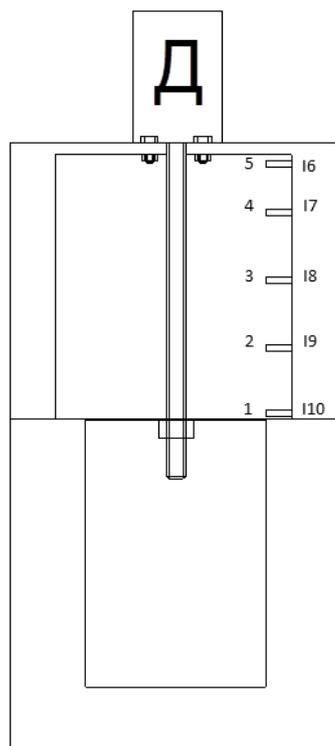


Рисунок 2– Шлюз гидростенда:

где № от 1 до 5 позиции шлюза, от 16 до 110 – позиции 5-магнитных сенсоров на каресе гидростенда

Для автоматизированного управления шлюза необходимо подобрать программный продукт с определенным языком программирования.

В настоящее время в мире науки и техники в области высоких технологий и автоматизации стремительно развивается и для автоматизации механических соединений имеется множество различных программных продуктов и систем управления[3,4].

После изучения и анализа существующих программных продуктов и их систем для автоматизации нами был выбран универсальный логический модуль Logo с программным продуктом[5,8,9]. Привлекательность и доступность данного модуля состоит в том, что он довольно прост в программировании и управлении. Программным языком Logo осуществляется управление через имеющиеся внутри программы командными блоками. С помощью командных блоков можно создавать множество различных схем для управления необходимых устройств и механизмов (рис.3).

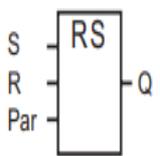
Обозначение в модуле LOGO!	Подключение	Описание
	Вход S	Выход Q устанавливается сигналом на входе S.
	Вход R	Сброс входа Q выполняется подачей сигнала на вход R. Если S и R = 1, выход сбрасывается.
	Параметр	Сохранение: / = нет сохранения R = состояние сохраняется.
	Выход Q	Выход Q устанавливается сигналом на входе S и сбрасывается сигналом на входе R.

Рисунок 3 – Командные блоки языка программирования Logo

Описание алгоритма автоматизированного управления шлюза гидростенда

Для автоматизации шлюза гидростенда необходимо построить алгоритм действий в языковой среде программы Logo.

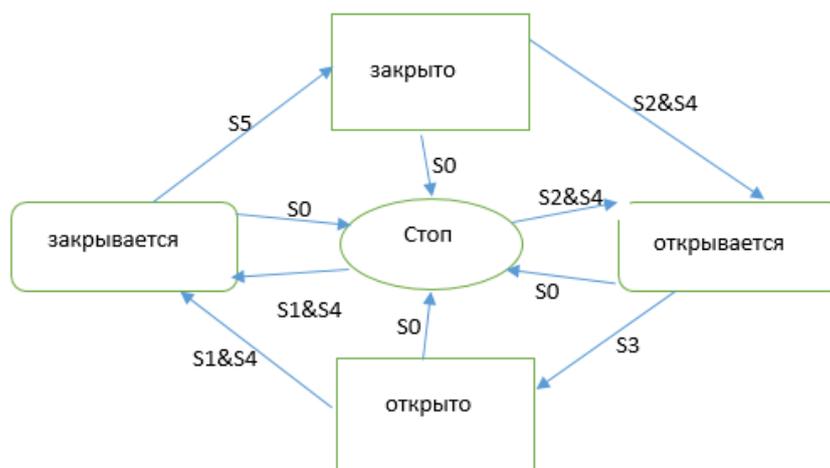


Рисунок 4 – Алгоритм действий для автоматизации шлюза:

S0 – двигатель остановлен, S1 – двигатель вращается направо, S2 – двигатель вращается налево, S3 – шлюз открыт, S4 – 3 позиции, S5 – шлюз закрыт

Из рис. 4, согласно данному алгоритму действий, можно увидеть, как должен функционировать двигатель при автоматизированном управлении, т.е. в какую сторону – вправо или влево – должен вращаться, и соответственно шлюз будет открываться или закрываться, а также в какое время на какой позиции должен останавливаться. Например: при закрытом положении шлюза в позиции S5 задаем команду открыть шлюз S3 до уровня позиции 3, при этом, согласно алгоритму действий, двигатель остановит вращение, когда открытие шлюза дойдет до уровня 3. В таком порядке алгоритма действий мы можем осуществлять автоматизированное управление шлюза гидростенда (рис.4).

На основании разработанного алгоритма действий необходимо построить команду управления для языка Logo, т.е. чтобы Logo распознавал и понимал язык команд управления (табл.1)[6,7,9].

Таблица 1 – Команды для управления двигателя (шлюза)

Д						
№	I6	I7	I8	I9	I10	Направление
1	1	0	0	0	0	Направо
2	0	1	0	0	0	Направо
3	0	0	1	0	0	Откл.
4	0	0	0	1	0	Налево
5	0	0	0	0	1	налево

где от I6 до I10 – позиции 5-магнитных сенсоров на каркасе гидростенда, 1–имеется импульс от сенсора, 0 – не имеется импульса от сенсора, № от 1 до 5 – позиции шлюза, направление-вращение двигателя направо или налево.

Рассмотрим следующую ситуацию в моменте, когда шлюз гидростенда будет находиться на позиции № 3. В этом случае если будет дана команда на направления шлюза на позицию 3, то соответственно будет подаваться импульс от сенсора I8, который обозначает позицию 3. В таком расположении команд двигатель будет в отключенном состоянии(табл. 2).

Таблица 2 – Команды для управления двигателем (шлюза) на позиции №3

Д						
№	I6	I7	I8	I9	I10	Направление
1	1	0	0	0	0	Направо
2	0	1	0	0	0	Направо
3	0	0	1	0	0	Откл.
4	0	0	0	1	0	Налево
5	0	0	0	0	1	налево

Однако при функционировании номеров 2 и 1 двигатель будет вращаться направо до момента, пока не получит команду от сенсоров о достигнутом уровне второй или третьей позиции шлюза (табл. 3).

Таблица 3 – Команды для управления двигателем (шлюза) на позиции №1,2

Д						
№	I6	I7	I8	I9	I10	Направление
1	1	0	0	0	0	Направо
2	0	1	0	0	0	Направо
3	0	0	1	0	0	Откл.
4	0	0	0	1	0	Налево
5	0	0	0	0	1	налево

При вращении двигателя в левую сторону для открытия или закрытия шлюза алгоритм действий схож, как и движение двигателя направо.

На основе построенных команд, указанных в таблицах, необходимо разработать логику действий управления двигателем (шлюза) в программе Logo[9,10]. В программном модуле Logo построим логику функционирования шлюза от позиции 3 на позицию 1(рис. 5). В этом случае I6 будет равен единице, а остальные значения – нулю.

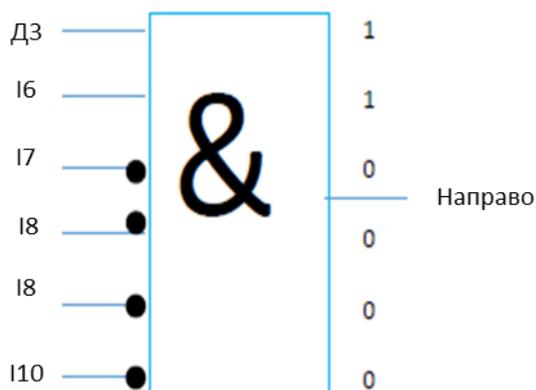


Рисунок 5 – Блок модуля управления шлюза в среде Logo

В таком же логическом порядке можем построить логику автоматизированного управления шлюза на различные позиции в программном продукте Logo (рис. 6).

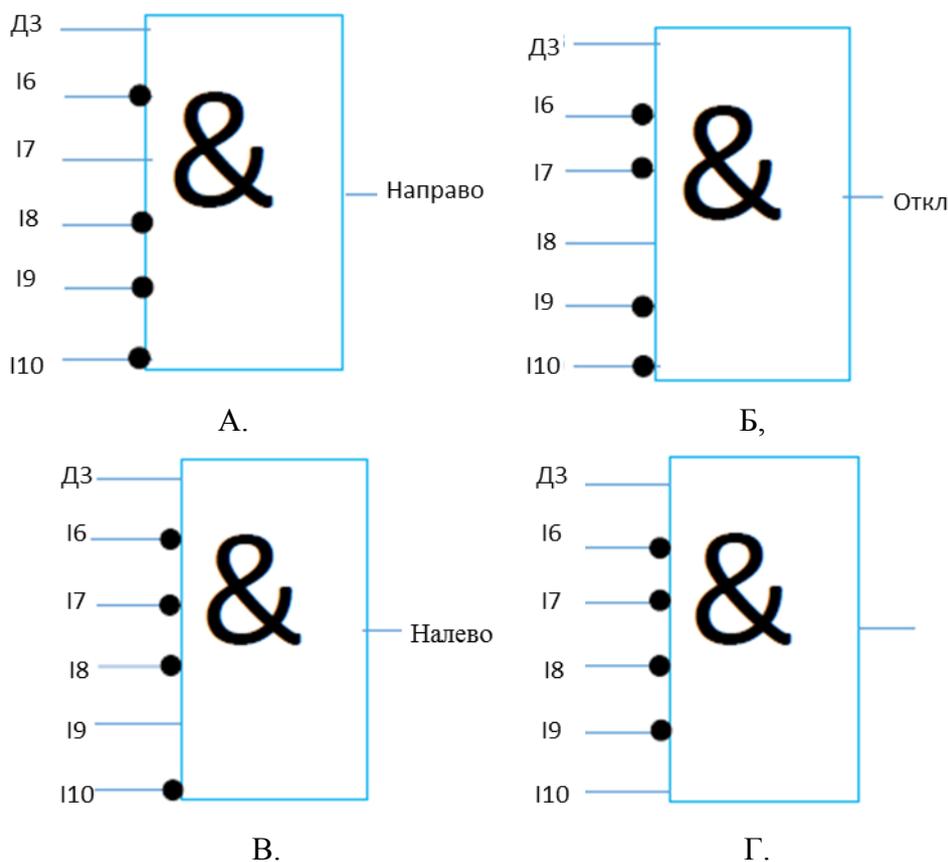


Рисунок 6 – Блок модуля управления шлюзов в среде Logo:

А – направление шлюза на позицию 2, Б– направление шлюза на позицию 3, В– направление шлюза на позицию 4, Г– направление шлюза на позицию 5

Основываясь на таком принципе построения алгоритма, была создана единая логическая схема автоматизированного управления шлюза гидростенда (рис.7).

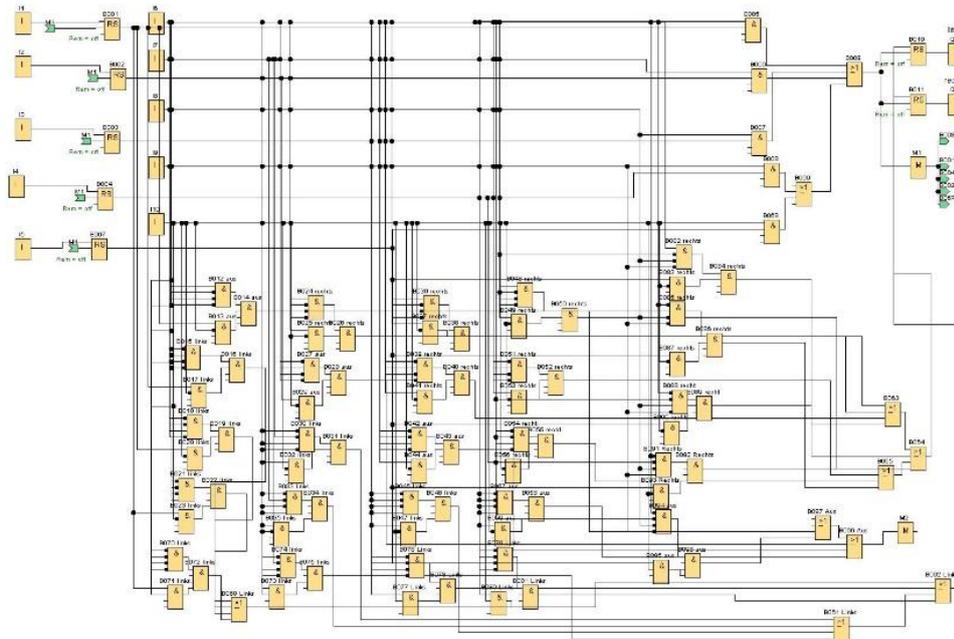


Рисунок 7 – Разработанная схема в программе Logo для автоматизированного управления шлюза

Для автоматизированного управления шлюза гидростенда произведена сборка, монтаж и наладка электро- и автоматизированных приборов в единый щит (рис. 8).



Рисунок 8 – Электрический щит с Logo- модулем
Слева направо: инвертор, модуль Logo, расширяющий модуль Logo, 2 магнитных пускателя по порядку, автоматический выключатель для 3- фазного тока, автоматический выключатель для питания розеток, пульт управления

На рис.9 показан установленный двигатель на поверхность гидростенда, а также магнитные сенсоры, принимающие и подающие сигналы для определения уровня позиции шлюза.

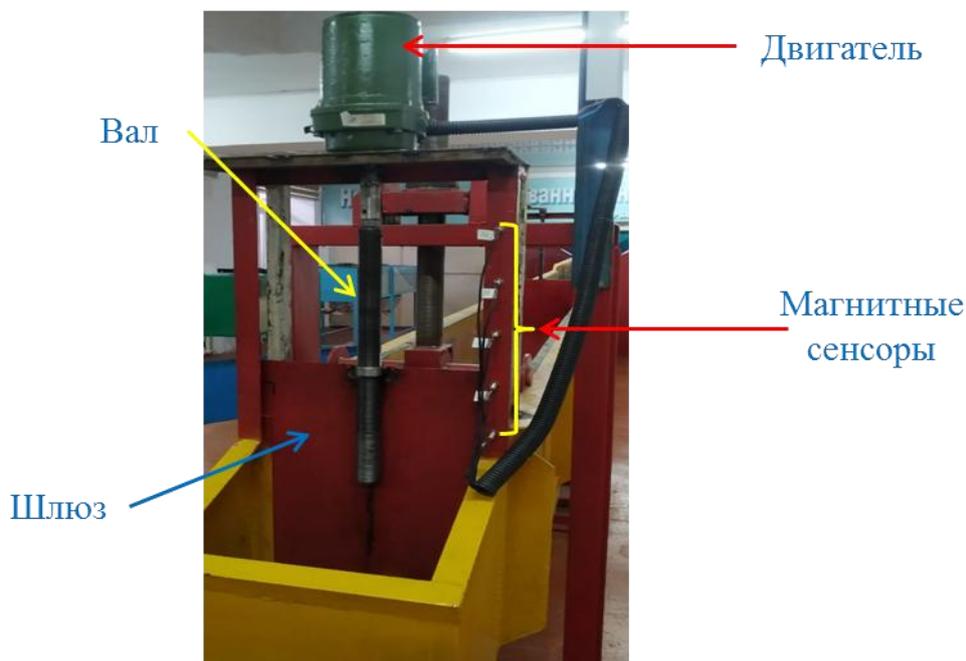


Рисунок 9 – Шлюз гидростенда

Заключение

Таким образом на основе построенной схемы управления шлюза в программном продукте Logo осуществляется автоматизированное управление шлюза гидростенда, которое может на необходимом уровне открывать или закрывать шлюз согласно заранее заданным позициям. Проведенные тестовые испытания шлюза в холостом ходу (без воды) и во время натурных испытаний при полном наполнении канала гидростенда водой показали работоспособность автоматизированного управления шлюза. Также должны отметить, что реагирование сигналов магнитных сенсоров происходит мгновенно. Однако эти работы пока являются предварительными, и при дальнейших исследованиях планируется автоматизировать остальные шлюзы гидростенда. В этом случае должны рассматривать функционирование автоматизированного управления всех шлюзов в едином комплексе.

Литература

1. Акпаралиев, Р.А. Экспериментальный стенд для микро-ГЭС. /Акпаралиев Р.А.// Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. –2009. –№19. – С. 24–26.
2. Акпаралиев, Р.А. Автоматизация гидротехнического стенда. /Акпаралиев Р.А.// Европейское научное объединение. Научные дискуссии в эпоху глобализации и цифровизации. –2021. – №11(80). – С.103–105.
3. https://www.siemens-pro.ru/docs/logo/02_LOGO_2014_ru.pdf(Дата обращения: 10.11.21)
4. Обозов,А.Дж. Структурная схема управления БГУ с учетом графика нагрузки потребителя / Насирдинова, С, М., Салбаев А.Н. // Проблемы автоматизации и управления. –2021.–№1(40). – С. 54–60.

5. https://www.siemens-pro.ru/docs/logo/01_LOGO!_r_.pdf (Дата обращения: 20.04.22).
6. Патент на программу расчета и выбора типа гидротурбин для микро-ГЭС. / Т.Ж. Жабудаев, М.С. Асанов, А.Дж. Обозов, А.С. Мусабаев // Государственная патентная служба КР. – Свидетельство на программу для ЭВМ №266 от 19.03.2013 г.
7. Жабудаев Т.Ж. Структурная модель алгоритма расчета микро-ГЭС с учетом гидрологических параметров малых водотоков. / М.С. Асанов, А.Дж. Обозов, Т.Ж. Жабудаев // Известия КГТУ. –2013. – №28. – С. 152–159.
8. <https://www.siemens-pro.ru/components/logo8.htm>(Дата обращения: 17.05.22)
9. Смирнов В.В. Система управления специальным станком на основе логического контроллера Logo/Смирнов В.В// Научный альманах. – 2015. – №9(11). –С.817–820.
10. Барданов А.И., Выдрова А.А. Частичная замена релейно-контакторной системы управления УУС на логические модули «Logo!»/ 3 Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – СПб.:2017. –С.302-1–302-5.

Рецензенты номера:

д.т.н., проф. Брякин И.В.

д.т.н., проф. Бочкарев И.В.

д.т.н., проф. Лыченко Н.М.

д.т.н., доц. Бакасова А.Б.

к.т.н. Верзунов С.Н.

Евгений Козак (Senior-разработчик, бывший ведущий инженер проекта Samsung Pay)

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Литературный редактор Е.В. Комарова

Компьютерная верстка А.У. Касимова

Подписано к печати 01.17.2022 г. Формат 84/108 1/16

Печать офсетная. Объем 14 усл. п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «ИМА»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265