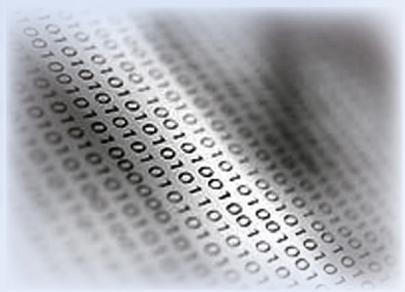
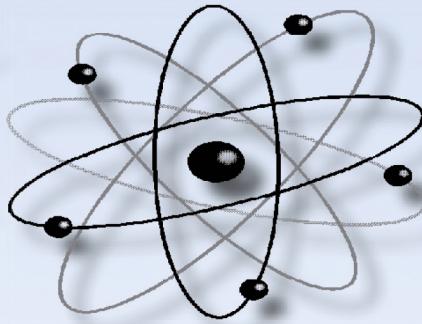


Учёные записки

ISSN 2076-4359

№ 1 (81)
2025

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.

Отделы журнала «Управление», «Вычислительная техника и информатика», «Машиностроение», «Культурология и искусствознание» включены в перечень изданий ВАК РФ.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГУ», находящейся на сайте <https://uzknastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27
Телефон для справок: +7 (4217) 528-548

Адрес редакции: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, д. 50, ауд. 508

Индекс журнала в каталоге Роспечать: 66090.
Цена свободная.
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КнАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Журнал основан в 2010 году

Редакционная коллегия:

Главный редактор журнала:	Алексей Иванович Евстигнеев, доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru
Заместитель главного редактора журнала:	Александр Витальевич Космынин, доктор технических наук, профессор. E-mail: avkoms@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:	Евгения Павловна Иванкова, кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцента. E-mail: lmk@knastu.ru
Литературный редактор:	Татьяна Николаевна Карпова. E-mail: karpovat@list.ru
Технический редактор:	Татьяна Николаевна Карпова. E-mail: karpovat@list.ru
Перевод на английский язык:	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Дизайн и верстка:	Оксана Вадимовна Приходченко, кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru
Менеджер информационных ресурсов:	Татьяна Владимировна Степанова. E-mail: osnid@knastu.ru
Администратор сайта:	Оксана Вадимовна Приходченко, кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru

Серия: «Науки о природе и технике»

Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»	Евгения Павловна Иванкова, кандидат технических наук, доцент. E-mail: peit@knastu.ru
Отделы:	
1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов)	Сергей Иванович Феоктистов, доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru Сергей Борисович Марынин, доктор технических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru
2. Энергетика (2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы)	Константинос Константинович Ким, доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru Александр Владимирович Сериков, доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru
3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)	Вячеслав Алексеевич Соловьев, доктор технических наук, профессор. E-mail: kerapi@knastu.ru Андрей Юрьевич Торгашов, доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru
4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)	Валерий Иванович Одиноков, доктор технических наук, профессор. E-mail: osnid@knastu.ru Александр Витальевич Космынин, доктор технических наук, профессор. E-mail: avkoms@knastu.ru
5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)	Борис Яковлевич Мокрицкий, доктор технических наук, профессор. E-mail: boris@knastu.ru Владимир Сергеевич Щетинин, доктор технических наук, доцент. E-mail: schetinin@mail.ru
6. Материаловедение и химические технологии (2.6.17 - Материаловедение)	Эдуард Анатольевич Дмитриев, доктор технических наук, профессор, E-mail: rector@knastu.ru Олег Викторович Башков, доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru
7. Математика и механика (1.1.8 - Механика деформируемого твёрдого тела)	Анатолий Александрович Буренин, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru Константин Сергеевич Бормотин, доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru Олег Викторович Башков, доктор технических наук, профессор, E-mail: bashkov_ov@mail.ru Олег Евгеньевич Сысоев, доктор технических наук, профессор, E-mail: sia@knastu.ru

Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»

Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»	Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru
Отделы:	
1. Культурология и искусствознание (5.10.1 - Теория и история культуры, искусства)	Яна Станиславовна Крыжановская, доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowskaia.yana2012@yandex.ru Евгения Валерьевна Савелова, доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. Виктория Юрьевна Прокофьева, доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев, доктор философских наук, профессор.
2. Психология и педагогика (5.8.1 - Общая педагогика, история педагогики и образования)	Татьяна Евгеньевна Наливайко, доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru
3. История (5.6.1 - Отечественная история)	Жанна Валерьяновна Петрунина, доктор исторических наук, профессор. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)

Содержание

УПРАВЛЕНИЕ

Гудим А. С., Савельев Д. О., Плохотнюк В. В.	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ	
НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	4

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Лясковский И. Е., Гордин С. А.	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАЦИЕЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ	
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	12
Чернышова Д. В., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одиноков В. И.	
ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ	
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ	17
Кольева Н. С., Панова М. В., Федоров Д. Л., Перестенко К. А., Ярочкина Е. Д.	
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ	
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ СТЕНДА УПРАВЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ	24
Носков С. И., Медведев А. П.	
ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОРОДНОЙ ВЛОЖЕННОЙ	
КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ВТОРОГО ТИПА	29
Базилевский М. П.	
АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО ВИДА	
МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИЙ	35
Петрова А. Н., Фролов Д. О., Дмитриева Т. Л.	
АНАЛИЗ МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ	
ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ	45
Гончаренко В. А., Хомоненко А. Д., Абу Хасан Р.	
ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ	
RAID-МАССИВОВ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯ	50

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шиляев А. В., Бахматов П. В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ТАКТИЧЕСКИМ	
ПРИЁМОМ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЁТНЫХ ДАННЫХ	61
Саблин П. А., Косачев К. Д.	
ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ	
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ	
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ	67

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Паньшин И. О., Ри Э. Х., Ким Е. Д., Попова В. С.	
ВЛИЯНИЕ ТИТАНА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МИКРОТВЁРДОСТЬ ВЫСОКОЭНТПИЙНОГО	
СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti), СИНТЕЗИРОВАННОГО СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ	74
Каримов Ш. А., Шакиров Ш. М., Джемилов Э. Ш., Белова И. В.	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА	
ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ПРИПЕКАНИИ	80
Старцев Е. А., Бахматов П. В.	
АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ СВАРОЧНЫХ	
ФЛЮСОВ И ШЛАКОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	85

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.	
ГЕНЕТИКА «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»	93
Дзюба В. А., Чепизубов И. Г., Дун Гоцай	
ЭФФЕКТИВНОЕ АРМИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ С УЧЁТОМ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК	103
Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г	
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВ ЭНЕРГИИ И МАССЫ ФОТОНА	
С ПОЗИЦИЙ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ	109

УПРАВЛЕНИЕ CONTROL

Гудим А. С., Савельев Д. О., Плохотнюк В. В.
A. S. Gudim, D. O. Savelyev, V. V. Plokhotnyuk

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

INTELLIGENT SYSTEM FOR COMPENSATION OF NONLINEARITIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

Гудим Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета энергетики и управления Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Aleksandr S. Gudim – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Power Engineering and Management Faculty, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Савельев Дмитрий Олегович – старший преподаватель кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», руководитель Центра робототехники Ресурсного центра Технопарка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Dmitriy O. Savelyev – Senior Lecturer, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Head of Robotics Center of Technopark Resource Center, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Плохотнюк Василий Владимирович – студент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Vasily V. Plokhotnyuk – Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kerapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлен анализ программного модуля, реализующего сложные законы управления для компенсации существенных сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления. Отражены результаты исследования компенсации нелинейных элементов при помощи интеллектуальных систем на основе мягких вычислений. Рассмотрено негативное влияние нелинейного элемента вида «зона насыщения». Представлены возможности автоматического синтеза параметров нечёткого логического регулятора и его настройки на желаемый способ интеграции в объект управления. Приведены полученные в ходе исследования оценки качества регулирования объекта и их сравнительные характеристики ошибок регулирования системы.

Summary. The paper presents the analysis of the software module realizing complex control laws for compensation of significant associated nonlinear elements of automatic control systems. The results of research of compensation of nonlinear elements by means of intelligent systems based on soft computing are reflected. The negative influence of nonlinear element of the type «saturation zone» is considered. The possibilities of automatic synthesis of parameters of fuzzy logic regulator and its adjustment to the desired way of integration into the control object are presented. Estimates of the object regulation quality and their comparative characteristics of the system regulation errors obtained in the course of the research are given.

Ключевые слова: интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, программный модуль, компенсация нелинейностей.

Key words: intelligent control system, fuzzy logic controller, software system, compensation of nonlinearities.

УДК 681.5.01:658.5

Введение. В современном мире с учётом развития технологий микропроцессорной техники и развития интеллектуальных технологий повышаются требования, предъявляемые к системам автоматического управления. Одним из показателей качества в АСУП и АСУТП является точность позиционирования и время переходного процесса. Несмотря на это реальным объектам

управления присущи нелинейные свойства, которые оказывают своё влияние на переходные процессы, ухудшая показатели качества управления объектом.

Для уменьшения негативного влияния сопутствующих нелинейных элементов (НЭ) на систему управления объектом применяют различные методы [1; 2; 3] и способы [4], позволяющие компенсировать их воздействие. Однако применение того или иного способа компенсации нелинейных элементов основывается на степени формализации объекта управления. Ввиду повышения сложности математического описания объектов управления традиционные способы компенсации могут быть неприменимы. Таким образом, целесообразно применение интеллектуальных систем управления в качестве средств для компенсации сопутствующих нелинейных элементов и уменьшения их отрицательного влияния на переходные процессы объекта регулирования. В рамках примера в статье рассматривается уменьшение влияния нелинейного элемента зоны насыщения, которое может оказывать своё воздействие на исполнительные звенья объекта регулирования, тем самым уменьшая динамику системы либо вызывая потерю устойчивости. Наличие такого нелинейного элемента приводит к сильному затягиванию переходных процессов и, как следствие, к снижению быстродействия системы при больших внешних воздействиях. Использование интеллектуальной системы позволит добиться значительного ускорения переходных процессов при подаче упреждающих сигналов управления с нечёткого логического регулятора, являющегося компенсатором нежелательных возмущающих воздействий объекта регулирования.

Для получения максимального быстродействия при наличии таких нелинейностей в статье рассматривается использование нечёткого логического компенсатора (далее НЛК) [5], который позволит создавать форсирующие воздействия, уменьшая сигнал задержки и ошибку управления объектом.

В статье рассматриваются программная реализация НЛК, его описание и реализация автоматической настройки под различные виды нелинейных элементов систем автоматического управления [6; 7]. Настройка нечёткого логического регулятора производится посредством расширенного способа компенсации сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления [4–7].

Имитационное моделирование. Построение программного модуля базируется на реализации интеллектуального алгоритма. В нём отражены основные этапы синтеза параметров и настройки нечёткого логического регулятора для компенсации существенных нелинейностей систем автоматического управления. Основная программа представляет собой пользовательский интерфейс с кнопками, которые отвечают за выбор имитационной модели, её параметров, а также автоматическую настройку нечёткого логического компенсатора. Дополнительные настройки позволяют произвести выбор и детальные настройки пользователем способа компенсации, а также предоставить визуализацию переходных процессов и параметров компенсатора.

На рис. 1 представлено главное окно программного модуля, содержащее пять основных групп. Первая группа – «Модель нелинейного элемента» – содержит окно со списком и возможностью выбора математической модели системы со статическим нелинейным элементом. Как пример выбран статический нелинейный элемент вида «Зона насыщения», чьё негативное влияние на системы управления описано ранее.

Группа «Параметры модели» позволяет установить шаг моделирования и время расчёта. После производства математических расчётов появляется возможность просмотра различных характеристик в разблокированной группе «Визуализация», а также возможность ручной или автоматической настройки НЛК в группе «Настройка нечёткого логического регулятора» (см. рис. 2).

Нелинейная характеристика зоны насыщения, продемонстрированная на рис. 3, используется для проверки работоспособности программного модуля и применимости расширенного способа компенсации нелинейностей.

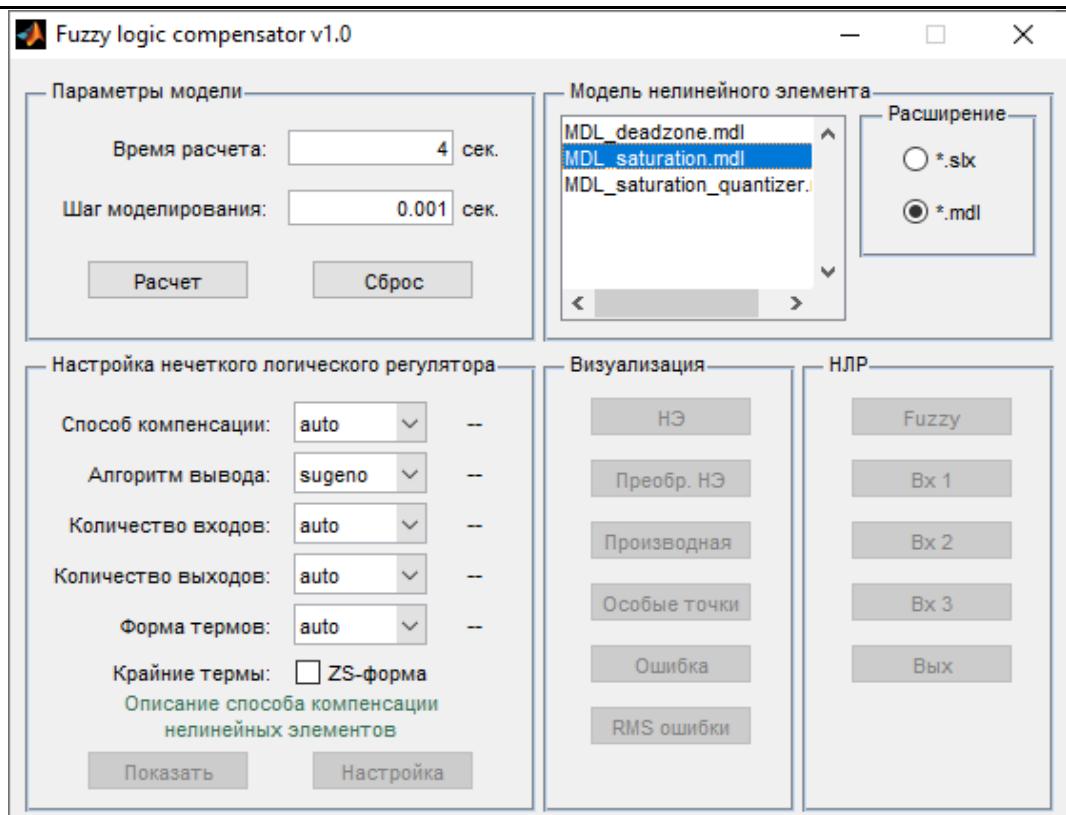


Рис. 1. Главное окно программного модуля

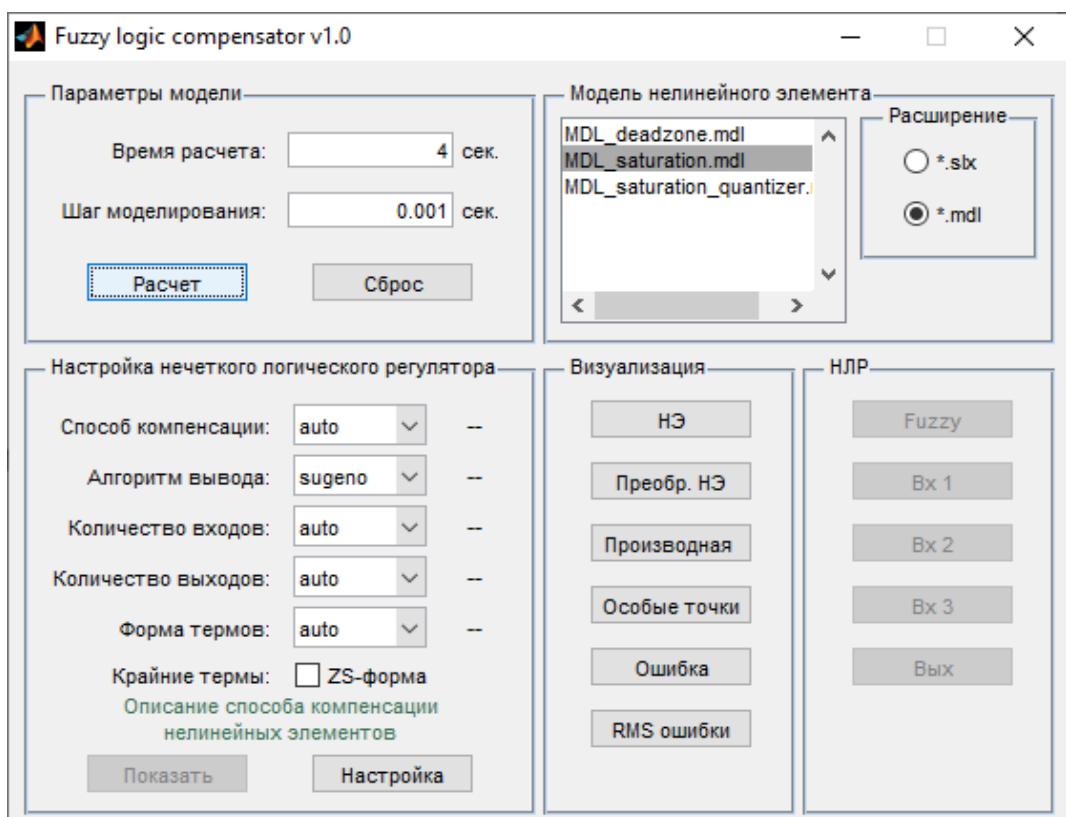


Рис. 2. Главное окно программного модуля с рассчитанной моделью НЭ

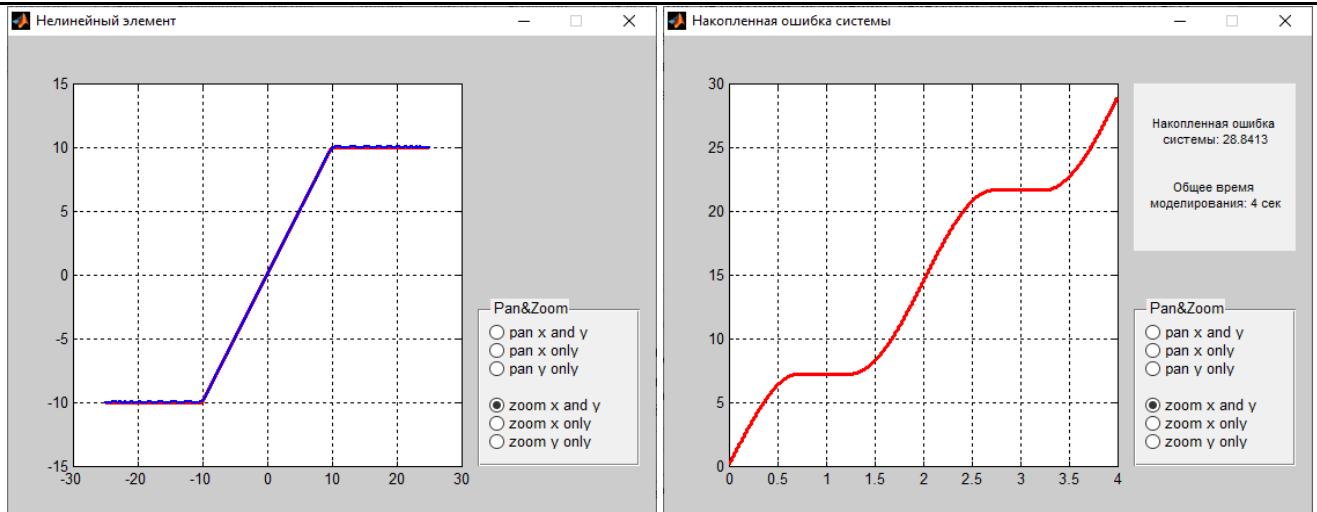


Рис. 3. Примеры графических окон НЭ вида «Зона насыщения»
и накопленной ошибки системы рассчитанной модели

После выбора способа интеллектуальной компенсации нелинейных элементов появляется возможность получить входные и выходные параметры нечёткого логического регулятора [8; 9]. Для получения сравнительных характеристик была произведена настройка НЛК по каждому из трёх способов компенсации нелинейных элементов. Нечётким логическим выводом выбран алгоритм Сугено нулевого порядка с автоматически настроенным количеством входов и выходов (см. рис. 4). Форма термов задана комбинацией Гауссовых функций принадлежности, а крайние термы принимают Z- и S-образную форму.

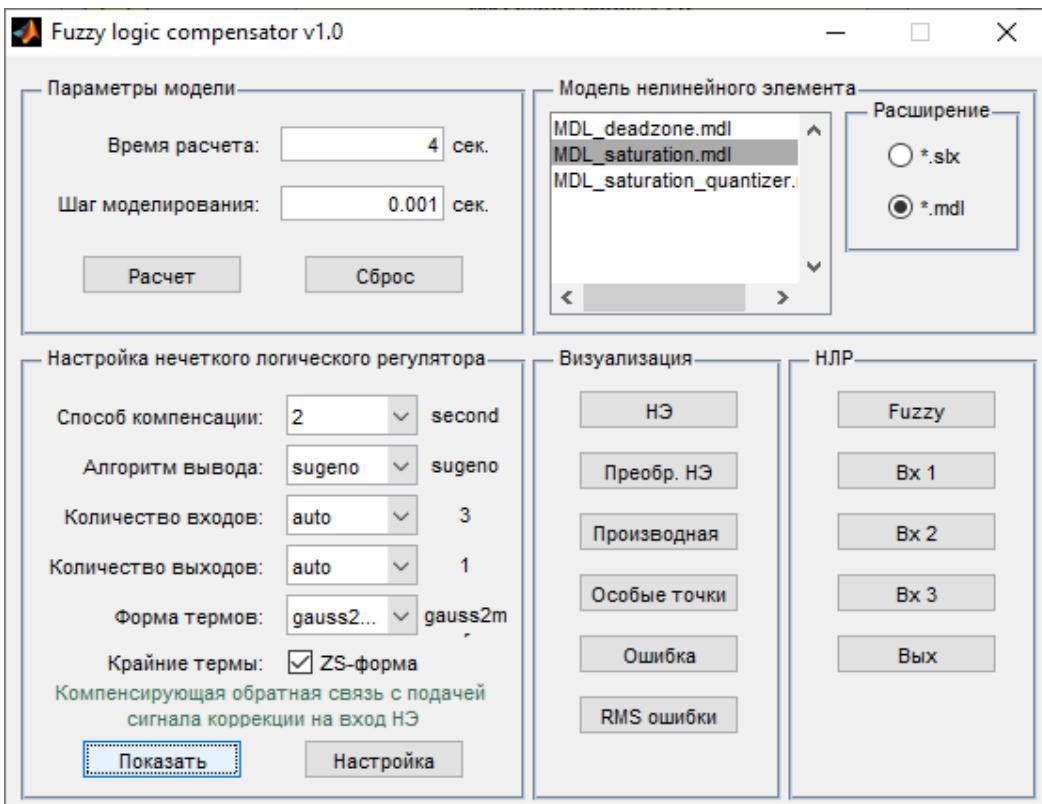


Рис. 4. Главное окно программного модуля с ручной преднастройкой НЛК

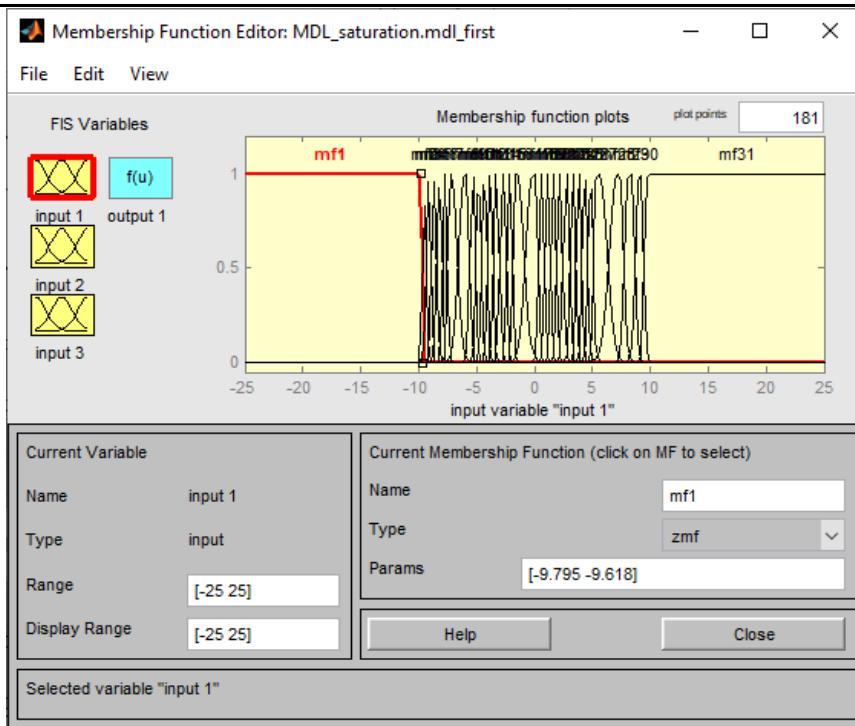


Рис. 5. Распределение функций принадлежности первого входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

Аналогичным образом синтезируются нечёткие системы с алгоритмом вывода Мамдани. Контроллер нечёткой логики использует сигнал ошибки и настраивает НЛК таким образом, чтобы максимально снизить ошибку системы. Это в свою очередь влияет на количество лингвистических переменных [6; 7], которые добавляются в зависимости от сложности нелинейного элемента (НЭ): input1, input2 и input3 (см. рис. 5-8).

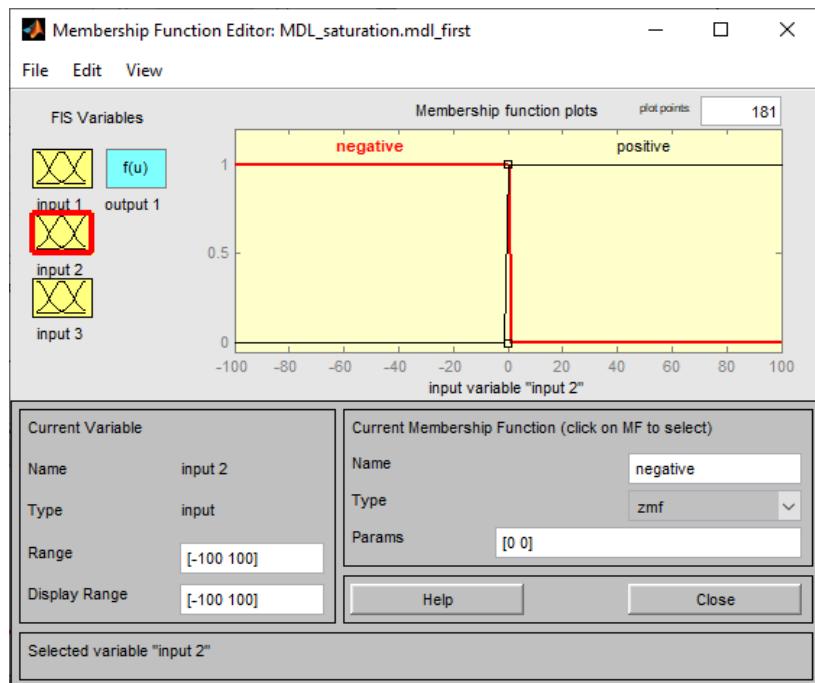


Рис. 6. Распределение функций принадлежности второго входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

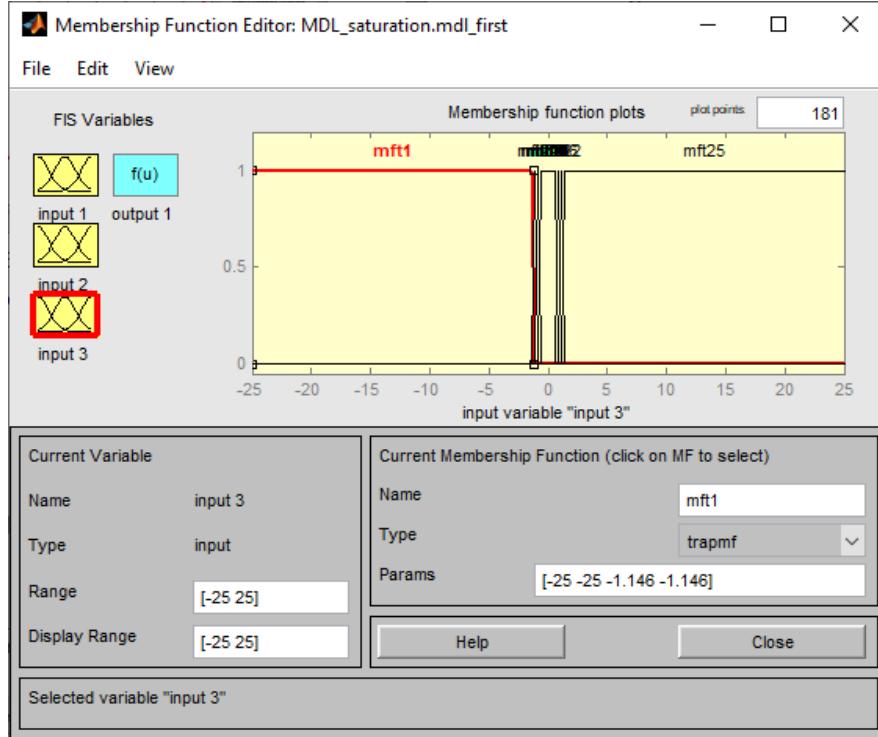


Рис. 7. Распределение функций принадлежности третьего входа НЛК для первого и второго способа компенсации НЭ

После моделирования системы с упреждающими воздействиями НЛК были получены графики среднеквадратической ошибки системы для каждого из рассмотренных способов компенсации НЭ, представленные на рис. 9.

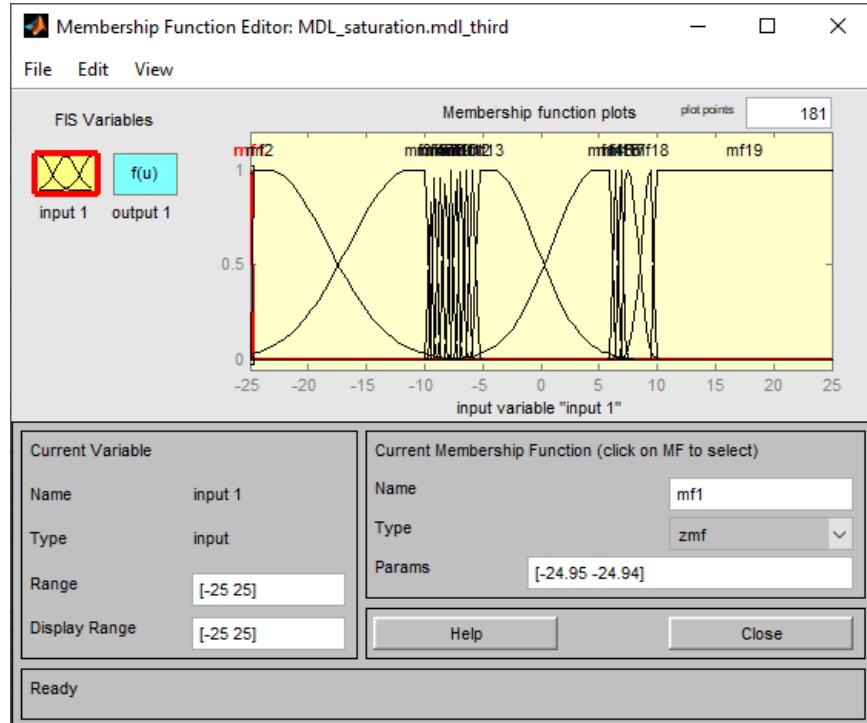


Рис. 8. Распределение функций принадлежности входа НЛК для третьего способа компенсации НЭ

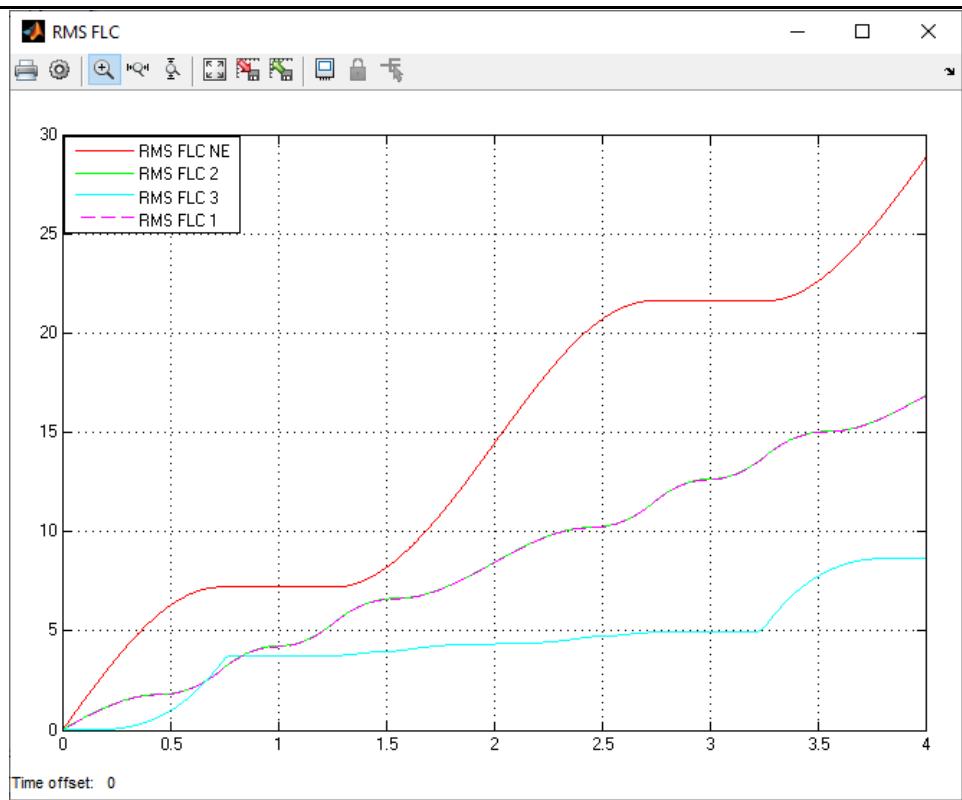


Рис. 9. Среднеквадратическая ошибка системы по времени

На рис. 9 представлены следующие переходные характеристики:

- RMS FLC NE – среднеквадратическая ошибка нелинейности;
- RMS FLC 1 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с последовательно включённым регулятором;
- RMS FLC 2 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с включённым регулятором по обратной связи;
- RMS FLC 3 – среднеквадратическая ошибка нелинейности с параллельно включённым регулятором.

При коррекции нелинейного элемента вида «зона нечувствительности» среднеквадратическая ошибка за время равное 4 с составила:

- исходный сигнал объекта управления $RMS(\theta(t)) = 28,84$;
- коррекция путём введения прямой связи на вход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 16,81$;
- коррекция путём введения обратной связи на вход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 16,83$;
- коррекция путём введения прямой связи на выход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 8,67$.

Заключение. На основании анализа работы программного модуля можно утверждать, что разработанное программное обеспечение позволяет по желанию пользователя производить выбор способа компенсации исходя из заданных требований.

Программный модуль обеспечивает автоматический процесс настройки НЛК для ослабления влияния сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления. Заложенная в структуру программного модуля многофункциональность приёмов компенсации нелинейностей обеспечивает более высокую точность компенсации сопутствующих нелинейных элементов систем автоматического управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Купова, А. В. Программная реализация нечёткого регулятора компенсирующего устройства на языке функциональных блоков / А. В. Купова, А. В. Купов, В. А. Соловьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № V (77). – С. 36-44.
2. Гайдук, А. Р. Методы синтеза нелинейных систем управления (квазилинейный подход): учеб. пособие для вузов / А. Р. Гайдук. – Санкт-Петербург: Лань, 2025. – 288 с.
3. Попов, Е. П. Приближённые методы исследования нелинейных автоматических систем / Е. П. Попов, И. П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 790 с.
4. Гудим, А. С. Нечёткие алгоритмы компенсации нелинейностей САУ / А. С. Гудим, И. В. Зайченко, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – 2005. – № 2 (10). – С. 89-101.
5. Способ компенсации статических нелинейностей с использованием мягких вычислений / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный, С. И. Сухоруков // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 35-42.
6. Savelyev, D. O. Software Fuzzy Logic Compensator of Nonlinear Elements of Automatic Control System / D. O. Savelyev, A. S. Gudim // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018, Vladivostok, 03-04 октября 2018 года. – EN: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8602829. – DOI 10.1109/FarEastCon.2018.8602829.
7. Савельев, Д. О. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечёткого подхода / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, С. П. Черный // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4 (42). – С. 149-158.
8. Савельев, Д. О. Программный модуль нечёткого логического компенсатора нелинейных элементов / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, В. Н. Хрульков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы междунар. науч.-практ. конф., Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 года / С. В. Белых (отв. ред.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 128-131.
9. Savelyev, D. O. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (Automatic Control System) elements / D. O. Savelyev, A. S. Gudim, D. B. Solovev // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019, Vladivostok, 01-02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725324. – DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725324.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА
COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Лясковский И. Е., Гордин С. А.
I. E. Lyaskovsky, S. A. Gordin

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАЦИЕЙ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

MODELING OF GENERATION CONTROL PROCESS IN ISOLATED THERMAL POWER SYSTEMS

Лясковский Игорь Евгеньевич – аспирант Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).

Igor E. Lyaskovsky – Post-Graduate Student, Far Eastern State University of Railway Transport (Russia, Khabarovsk).

Гордин Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Sergey A. Gordin – PhD in Engineering, Associate Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация. Объектом исследования в статье являются изолированные системы теплоснабжения Хабаровского края. В статье рассмотрен вопрос синтеза модели управления генерацией тепла в топке твердотопливного котла с автоматизированной периодичной подачей топлива с целью регулирования расхода воздуха и, как следствие, снижения потерь с уходящими газами.

Summary. The object of research in the article is the isolated heat supply systems of the Khabarovsk Territory. The article considers the issue of synthesizing a model for controlling heat generation in the furnace of a solid-fuel boiler with automated periodic fuel supply in order to regulate air flow and, as a result, reduce waste gas losses.

Ключевые слова: система теплоснабжения, удельный расход топлива, энергоэффективность.

Key words: heat supply system, specific fuel consumption, energy efficiency.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-29-01232, <https://rscf.ru/project/22-29-01232/>.

УДК 697.341

Введение. Изолированные теплоэнергетические системы (ИТЭ) обеспечивают теплом различных потребителей в населённых пунктах: общественные и производственные здания, жилые дома – и имеют множество различных схем компоновки в зависимости от используемого оборудования.

Основным источником тепловой энергии в населённых пунктах Хабаровского края являются водогрейные котельные, работающие на каменном или буром угле (70,1 %) [1]. Отпуск тепловой энергии осуществляется по открытой схеме, при которой вода, поступающая из тепловой сети на источник теплоснабжения (котельную), направляется непосредственно в котёл для нагрева.

Такая схема применяется из-за низкой стоимости, минимального числа оборудования и простоты обслуживания. Следствием этого является использование лишь локальных систем управления подачей угля в топку котла по заданной периодичности, а остальные процессы (регулирование расхода воздуха, объём подпитки сырой воды и т. п.) выполняются персоналом котельной в ручном режиме.

Это приводит к снижению эффективности генерации тепловой энергии: большое количество котельных Хабаровского края (36 %) имеет КПД ниже 60 % при паспортном КПД используемых на таких котельных котлов 80..86 % [2].

Основным фактором снижения КПД водогрейного или парового котла являются потери с уходящими газами [3], поэтому все основные решения, направленные на повышение КПД котлов, как правило, ориентированы на доведение до возможного минимума данных потерь. Для этого уменьшают объём отходящих газов за счёт двух факторов: снижения избытка воздуха и снижения температуры отходящих газов. Поскольку внесение изменений в конструкцию действующего водогрейного котла невозможно, то единственный путь оптимизации процесса сжигания топлива определяется его правильной эксплуатацией, в том числе внедрением различных систем управления, регулирующих объём отходящих газов.

Для построения модели процесса управления генерацией в изолированных теплоэнергетических системах рассмотрим типовую для Хабаровского края водогрейную котельную, оборудованную котлами типа КВм. Подача топлива в котёл осуществляется автоматизировано с помощью шурующей планки. Каждый котёл оборудован независимым дутьевым вентилятором и дымососом.

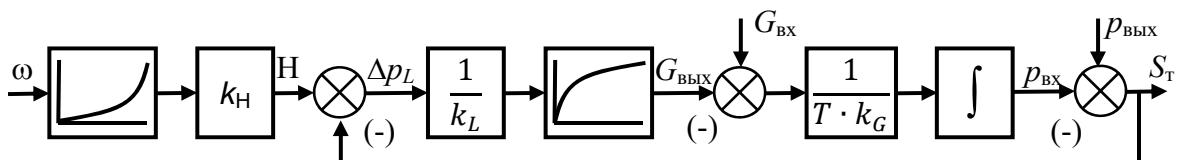
Система автоматического управления таким водогрейным котлом должна обеспечивать выработку требуемого объёма тепловой энергии при обеспечении максимального КПД установки. При этом при определении КПД установки будем учитывать не только соотношение полезно используемого тепла к располагаемому теплу топлива [4], но и затраты энергии на работу вспомогательного оборудования: шурующей планки, дутьевого вентилятора и дымососа.

В существующих системах автоматического управления генерацией в изолированных теплоэнергетических системах изменение соотношения «топливо – воздух» осуществляется по параметру разряжения в дымовом тракте после котла, как правило, без корректировки по составу отходящих газов.

Наиболее простым способом изменения количества воздуха, поступающего в топку котла, является регулирование с помощью шиберов, т. е. изменением аэродинамического сопротивления газовоздушного тракта. При этом регулирование мощности двигателей вентилятора и дымососа не осуществляется, что ведёт не только к увеличению электрической энергии на работу вспомогательного оборудования, но и становится причиной ускоренного износа механики газовоздушного тракта [5].

Использование вместо шиберов частотных регуляторов (ЧР) позволяет согласовать работу дымососа и дутьевого вентилятора и одновременно снизить энергопотребление электроприводов.

Автоматическое управление (АУ) в частотных регуляторах дутьевого вентилятора и дымососа построено на основе ПИД-регулятора по следующей схеме, т. е. обеспечивается заданная величина разряжения. Модель тракта регулирования разряжения в топке котла, используемая для построения систем АУ для таких систем [6], приведена на рис. 1.



H – напор развиваемый дымососом; Δp_L – сопротивление тракта; $p_{\text{вх}}$ – давление в топке;

S_t – разрежение в топке; $p_{\text{вых}}$ – атмосферное давление; $G_{\text{вх}}$, $G_{\text{вых}}$ – весовой расход

дымовых газов на входе в тракт и выходе из него; ω – скорость вращения дымососа;

k_L – коэффициент сопротивления газового тракта; k_H – коэффициент напора;

T – постоянная времени изменения состояния вещества;

$k_G = G_{\text{ном}}/p_{\text{ном}}$ – коэффициент расхода

Рис. 1. Модель тракта регулирования разряжения в топке котла

При равномерном поступлении топлива в топку котла соотношение воздуха и топлива также сохраняется постоянным, и для данной модели источником задания может являться уставка,

зависящая от скорости поступления топлива. При порционной подаче топлива соотношение воздуха и топлива является переменной величиной, зависящей от этапа горения, и, как следствие, задание разрежения в топке котла также является величиной переменной. Это требует применения более сложных моделей управления, основанных на анализе процесса горения периодично поступающего топлива [7].

В предложенной модели при периодичном поступлении твёрдого топлива в топку котла были выделены следующие этапы горения:

1. нагрев и разжигание новой порции топлива;
2. активное горение с постепенным уменьшением объёма горящего топлива.

Первый этап – нагрев и разжигание новой порции топлива – необходимо максимально сокращать, поскольку тепло, затрачиваемое на нагрев новой порции топлива, снижает полезный отпуск уже горящего топлива, и, как следствие, на этом этапе снижается температура воды на выходе из котла. Поэтому на данном этапе необходимо максимально активное поступление воздуха в топку котла от дутьевого вентилятора (раздувание) при обеспечении разрежения для предотвращения поступления дымовых газов в помещение котельной. Индикатором завершения первого этапа является максимальное снижение кислорода в уходящих газах при их максимуме температуры.

На втором этапе происходит постепенное выгорание топлива, требующее для поддержания высокого КПД работы котла постепенного снижения расхода воздуха.



Рис. 2. График изменения температуры уходящих газов

Для иллюстрации процесса горения при периодичном поступлении твёрдого топлива в топку котла приведём графики изменения температуры уходящих газов (см. рис. 2) и коэффициента избытка воздуха (см. рис. 3), полученные при режимных испытаниях на котельной п. Пивань Комсомольского района Хабаровского края (котёл типа КВм-0,63 с периодичной загрузкой топлива посредством шурующей планки без регулирования расхода воздуха через топку котла).

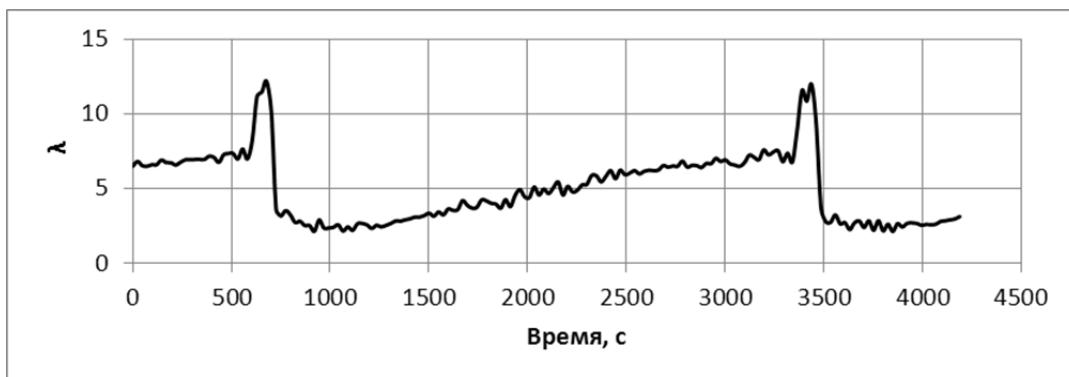


Рис. 3. График изменения коэффициента избытка воздуха в уходящих газах

Таким образом, на основе анализа цикличности процессов, проходящих в топке котла при периодичном поступлении топлива, была построена модель управления процессом горения, обеспечивающая возможность снижения избытка воздуха в топке и, как следствие, уменьшения потери с уходящими газами [8].

Модель управления генерацией тепла в топке котла приведена на рис. 4. Регулирование расхода воздуха через дутьевой вентилятор может быть выполнено как по заданной циклограмме, так и на основе измерения различных физических величин (температуры или состава дымовых газов).

Поскольку размер порции топлива при работе шурующей планки варьируется в небольших пределах, циклограмма регулирования поступающего воздуха определяется по результатам режимных испытаний котла.

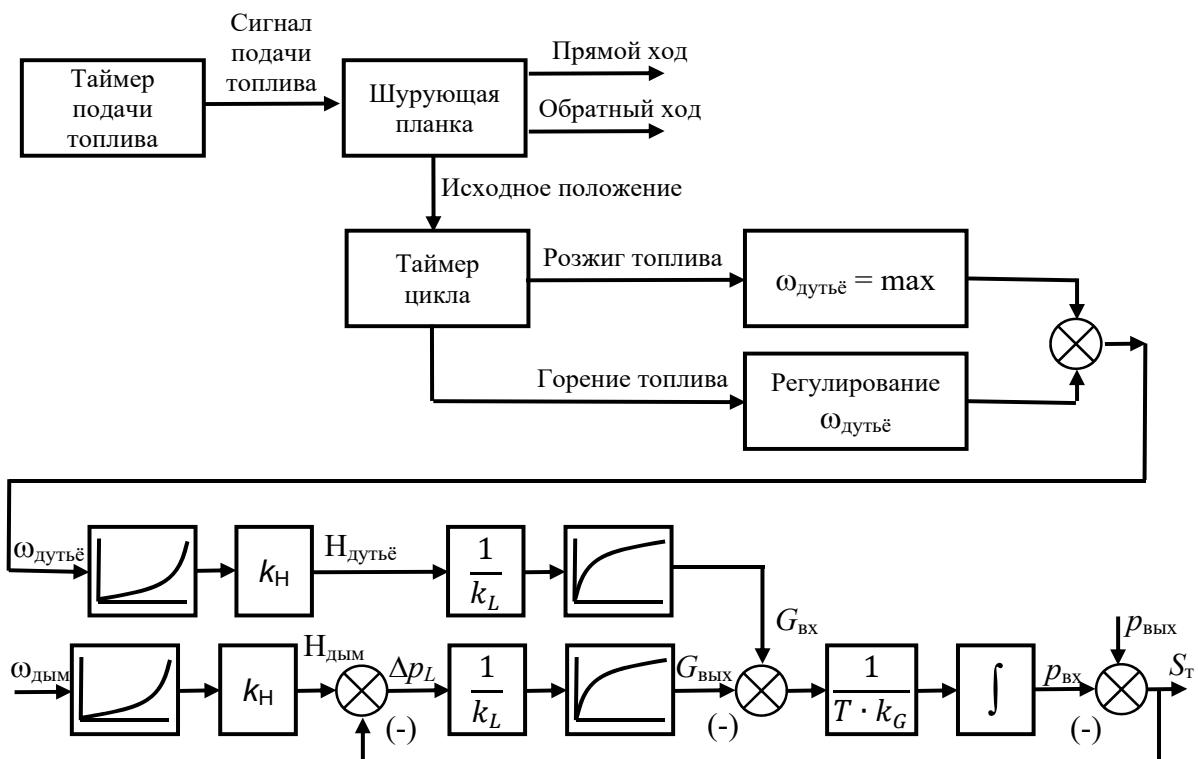


Рис. 4. Модель управления генерацией тепла в топке котла

Заключение. Предложенная модель процесса управления генерацией в изолированных теплоэнергетических системах позволяет рассмотреть вопрос синтеза автоматизированной системы управления на базе промышленного контроллера для управления твердотопливным котлом с периодичной автоматизированной подачей топлива.

Применение данной модели для котлов с ручной подачей топлива вызывает трудности, поскольку при ручной подаче сложно контролировать объём поступающего топлива и, следовательно, алгоритмы управления должны быть более адаптивны [9].

ЛИТЕРАТУРА

- Гордин, С. А. Анализ эффективности котельных Хабаровского края / С. А. Гордин // Мониторинг. Наука и технологии. – 2023. – № 1 (55). – С. 98-103.
- Гордин, С. А. Совершенствование технологий для повышения эффективности изолированных систем централизованного теплоснабжения / С. А. Гордин, И. Е. Лясковский // Мониторинг. Наука и технологии. – 2023. – № 3 (57). – С. 31-36.
- Kagan, G. M. (Ed) (1998). Thermal Calculation of Boilers (Normative Method). St. Petersburg, Russia: Vseross. Teplotekh. Inst.



4. Gordin, S. A. Modeling the combustion process of solid fuel boilers / S. A. Gordin, O. V. Kozlova, I. V. Zaychenko // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 136-146. – DOI 10.1007/978-3-030-69421-0_15.
5. Корреляционный анализ связи между температурой наружного воздуха и потребляемой мощностью тягодутьевыми механизмами отопительных котельных / С. А. Гордин, И. В. Зайченко, В. В. Бажеряну [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 3. – С. 110-112.
6. Марченко, М. А. Система регулирования разрежения котлоагрегата на основе асинхронного управляемого электропривода: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Марченко Михаил Александрович. – Новосибирск, 2012. – 183 с.
7. Gordin, S. A. Improving the efficiency of autonomous heat supply systems by implementing integrated control systems / S. A. Gordin, A. A. Sosnin, I. V. Zaychenko // Journal of Physics: Conference Series. – Vladivostok, 2021. – P. 012087. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012087.
8. Методы обработки экспериментальных данных / С. А. Гордин, А. А. Соснин, И. В. Зайченко, В. Д. Бердоносов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – 75 с.
9. Моделирование развитой нечёткой системы управления многосвязным объектом в условиях многокритериальности / С. П. Черный, К. А. Емельянов, Н. Н. Духнов [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 62-69.

Чернышова Д. В., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Одиноков В. И.
D. V. Chernyshova, A. I. Evstigneев, E. A. Dmitriev, V. I. Odinokov

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ

EVALUATION OF RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF CRACK RESISTANCE OF CYLINDRICAL AND SPHERICAL CERAMIC SHELL FORMS

Чернышова Дарья Витальевна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)373-43-38. E-mail: daracernysova744@gmail.com.

Darya V. Chernyshova – Post-graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)373-43-38. E-mail: daracernysova744@gmail.com.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант отдела организации и сопровождения научной и инновационной деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

Alexei I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Consulting Professor, Department of Organization and Support of Scientific and Innovative Activities, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)175-60-15. E-mail: diss@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(914)184-36-01. E-mail: rector@knastu.ru.

Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(914)184-36-01. E-mail: rector@knastu.ru.

Одиноков Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор-консультант отдела организации и сопровождения научной и инновационной деятельности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. +7(912)271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Valerii I. Odinokov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Consulting Professor, Department of Organization and Support of Scientific and Innovative Activities, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. +7(912)271-88-58. E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Аннотация. Представлены результаты численного моделирования напряжённо-деформированного состояния цилиндрических и сферических керамических оболочковых форм при формировании в них стальных отливок.

Summary. The results of numerical simulation of the stress-strain state of cylindrical and spherical ceramic shell forms during the formation of steel castings in them are presented.

Ключевые слова: керамическая оболочковая форма, стальная отливка, трещиностойкость, напряжения.

Key words: ceramic shell mold, steel casting, crack resistance, stresses.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00214,
<https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.*

УДК 539.5,621.74.045

В машиностроении, авиастроении и ракетно-космической технике всё больше применяются разногабаритные отливки из различных сплавов, полученные литьём по выплавляемым моделям. Такие отливки имеют не только переменные кривизну и толщину, но и переменную геометрию.

Оболочковые формы (ОФ) для получения таких отливок изготавливаются многослойными, иногда десяти-, двадцатислойными, что приводит к значительному росту себестоимости их изготовления из-за сложности, трудоёмкости и продолжительности процесса. Потери таких оболочковых форм очень высоки из-за их низкой трещиностойкости, особенно если трещинообразование в них происходит на этапах прокаливания и заливки их жидким расплавом.

Причиной образования микро- и макротрещин в оболочковых формах является высокий уровень их напряжённо-деформированного состояния (НДС), возникающего за счёт температурного и силового воздействия на технологических операциях прокаливания форм, заливки их жидким расплавом и затвердевания отливки.

Напряжённое состояние оболочковой формы связано прежде всего с системой взаимодействующих компонентов (тел); наиболее широко распространённой в промышленном производстве является четырёхкомпонентная система, а именно: жидкий металл (ЖМ) – твёрдый металл (ТМ) – оболочковая форма – опорный наполнитель (ОН). Как частный случай из системы может быть исключён опорный наполнитель (вариант безопочной заливки ОФ жидким металлом).

В настоящее время вычисление и прогнозирование уровня напряжённого состояния керамических оболочковых форм основывается на экспериментальных и эмпирических данных упрощённых математических моделей и опыте технологов. Поэтому для определения параметров управления процессом формирования отливок в оболочковых формах требуется огромный массив экспериментальных и натурных производственных данных, что сопряжено со значительными материальными и временными затратами.

Процесс деформирования оболочковых форм при формировании в них отливок сопряжён с накоплением и ростом уровня их напряжённого состояния, что в конечном итоге может привести к их разрушению. Поэтому поиск оптимальных термомеханических параметров внешних и внутренних воздействий является актуальным направлением исследований.

На сегодня имеются решения ряда частных модельных задач по формированию отливок в оболочковых формах, например цилиндрических. Решение задачи оптимального деформирования оболочковых форм при получении в них других геометрических (сферических и других конфигураций) отливок позволяет в дальнейшем перейти от моделирования процессов простых конфигураций к получению типовых моделей отливок (цилиндр, сфера) с реальными геометрическими формами, а именно блоков отливок.

Полученные результаты научного исследования позволяют решать новые технологические задачи формообразования ОФ для получения качественных отливок, определять оптимальные параметры технологического процесса, предложить новые структуры ОФ и режимы внешних воздействий, что имеет большое значение для промышленного производства.

Наиболее изученным в литье по выплавляемым моделям с помощью математического моделирования является НДС оболочковой формы при формировании в ней отливки в виде цилиндра.

Стойкость к трещинообразованию ОФ оценивается по их НДС, возникающему в форме при её заливке жидким металлом и последующем охлаждении и кристаллизации в ней получаемой отливки.

Расчётная схема с учётом осевой симметрии процесса математического моделирования напряжённо-деформированного состояния ОФ, заформованной в ОН в виде цилиндра (стояка) со сферической донной частью (зумпфом), приведена на рис. 1.

Расчётная схема с осевой симметрией моделирования процесса трещиностойкости керамической ОФ при формировании в ней стальной отливки в виде шара приведена на рис. 2.

Вызывает как научный, так и практический интерес сравнение показателей трещиностойкости керамической ОФ при затвердевании в ней цилиндрических и шарообразных стальных отливок.

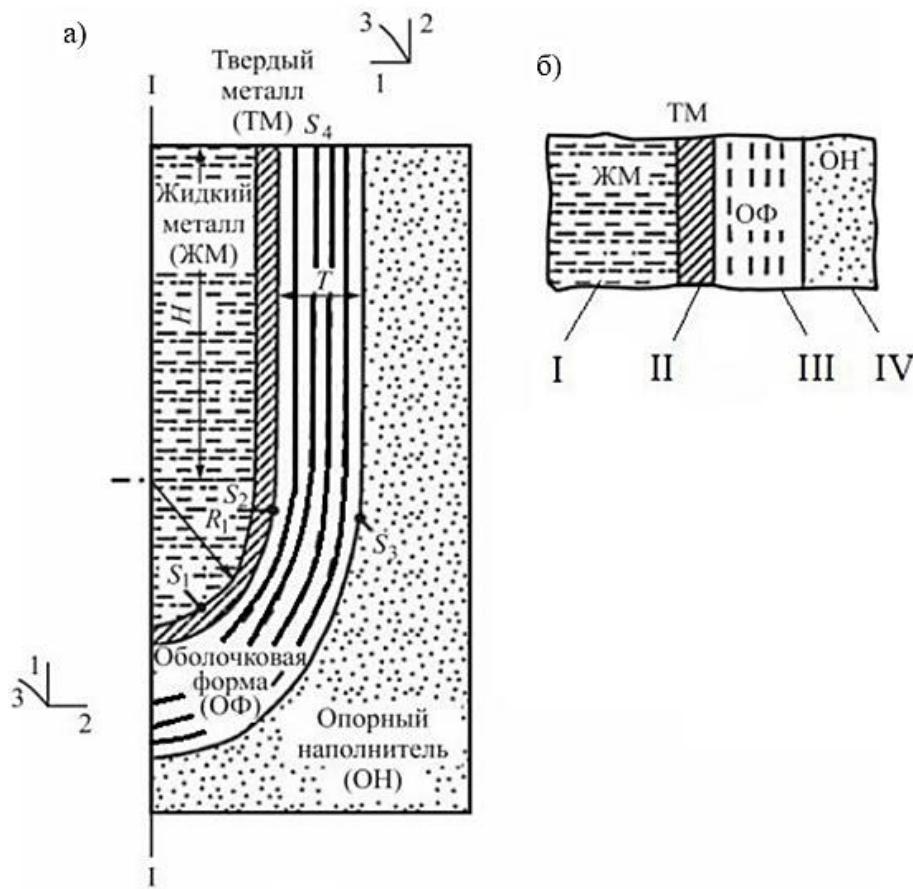


Рис. 1. Расчётная схема системы ЖМ-ТМ-ОФ-ОН с указанием поверхностей к граничным условиям задачи: а – меридианное сечение: S_1 – поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла; S_2 – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы; S_3 – внешняя поверхность оболочковой формы; S_4 – свободная поверхность торца литниковой чаши оболочковой формы; T – толщина оболочковой формы; H – высота цилиндрической части стояка оболочковой формы; R_1 – радиус сферической части стояка (зумпфа); 1, 2, 3 – оси координат; I-I – ось симметрии; б – схема моделирования областей системы ЖМ-ТМ-ОФ-ОН

При решении такой задачи по расчёту НДС оболочковой формы для цилиндрической и шарообразной отливок использовался апробированный численный метод, описанный в работе [1], согласно которому исследуемую область разбивают на конечное число ортогональных элементов. Для каждого элемента записывается и решается с учётом начальных и граничных условий сформулированная система уравнений, которая решается по разработанной в [1] методике и составленному алгоритму. В результате решения получены величины напряжений и перемещений по граням каждого элемента и средняя температура по каждому элементу на временном шаге охлаждения.

Построение математической модели для отливки «шар» подобно построению математической модели для отливки «цилиндр». Отличие состоит только в геометрии отливок и граничных условиях задачи.

Сравнение результатов НДС ОФ для цилиндрических и шарообразных отливок проводилось для приблизительно одинаковых технологических условий формирования отливок.

В расчётах для отливки «цилиндр» принятые следующие геометрические параметры ОФ: $T = 5$ мм; $H = 50$ мм; $R_1 = 20$ мм; а для отливки «шар»: $T = 5$ мм; $R_1 = 20$ мм. Задавались следующие временные интервалы в секундах (Δt_n): 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 2; 5,10; 8; 3; 5; 10; 15; 20 с («цилиндр») и 0,1; 1,0; 2,0; 4,0; 5,0; 5,0; 10,0; 1,0; 2,0; 5,0; 1,0; 1,0; 3,0; 3,0; 5,0; 10,0; 10 с («шар»).

Для цилиндрических ОФ наибольшие значения в их сечении имеют напряжения σ_{22} . Напряжения σ_{11} почти на порядок меньше, чем σ_{22} . Напряжения σ_{33} на 5...10 % меньше по величине, чем σ_{22} , и также изменяются во времени и по толщине ОФ.

Заливка стали в цилиндрическую холодную ОФ принята из соображения, что это самый «жёсткий» вариант. Если ОФ при такой заливке не разрушится, то и в других случаях заливки (горячая ОФ, заливка Al-сплава) она гарантированно не будет разрушаться.

На рис. 3 приведены графики температур (а) и эпюры напряжений σ_{22} по сечениям ОФ (б) в двух временных интервалах: $\tau = 1,65$ с, $\tau = 29,65$ с. Второе значение времени $\tau = 29,65$ с выбрано из условия, что при большем времени τ значения σ_{22} по сечению ОФ будут уменьшаться. Сжимающие напряжения σ_{22} имеют наибольшие значения в начальный момент во внутреннем слое ОФ, соприкасающемся с жидким металлом. Растворяющие напряжения σ_{22} достигают наибольшей величины при $\tau = 29,65$ с в сечении стыка сферической и цилиндрической частей ОФ.

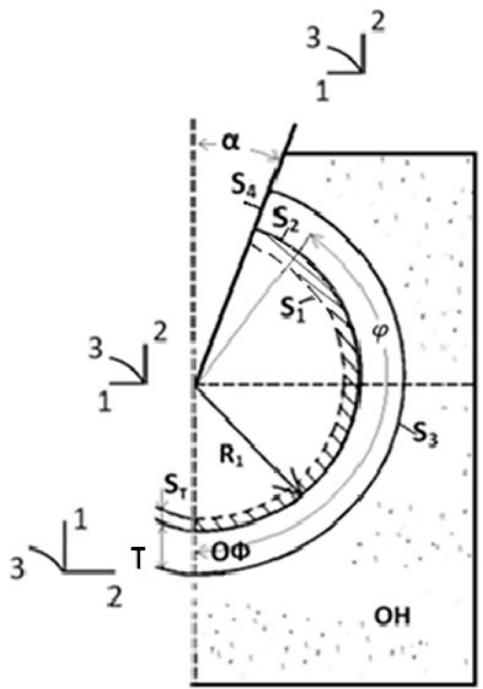


Рис. 2. Расчёчная схема шарообразной ОФ, заформованной в ОН и залитой ЖМ с учётом осевой симметрии:
 S_1 – внутренняя поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;
 S_2 – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и оболочковой формы; S_3 – внешняя поверхность оболочковой формы; S_4 – свободная поверхность торца литниковой чаши ОФ; R_1 – радиус шарообразной отливки; S – толщина оболочки формы; S_T – толщина корочки затвердевшего металла; α – угол наклона литниковой воронки; φ – угол охвата поверхности оболочковой формы опорным наполнителем

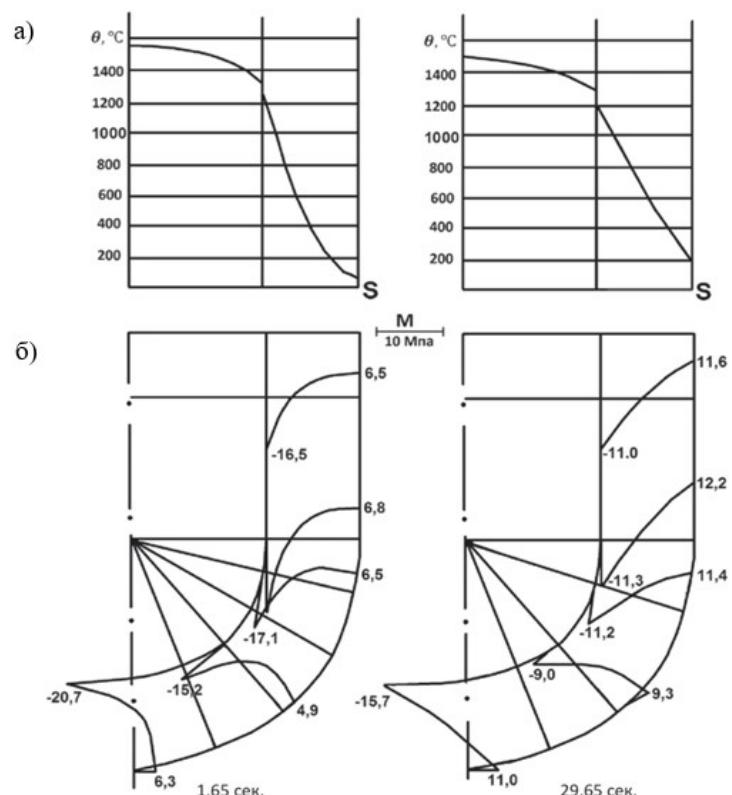


Рис. 3. Распределение температуры (а) и эпюры напряжений σ_{22} (б) по толщине ОФ со схемой, в разных сечениях и в динамике её охлаждения после заливки сталью в холодную форму при $\tau_{\text{охл}} = 1,65$ с и $\tau_{\text{охл}} = 29,65$ с

На рис. 4 приведены эпюры нормальных напряжений σ_{22} и σ_{33} в ОФ при времени охлаждения отливки $\tau = 1,12$ с и $\tau = 7,12$ с.

При анализе НДС в сферической ОФ при затвердевании в ней стальной отливки установлено, что наиболее опасными для трещинообразования являются сжимающие напряжения σ_{22} и σ_{33} на поверхности облицовочного слоя ОФ, контактирующего с жидким металлом в начальный момент заливки и охлаждения, которые могут превосходить даже предел прочности керамики при сжатии.

Их величина значительно больше (по модулю), чем величины напряжений на поверхности наружного (внешнего) слоя ОФ.

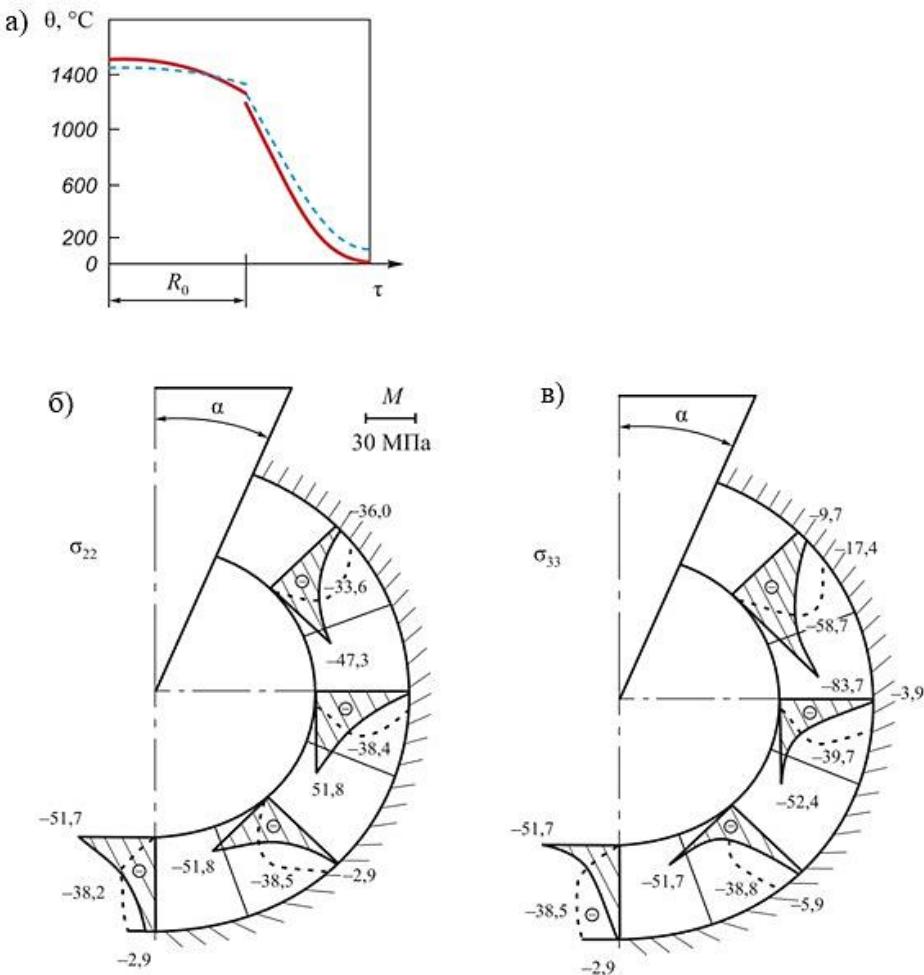


Рис. 4. Поле температур (а), эпюры нормальных напряжений σ_{22} (б) и σ_{33} (в) в ОФ при $\alpha = 10^\circ$ и времени охлаждения отливки 1,12 с (—) и 7,12 с (----)

В работе [2] показано, что в первый момент времени после заливки жидкого металла в сферическую ОФ растягивающие напряжения σ_{22} , σ_{33} минимальны, а сжимающие напряжения максимальны.

При дальнейшем охлаждении величина сжимающих напряжений резко падает, а растягивающих сначала растёт, а затем тоже падает. Величину охвата ОФ опорным наполнителем рекомендуется принять $\varphi = 90^\circ$, что обеспечивает снижение или сохранение НДС оболочковой формы на доступном уровне без её разрушения.

На рис. 5 представлены поля нормальных напряжений σ_{22} и σ_{33} при времени охлаждения отливки $\tau = 0,1$ с, $\varphi = 10^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$. Корочка затвердевшего металла ещё не успела сформироваться. Растягивающие напряжения σ_{22} и σ_{33} значимы.

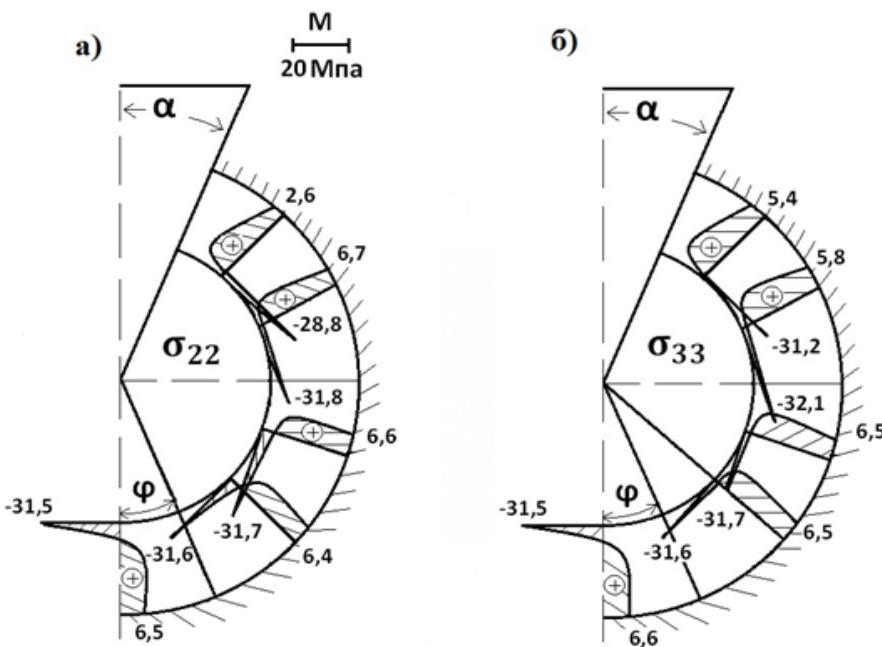


Рис. 5. Поле нормальных напряжений σ_{22} (а) и σ_{33} (б) при $\varphi = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\tau = 0,1$ с

На рис. 6 приведены результаты решения при времени охлаждения отливки $\tau = 3,65$ с. Видим, что сжимающие напряжения резко падают, растягивающие же растут, а затем также падают. Таким образом, наиболее опасными с точки зрения вероятности образования трещин в ОФ являются внутренние слои, прилегающие к облицовочному слою, контактирующему в начальный момент заливки с ЖМ. При дальнейшем охлаждении затвердевающей отливки происходит выравнивание величин напряжений по толщине оболочки, но они уже не оказывают влияния на рост НДС, а значит, и вероятность разрушения ОФ.

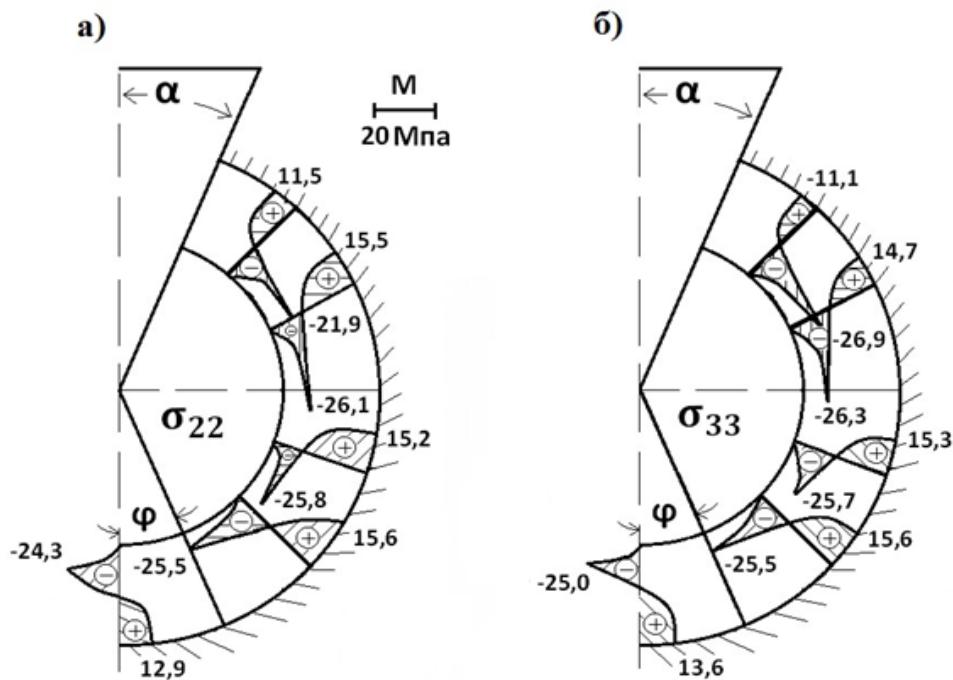


Рис. 6. Поле нормальных напряжений σ_{22} (а) и σ_{33} (б) при $\varphi = 10^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\tau = 3,65$ с

Расчёты при других значениях φ ($45^\circ, 90^\circ, 100^\circ$) показали, что наиболее оптимальным с технологической точки зрения является угол $\varphi = 90^\circ$, при котором максимальные значения $|\sigma_{33}|$ мало отличаются от контрольного расчётного значения напряжения по целевой функции.

Выводы

Для цилиндрической ОФ наиболее опасными с точки зрения её трещиностойкости на этапе затвердевания стальной отливки являются нормальные растягивающие напряжения σ_{22} , а для сферической ОФ – нормальные сжимающие напряжения σ_{33} , увеличивающиеся от донной части к литниковой воронке.

Для сферической ОФ уменьшение угла её охвата φ опорным наполнителем обеспечивает снижение уровня НДС в ней, в то время как для цилиндрической ОФ такого не установлено. Для сферической ОФ оптимальное значение $\varphi = 90^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одиноков, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. В. Баков. – М.: Наука, 2008. – 178 с.
2. Моделирование и оптимизация угла охвата сферической оболочковой формы опорным наполнителем / В. И. Одиноков, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев и др. // Прикладная механика и техническая физика. – 2024. – Т. 65. – № 6. – С. 73-80.



Кольева Н. С., Панова М. В., Федоров Д. Л., Перестенко К. А., Ярочкина Е. Д.
N. S. Kolyeva, M. V. Panova, D. L. Fedorov, K. A. Perestenko, E. D. Yarochkina

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ СТЕНДА УПРАВЛЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

DEVELOPMENT OF PLIS SOFTWARE FOR THE CONTROL WALL OF AN INDUSTRIAL COMPANY

Кольева Наталья Станиславовна – доцент кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: nkoleva@mail.ru.
Natalya S. Kolyeva – Associate Professor, Information Technologies and Statistics Department, Ural State University of Economics (Russia, Ekaterinburg). E-mail: nkoleva@mail.ru.

Панова Марина Валерьевна – старший преподаватель кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: maval@usue.ru.

Marina V. Panova – Senior Lecturer, Information Technologies and Statistics Department, Ural State University of Economics (Russia, Ekaterinburg). E-mail: maval@usue.ru.

Федоров Давид Леонидович – студент кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: david.fedorov@mail.ru.

David L. Fedorov – Student, Information Technologies and Statistics Department, Ural State University of Economics (Russia, Ekaterinburg). E-mail: david.fedorov@mail.ru.

Перестенко Кристина Александровна – магистрант кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: kerl@ya.ru.

Kristina A. Perestenko – Master's Degree Student, Information Technologies and Statistics Department, Ural State University of Economics (Russia, Ekaterinburg). E-mail: kerl@ya.ru.

Ярочкина Екатерина Дмитриевна – магистрант кафедры информационных технологий и статистики Уральского государственного экономического университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: katya.klepikova@mail.ru.

Ekaterina D. Yarochkina – Master's Degree Student, Information Technologies and Statistics Department, Ural State University of Economics (Russia, Ekaterinburg). E-mail: katya.klepikova@mail.ru.

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема прототипирования специализированных вычислительных модулей для реализации в составе сверхбольших интегральных схем. Задачи, решаемые применением программируемых логических интегральных схем, включают ускорение процесса функциональной верификации, упрощение процесса проверки изделий, уменьшение рисков повреждения изделия в процессе проверки. В статье рассматривается блок Arria V GX FPGA Development Kit. Данный блок представляет собой плату для программируемых логических интегральных схем 5AGXFB3H4F40, которая используется для отладки программ при разработке конфигурируемых цифровых электронных схем. Данная плата обеспечивает возможность настройки и анализа работы генератора прямого цифрового синтеза. Предложен алгоритм разработки программного обеспечения, предназначенного для автоматической проверки вышедших из производства блоков с применением генератора прямого цифрового синтеза.

Summary. This paper considers the problem of prototyping specialized computing modules for implementation as part of ultra-large integrated circuits. The problems solved by application of programmable logic integrated circuits include acceleration of functional verification process, simplification of product verification process, and reduction of risks of product damage during verification. This article discusses the Arria V GX FPGA Development Kit. This block is a 5AGXFB3H4F40 programmable logic integrated circuit board that is used for program debugging in the development of configurable digital electronic circuits. This board provides the ability to configure and analyze the

operation of a direct digital synthesis generator. The algorithm of software development designed for automatic verification of out-of-production blocks using the direct digital synthesis generator is proposed.

Ключевые слова: программное обеспечение, алгоритм, генератор прямого цифрового синтеза, оптимизация деятельности.

Key words: software, algorithm, direct digital synthesis generator, activity optimization.

УДК 004.023

В различных устройствах и системах в настоящее время широко используются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) для решения «нетрадиционных» для универсальных процессоров задач (например, задач, связанных с цифровой обработкой сигналов и данных) путём реализации «жёсткой логики» и ряда других применений. Они также широко используются для реализации функционирования устройств и систем в динамично обновляющихся условиях технологических и пользовательских требований [6, 5].

Процесс создания цифровых устройств включает в себя не только разработку схем, написание программного обеспечения (ПО) и реализацию всего этого в «железе». После того как устройство вышло из производства, необходимо провести его первые включения, проверить и настроить его встроенное ПО под параметры текущего «железа» или параметры эксплуатации, если устройство является многопрофильным.

В работе представлена разработка ПО для стенда управления генератора прямого цифрового синтеза (ГПЦС), предназначенная как раз для процесса проверки и настройки устройств после того, как они вышли из производства. Необходимость разработки на отладочной плате Arria V GX FPGA Development Kit обусловлена тем, что данная плата имеет широкий спектр возможностей в плане интерфейсов, и на ней решено делать стенд не только для настройки ГПЦС, но также для использования других возможностей платы: сбора данных с внешних устройств, хранения и обработки накопленных данных, использования интерфейса PCI-Express. Таким образом, целевая плата будет задействована полностью.

Arria V GX FPGA Development Kit представляет собой завершённую отладочную платформу, включающую всё необходимое программное и аппаратное обеспечение для немедленного начала разработки приложений на базе ПЛИС FPGA [3].

Разработчик может осуществлять отладку подсистемы памяти DDR3 и QDRII или добавить в систему другие протоколы интерфейсов. Плата предоставляет широкий выбор периферийных интерфейсов для обеспечения разработки проектов на ПЛИС 5AGXFB3H4F40.

Плата для разработки Arria V GX FPGA Development Kit поддерживает три метода настройки:

- Встроенный USB-Blaster – основной метод для настройки ПЛИС с помощью программы Quartus II через JTAG с помощью прилагаемого USB-кабеля.
- Загрузка во флеш-память.
- Внешний USB-Blaster для настройки [2, 9].

Плата Arria V GX FPGA содержит в себе множество различных элементов управления и взаимодействия, а также различные светодиоды, благодаря которым можно понять, какой процесс выполняется на данный момент.

Материалы и методы исследования. В соответствии с техническим заданием требуется разработать модуль, имеющий параметры, представленные в табл. 1.

Требования к функциональным характеристикам:

- ПО должно иметь возможность управления с ПК.
- Программное обеспечение должно иметь возможность сброса в некое начальное состояние, если это необходимо. В сброшенном состоянии ПО находится до тех пор, пока кнопка PB0 не нажата, также оно переходит в сброшенное состояние после отжатия кнопки.

– В проект Quartus II должен быть встроен механизм отладки Signal Tap Logic Analyzer для возможности определения состояния программного обеспечения в рабочие моменты времени. Также в разрабатываемое программное обеспечение необходимо интегрировать средства отладки In-System Memory Content Editor для возможности задания параметров работы ПО с ПК посредством интерфейса JTAG.

Таблица 1

Техническое задание

Физический уровень интерфейса управления	3.3-V LVTTL
Режим обмена	Передача/приём данных
Частота тактирования обмена	150 МГц
Тип интерфейса	Параллельный 16 бит

Обоснование технологических решений. Для программирования интегральных схем используется специализированное программное обеспечение. Отсутствие отечественных систем автоматизированного проектирования (САПР) – глобальная проблема российской электроники. Системы, которые используются российскими разработчиками микросхем, принадлежат иностранным компаниям и ориентированы на зарубежные стандарты проектирования и производства.

По причине отсутствия отечественных САПР для создания проекта используется САПР Intel Quartus Prime (Quartus II), которая позволяет проектировать логику работы микросхем схемотехнически на языках программирования AHDL, VHDL, Verilog и др. [4, 2].

Quartus II обладает следующими интегрированными средствами проектирования:

- текстовый и графический способы ввода проекта;
- синтез;
- трассировка СБИС;
- моделирование – ModelSim Altera;
- анализ временных параметров и потребляемой мощности;
- программирование СБИС.

Таким образом, для реализации проекта была выбрана САПР Quartus II и язык программирования VHDL.

Реализация проекта. В целом ПО для ПЛИС является комбинацией программных модулей и взаимодействий между ними. На структурной схеме ПО можно увидеть принцип её модульности: глобально программное обеспечение разделено на Qsys-систему и ГПЦС-модуль (см. рис. 1).

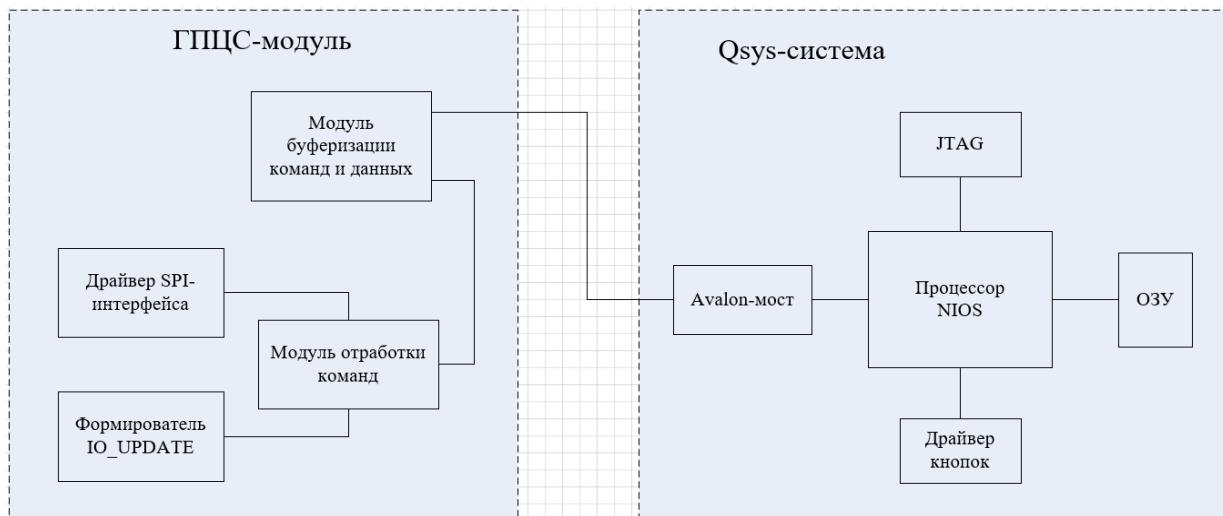


Рис. 1. Структурная схема ПО

Разбиение общего ПО на модули (модульность ПО) является основным моментом при разработке ПО для ПЛИС. Это позволяет более правильно прогнозировать функциональность проектируемой системы в целом.

QSys-система содержит в себе функционал процессора, который взаимодействует с внешним ПК и формирует указания для ГПЦС-модуля, который предназначен для управления непосредственно микросхемой AD9959.

ГПЦС-модуль имеет чёткое разбиение на функциональные составляющие:

- Модуль буферизации команд и данных принимает команды и данные от процессора, буферизирует и готовит из них очередь к исполнению.
- Модуль отработки команд ведёт постоянный контроль наличия в первом модуле невыполненных команд, и если таковые имеются, то запрашивает их и отрабатывает.
- Драйвер SPI-интерфейса – программный модуль, отвечающий за управление самой микросхемой AD9959 на уровне интерфейса SPI [7, 8].

Формирователь IO_UPDATE – программный модуль, отвечающий за корректное формирование управляющего сигнала для микросхемы AD9959 (требуемая точность установки, требуемая длительность и т. п.).

Однако структурная схема не позволяет проанализировать процессы взаимодействия между модулями (звеньями проекта), для этого необходимо создать функциональную схему, описывающую взаимосвязи в процессе работы разрабатываемого ПО.

Результаты исследования и их обсуждение.

Алгоритм разработки программы. При разработке устройства на основе ПЛИС изначально прорабатывается схема подключения ПЛИС к остальным элементам разрабатываемого устройства. На данном этапе определяются входы и выходы ПЛИС, участвующие в работе устройства.

Среда разработки Quartus II имеет в своём составе инструмент назначения входов и выходов ПЛИС. Редактор назначения входов и выходов ПЛИС (контактов) – Pin Planner, интерактивный графический редактор для назначения выводов:

- технология назначений – Drag&drop;
- позволяет установить стандарт входа/выхода;
- позволяет резервировать выводы.

Встраивание в ПО ПЛИС механизма отладки Signal Tap Logic Analyzer логический анализатор – это устройство, предназначенное для записи и анализа цифровых последовательностей, реализованное на логических ресурсах ПЛИС.

Signal Tap II позволяет синхронно захватывать логические состояния выводов и внутренних сигналов ПЛИС на выбранной тактовой частоте. Анализатор Signal Tap II применяется в отладке алгоритма работы ПЛИС посредством анализа захваченных анализатором состояний сигналов. Для реализации анализатора требуются внутренние ресурсы ПЛИС. Число использованных логических элементов зависит от числа каналов анализатора, числа и сложности условий «зашёлкивания» данных. Число использованных блоков памяти зависит от числа каналов анализатора и длины захватываемой последовательности [1, 4].

Таким образом, при практической проверке работы ПО было подтверждено его правильное функционирование.

Для корректной и стабильной работы разработанного ПО требуется соблюдение системных требований, а также строгое соблюдение техники безопасности. В частности, требуется строго использовать антистатические средства, такие как обувь, коврики и браслет. Работа без использования средств по борьбе со статическим электричеством может привести к повреждению или поломке ПЛИС, а также является источником угрозы и для изделия, проверяемого на стенде управления.

Заключение. Таким образом, в работе реализовано ПО, предназначенное для автоматической проверки вышедших из производства блоков с применением ГПЦС. В результате достигнуты следующие результаты:

- увеличилась производительность труда;



- сократилось время выполнения процесса настройки ГПЦС;
- упростился процесс проверки изделий;
- сократились риски повреждения изделия в процессе проверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутко, Г. П. Пути совершенствования цифровых инструментов в деятельности предприятий / Г. П. Бутко, М. А. Маньшикова, М. А. Панов // Цифровые модели и решения. – 2024. – Т. 3. – № 1. – С. 39-48.
2. Городилов, А. Ю. Теорема о сходимости генетического алгоритма с двухуровневым кодированием к точному решению задачи реконфигурации ПЛИС / А. Ю. Городилов, Е. Ю. Данилова // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – № 4 (31). – С. 84-90.
3. Кольева, Н. С. Экономический эффект реализации немонетарных целей проектов / Н. С. Кольева, И. М. Муллаяров, А. В. Тумановская // Столыпинский вестник. – 2024. – Т. 6. – № 6. – С. 2176-2185.
4. Радковская, Е. В. Оптимизационные модели в совершенствовании производственно-управленческих технологий / Е. В. Радковская // Урал – драйвер неоиндустриального и инновационного развития России: материалы III Уральского экономического форума, Екатеринбург, 21-22 октября 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2021. – С. 187-191.
5. Рванова, А. С. Разработка модели оценки структурной сложности программ / А. С. Рванова, Н. С. Кольева, М. В. Панова // Цифровые модели и решения. – 2024. – Т. 3. – № 2. – С. 5-16.
6. Тарасов, И. Е. Применение программно-аппаратного стенда на базе ПЛИС для прототипирования специализированных вычислительных модулей сверхбольших интегральных схем / И. Е. Тарасов, Д. В. Люлява, Н. А. Дуксин // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. – 2022. – Т. 6. – № 2. – С. 18-23.
7. Троицкий, А. М. Методы тестирования и отладки ПЛИС. Инструменты проектирования ПЛИС / А. М. Троицкий // Research success 2021: сборник статей Междунар. научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 06 декабря 2021 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнёрства «Новая Наука» (ИП Ивановская И. И.), 2021. – С. 36-44.
8. Хлынов, А. А. Исследование принципов реализации LDPC кодека на ПЛИС / А. А. Хлынов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2012. – Т. 12. – № 6. – С. 150-156.
9. Многоканальная система на ПЛИС с встроенным процессором для измерения длительности наносекундных сигналов с применением локальных сетей / Е. Ю. Шелковников, К. А. Шляхтин, С. Р. Кизнерцев, В. А. Куликов // Ползуновский альманах. – 2018. – № 4. – С. 6-9.

Носков С. И., Медведев А. П.

S. I. Noskov, A. P. Medvedev

ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОДНОРОДНОЙ ВЛОЖЕННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ВТОРОГО ТИПА

ESTIMATION OF PARAMETERS OF HOMOGENEOUS NESTED PIECEWISE LINEAR REGRESSION OF THE SECOND TYPE

Носков Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Sergey I. Noskov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Systems and Information Protection Department, Irkutsk State University of Railway Transport (Russia, Irkutsk); 664074, Russia, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

Медведев Александр Петрович – аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; tel. 8(908)663-16-63. E-mail: medvedeff.a.p@yandex.ru.

Aleksandr P. Medvedev – Postgraduate Student, Information Systems and Information Security Department, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk); 664074, Russia, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15; tel. 8(908)663-16-63. E-mail: medvedeff.a.p@yandex.ru.

Аннотация. В работе дан краткий обзор результатов использования нелинейных конструкций при регрессионном моделировании сложных систем. В частности, рассмотрены нелинейная регрессионная модель для аппроксимации кривой мощности ветряных турбин, нелинейная множественная модель для оценки хрупкости горных пород, нелинейная регрессия для прогнозирования краткосрочных нагрузок в системах охлаждения общественных зданий, методы оценки большой выборки для нелинейной регрессионной модели. Решена задача расчёта оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессионной модели второго типа на основе применения метода наименьших модулей, которая сведена к задаче линейно-булева программирования с приемлемой для реальных практических ситуаций размерностью. Формирование состава задаваемых при этом индексных множеств является исключительной прерогативой разрабатывающего конкретную регрессионную модель исследователя, который использует для этого соответствующие теоретические и содержательные соображения, вытекающие из смысла задействованных независимых переменных. Полученные значения булевых переменных указывают на порядок срабатывания внешнего и внутренних максимумов в рассматриваемой вложенной модели. Решён иллюстративный пример.

Summary. The paper provides a brief overview of the results on the use of nonlinear structures in regression modeling of complex systems. In particular, the following issues are considered: a nonlinear regression model for approximating the wind turbine power curve; a nonlinear multiple model for assessing the fragility of rocks; nonlinear regression for predicting short-term loads in cooling systems of public buildings; methods for assessing a large sample for a nonlinear regression model. The problem of calculating the parameter estimates of a homogeneous nested piecewise linear regression model of the second type based on the application of the least absolute values method is reduced to a linear Boolean programming problem with a dimension acceptable for real practical situations. The formation of the composition of the index sets specified in this case is the exclusive prerogative of the researcher developing a specific regression model, who uses for this purpose the corresponding theoretical and substantive considerations arising from the meaning of the independent variables involved. The obtained values of the Boolean variables indicate the order of operation of the external and internal maxima in the considered nested model. An illustrative example has been solved.

Ключевые слова: регрессионная модель, однородная вложенная кусочно-линейная регрессия второго типа, оценивание параметров, метод наименьших модулей, задача линейно-булева программирования.

Key words: regression model, homogeneous nested piecewise linear regression of the second type, parameter estimation, least absolute value method, linear Boolean programming problem.

УДК 519.852

Введение. При разработке математических моделей сложных систем, в том числе регрессионного типа, наряду с линейными часто используются разного рода нелинейные модельные конструкции, которые могут иметь весьма специфическую форму. Так, в работе [1] предложена нелинейная регрессионная модель для аппроксимации кривой мощности ветряных турбин, которая выделяется несколькими преимуществами, такими как соответствие физическим свойствам ветряной турбины (кривая мощности не превышает наивысшего значения генерируемой мощности), меньшее количество параметров для оценки, зависимость только от одного фактора. В [2] для оценки хрупкости горных пород использовалась нелинейная множественная регрессионная модель. Исходными данными послужили результаты лабораторных испытаний горных пород (проникновение удара, прочность на одноосное сжатие, прочность на растяжение и удельный вес породы), проведённых в Институте механики Земли Горной школы Колорадо в США на образцах горных пород, собранных из 48 туннелей по всему миру. Исследование [3] посвящено использованию модели множественной нелинейной регрессии для прогнозирования краткосрочных нагрузок в системах охлаждения общественных зданий. Ключевые переменные в модели выбираются на основе анализа чувствительности, а для повышения точности прогнозирования применяются методы калибровки. В статье [4] разработан генетический алгоритм на основе полного факторного экспериментального плана, который хорошо справляется с тестовыми задачами даже для относительно больших интервалов параметров. На основе анализа сходимости алгоритма отмечается, что параметры нелинейной регрессии, которые оказывают более сильное влияние на сумму квадратов ошибок, сходятся гораздо быстрее к своим оптимальным значениям. В [5] представлены различные методы оценки большой выборки для нелинейной регрессионной модели. Эти методы основаны на предварительных тестах значимости и правиле Джеймса – Стейна. Свойства методов изучаются при оценке коэффициентов регрессии в модели множественной нелинейной регрессии, когда априори предполагается, что на них могут быть наложены некоторые ограничения.

В работе [6] предлагаются адаптивная сетевая модель нечёткой системы вывода и три оптимизированные нелинейные регрессионные модели для прогнозирования модуля упругости обычного и высокопрочного бетона. Оптимальные значения параметров для этих моделей определяются с помощью алгоритма дифференциальной эволюции. В статье [7] рассматриваются нелинейные регрессионные модели, когда переменные не могут наблюдаться напрямую, но измеряются как с мультиплективными, так и с аддитивными ошибками измерения искажения. Предлагаются методы оценки условной дисперсии и условной средней калибровки для таких переменных, а также нелинейный метод наименьших квадратов для оценки параметров. В исследовании [8] предлагаются модификации модели логистической регрессии температуры ручья, которые не требуют никаких дополнительных переменных, которые было бы трудно измерить. Предлагаемые подходы тестируются на шести реках, расположенных в различных орографических условиях умеренных климатических зон Европы и США. В [9] рассматривается использование стохастических алгоритмов для оценки параметров нелинейных регрессионных моделей с привлечением нескольких критериев их качества: остаточной суммы квадратов, суммы абсолютных отклонений и суммы усечённых квадратов.

Следует также отметить работы: [10] (порождение и выбор нелинейных регрессионных моделей), [11] (численный метод нелинейного оценивания на основе разностных уравнений), [12] (проблема автоматического построения и упрощения нелинейных регрессионных моделей), [13] (модели нелинейной функционально-факторной регрессии), [14] (локально-адаптивные регрессионные модели с треугольными индикаторными функциями), [15] (нелинейные адаптивные регрессионные модели).

Целью настоящей работы является разработка алгоритмического способа оценивания неизвестных параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа, предложенной ранее одним из авторов.

Идентификация параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа. Рассмотрим регрессионное уравнение (модель) общего вида:

$$y_k = F(a; x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km}) + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где k – номер наблюдения; n – их количество; y – зависимая переменная; $x_i, i = \overline{1, m}$ – независимые переменные; a – вектор подлежащих идентификации параметров; F – вещественная аппроксимирующая функция, в общем случае нелинейная; ε_k – ошибки аппроксимации. Будем полагать все переменные модели (1) детерминированными.

Функция F может быть как линейной, так и существенно нелинейной, даже не гладкой. Так, в работах [16; 17] введены так называемые вложенные кусочно-линейные регрессионные модельные формы

$$y_k = \min\{\min_{i \in I}\{\alpha_i x_{ki}\}, \max_{i \in J}\{\beta_i x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$y_k = \max\{\min_{i \in I}\{\alpha_i x_{ki}\}, \max_{i \in J}\{\beta_i x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$y_k = \min\{\min_{i \in I^1}\{a_i^1 x_{ki}\}, \dots, \min_{i \in I^G}\{a_i^G x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad (4)$$

$$y_k = \max\{\max_{i \in J^1}\{\beta_i^1 x_{ki}\}, \dots, \max_{i \in J^H}\{\beta_i^H x_{ki}\}\} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Индексные множества $I, J, I^i, i = \overline{1, G}, J^j, j = \overline{1, H}$ представляют собой подмножества множества номеров независимых переменных $\{1, 2, \dots, m\}$. Заметим, что допускается вхождение некоторых из них одновременно в несколько этих индексных множеств. Формирование их состава является исключительной прерогативой разрабатывающего конкретную регрессионную модель исследователя, который использует для этого соответствующие теоретические и содержательные соображения, вытекающие из смысла независимых переменных.

Как указано в работе [16], в моделях (2) – (5) задействован первый порядок вложенности. Он может быть также вторым, третьим и т. д.

В работах [18; 19] представлены алгоритмы оценивания неизвестных параметров простой (2) и однородной (4) вложенных кусочно-линейных регрессий первого типа для случая, когда функция потерь имеет вид

$$L(\alpha) = \sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min, \quad (6)$$

т. е. соответствует методу наименьших модулей (МНМ). Эти задачи сводятся к задачам линейно-булева программирования (ЛБП).

Применим приёмы такого сведения по отношению к задаче оценивания параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессионной модели второго типа (5). Введём следующие обозначения:

$$v_{kj} = \max_{i \in J^j}\{\beta_i^j x_{ki}\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, H},$$

$$w_k = \max_{j=1, H} v_{kj}, \quad k = \overline{1, n}.$$

Тогда задача определения параметров $\beta_i^j, i \in J^j, j = \overline{1, H}$ в соответствии с функцией потерь (6) сводится к следующей задаче линейно-булева программирования:

$$v_{kj} \geq \beta_i^j x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J^j, \quad j = \overline{1, H}, \quad (7)$$

$$\beta_i^j x_{ki} - v_{kj} \geq (s_{kij} - 1)M_1, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J^j, \quad j = \overline{1, H}, \quad (8)$$



$$\sum_{i \in J^j} s_{kij} = 1, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, H}, \quad (9)$$

$$w_k \geq v_{kj}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, H}, \quad (10)$$

$$v_{kj} - w_k \geq (r_{kj} - 1)M_2, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, H}, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^H r_{kj} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$w_k + u_k - b_k = y_k, k = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$u_k \geq 0, b_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (14)$$

$$s_{kij} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, i \in J^j, j = \overline{1, H}, \quad (15)$$

$$r_{kj} \in \{0, 1\}, k = \overline{1, n}, j = \overline{1, H}, \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + b_k) - \delta \sum_{j=1}^H \sum_{i \in J^j} \beta_i^j \rightarrow \min, \quad (17)$$

где δ – заранее назначенное малое положительное число, а M_1 и M_2 – большие положительные константы. Второе слагаемое в целевой функции задачи ЛБП (7) – (17) является условием неполучения лишённого смысла решения.

Рассмотрим иллюстративный пример. Пусть подлежащая обработке выборка данных имеет вид, представленный в табл. 1.

Таблица 1
Выборка данных

y	x_1	x_2	x_3
8	4	3	2
9	13	11	7
7	10	2	5
13	4	6	12
4	9	11	3

Таким образом, $n = 5$, $m = 3$.

Индексные множества J^1 и J^2 зададим в виде $J^1 = \{1, 2\}$, $J^2 = \{2, 3\}$, т. е. положим $H = 2$.

Будем строить однородную вложенную кусочно-линейную регрессию второго типа (5) в форме $y_k = \max\{\max\{\beta_1^1 x_{k1}, \beta_2^1 x_{k2}\}, \max\{\beta_2^2 x_{k2}, \beta_3^2 x_{k3}\}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 5}$.

В результате решения задачи ЛБП (7)–(17) получим следующую модель:

$$y_k = \max\{\max\{0.69x_{k1}, 0.57x_{k2}\}, \max\{0.57x_{k2}, 1.08x_{k3}\}\} + \varepsilon_k, k = \overline{1, 5}.$$

Приведём значения остальных переменных задачи:

$$S_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad S_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad V = \begin{pmatrix} 2.77 & 2.17 \\ 9 & 7.58 \\ 6.92 & 5.42 \\ 3.4 & 13 \\ 6.23 & 6.23 \end{pmatrix},$$

$$w = (2.77, 9, 6.92, 13, 6.23),$$

$$u = (5.23, 0, 0.08, 0, 0),$$

$$b = (0, 0, 0, 0, 2.23),$$

$$\sum_{k=1}^5 (u_k + b_k) = 7.54,$$

где $S_1 = \|s_{ki1}\|$, $k = \overline{1, n}$, $i \in J^1$, $S_2 = \|s_{ki2}\|$, $k = \overline{1, n}$, $i \in J^2$, $R = \|r_{kj}\|$, $k = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, H}$, $V = \|v_{kj}\|$, $k = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, H}$.

Анализ полученных значений булевых переменных позволяет установить порядок срабатываний внешнего и внутренних максимумов. Например, в четвёртом наблюдении внешний максимум реализовался на втором внутреннем максимуме, который в свою очередь сработал на независимой переменной x_2 . Много полезной информации содержат также матрица V и вектора w , u и b .

Заключение. В работе задача вычисления оценок неизвестных параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии второго типа на основе применения метода наименьших модулей сведена к задаче линейно-булева программирования с приемлемой для реальных ситуаций размерностью. При этом значения булевых переменных указывают на порядок срабатывания внешнего и внутренних максимумов в рассматриваемой вложенной модели. Решён численный иллюстративный пример.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marciukaitis, M.; Žutautaitė, I.; Martišauskas, L.; Jokšas, B.; Gecevičius, G.; Sfetsos, A. Non-linear regression model for wind turbine power curve. *Renewable Energy*, 2017, Vol. 113. – P. 732-741.
2. Yagiz, S.; Gokceoglu, C. Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness. *Expert Systems with Applications*, 2010, Vol. 37, Iss. 3. – P. 2265-2272.
3. Chengliang, F.; Yunfei, D. Cooling load prediction and optimal operation of HVAC systems using a multiple nonlinear regression model. *Energy and Buildings*, 2019, Vol. 197. – P. 7-17.
4. Kapanoglu, M.; Ozan, K. I.; Erdogan, S. Genetic algorithms in parameter estimation for nonlinear regression models: an experimental approach. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2007, Vol. 77, Iss. 10. – P. 851-867.
5. Ejaz, S. A.; Nicol J. C. An application of shrinkage estimation to the nonlinear regression model. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2012, Vol. 56, Iss. 11. – P. 3309-3321.
6. Ahmadi-Nedushan, B. Prediction of elastic modulus of normal and high strength concrete using ANFIS and optimal nonlinear regression models. *Construction and Building Materials*, 2012, Vol. 36. – P. 665-673.
7. Zhang, J.; Lin, B.; Li, G. Nonlinear regression models with general distortion measurement errors. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2019, Vol. 89, Iss. 8. – P. 1482-1504.
8. Piotrowski, A.P.; Napiorkowski, J. J. Simple modifications of the nonlinear regression stream temperature model for daily data. *Journal of Hydrology*, 2019, Vol. 572. – P. 308-328.
9. Křivý, I.; Tvrdík, J.; Křepc, R. Stochastic algorithms in nonlinear regression. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2000, Vol. 33, Iss. 3. – P. 277-290.
10. Стрижов, В. В. Алгоритм выбора нелинейных регрессионных моделей с анализом гиперпараметров / В. В. Стрижов, Р. А. Сологуб // Математические методы распознавания образов. – 2009. – Т. 14. – № 1. – С. 184-187.
11. Зотеев, В. Е. Численный метод нелинейного оценивания на основе разностных уравнений / В. Е. Зотеев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2018. – Т. 22. – № 4. – С. 669-701.



12. Сологуб, Р. А. Методы трансформации моделей в задачах нелинейной регрессии / Р. А. Сологуб // Машинное обучение и анализ данных. – 2015. – Т. 1. – № 14. – С. 1961-1976.
13. Антонов, В. А. Построение и оптимизация моделей нелинейной функционально-факторной регрессии / В. А. Антонов // Информационные технологии. – 2013. – № 5. – С. 17-24.
14. Попов, А. А. Идентификация локально-адаптивных регрессионных моделей с треугольными индикаторными функциями / А. А. Попов // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 2 (90). – С. 7-22.
15. Лукашин, Ю. П. Адаптивная эконометрика. Нелинейные адаптивные регрессионные модели / Ю. П. Лукашин // Вопросы статистики. – 2006. – № 6. – С. 37-45.
16. Носков, С. И. Подход к формализации вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 1-2 (76). – С. 218-220.
17. Носков, С. И. Некоторые формы вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 467-469.
18. Носков, С. И. Идентификация параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 57-61.
19. Носков, С. И. Вычисление оценок параметров однородной вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков, С. И. Белинская // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50. – № 4. – С. 115-120.

Базилевский М. П.
АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО ВИДА
МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИЙ

Базилевский М. П.
M. P. Bazilevskiy

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОГО ВИДА МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИЙ

AN ALGORITHM FOR ESTIMATING UNKNOWN PARAMETERS OF ONE TYPE OF MULTILAYER NON-ELEMENTARY LINEAR REGRESSIONS

Базилевский Михаил Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск). E-mail: mik2178@yandex.ru.

Mikhail P. Bazilevskiy – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mathematics, Irkutsk State Transport University (Russia, Irkutsk). E-mail: mik2178@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассмотрен математический приём, состоящий в представлении функции Леонтьева в виде эквивалентной многослойной конструкции. На основе этого представления разработан алгоритм приближённого оценивания неизвестных параметров функции Леонтьева. С использованием реальной выборки данных из 101 наблюдения проведены вычислительные эксперименты. В результате работы алгоритма с использованием метода наименьших модулей приближённые оценки функций Леонтьева получились мало отличающимися от точных оценок, найденных посредством решения задач частично-булевого линейного программирования. При этом приближённые оценки были получены в разы быстрее, чем точные оценки. А при использовании метода наименьших квадратов скорость работы алгоритма оказалась ещё выше. Введена новая спецификация многослойных неэлементарных линейных регрессий, для которой справедлив разработанный алгоритм. С помощью метода наименьших квадратов по той же выборке построена одна из возможных форм новых моделей, оказавшаяся адекватнее функции Леонтьева.

Summary. The article discusses a mathematical technique consisting in representing the Leontief function as an equivalent multilayer structure. Based on this representation, an algorithm for approximate estimation of the Leontief function unknown parameters has been developed. Using a real data sample of 101 observations, computational experiments have been conducted. As a result of the algorithm's operation using the least absolute deviations method, approximate estimates of the Leontief functions turned out to be little different from the exact estimates found by solving 0-1 mixed integer linear programming problem. At the same time, approximate estimates were obtained several times faster than exact estimates. And when using the ordinary least squares method, the speed of the algorithm turned out to be even higher. A new specification of multilayer non-elementary linear regressions has been introduced, for which the developed algorithm is valid. Using the ordinary least squares method for the same sample, one of the possible forms of new models has been constructed, which turned out to be more adequate than the Leontief function.

Ключевые слова: регрессионный анализ, метод наименьших квадратов, метод наименьших модулей, функция Леонтьева, многослойная неэлементарная линейная регрессия, алгоритм оценивания.

Key words: regression analysis, ordinary least squares, least absolute deviations, Leontief function, multilayer non-elementary linear regression, estimation algorithm.

УДК 519.862.6

Введение. Развитие инструментария регрессионного анализа, относящегося к актуальному на сегодняшний день направлению разработки искусственного интеллекта – машинному обучению [1; 2], является актуальной научной задачей. Одним из возможных путей такого развития можно считать конструирование новых нелинейных структурных спецификаций регрессионных моделей и эффективных алгоритмов их оценки. Под структурной спецификацией [3] понимается математическая форма связи между переменными в модели регрессии. Новые нелинейные спецификации, с одной стороны, нужны для улучшения точности прогнозов зависимой переменной при

исследовании действительно сложных процессов или явлений, с другой стороны, такие модели должны довольно просто интерпретироваться.

Среди существующих нелинейных спецификаций регрессионных моделей можно выделить следующих хорошо известных представителей. Во-первых, квазилинейные регрессии [4; 5], которые линейны по параметрам, но нелинейны по факторам. В них в качестве преобразований объясняющих переменных используются элементарные функции x^n , $\ln x$, $\sin x$ и т. д. Такие модели с лёгкостью оцениваются с помощью метода наименьших квадратов (МНК). В работах [6; 7] исследуется алгоритм идентификации параметров квазилинейной авторегрессии с помощью обобщённого метода наименьших модулей (МНМ). Во-вторых, регрессии, применяемые в экономике для построения производственных функций [8]. К ним относится функция Кобба – Дугласа [9; 10], Леонтьева [11; 12], функция с постоянной эластичностью замещения (CES-функция) [13; 14] и т. д.

Именно функция Леонтьева послужила основой при создании неэлементарных линейных регрессий (НЛР). Сначала в [15] был предложен алгоритм МНК-оценивания функции Леонтьева с двумя объясняющими переменными, что позволило ввести НЛР с бинарными операциями \min и \max (см., например, [16]). Обобщение НЛР с использованием операций \min и \max разной степени арности рассмотрено в [17]. При этом параллельно развивались так называемые модульные регрессии [18], в которых для преобразования переменных используется операция модуль. Поэтому в [19] были исследованы двухфакторные модели с симбиозом операций \min , \max и модуль. Они были названы двухслойными НЛР. Как известно, свойство многослойности присуще многим моделям машинного обучения. Например, многослойность подразумевают полином Колмогорова – Габора при реализации метода группового учёта аргументов [20; 21] и современные нейронные сети [22; 23]. В [24] предложена вложенная кусочно-линейная регрессия с двумя слоями, а построению многослойных модульных регрессий с помощью МНМ посвящена работа [25]. Изначально целью данной статьи была разработка нового алгоритма оценивания только функции Леонтьева с несколькими объясняющими переменными. Однако, успешно достигнув поставленной цели, автору удалось сформулировать ещё и новые спецификации многослойных НЛР.

Алгоритм оценивания функции Леонтьева. Пусть по выборке объёма n строится зависимость объясняемой переменной y от объясняющих переменных x_1, x_2, \dots, x_l . Если в качестве структурной спецификации выбрана производственная функция Леонтьева, то регрессионная модель с неизвестными параметрами $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l$ и ошибками ε_i , $i = \overline{1, n}$, имеет вид

$$y_i = \min \{ \alpha_1 x_{i1}, \alpha_2 x_{i2}, \dots, \alpha_l x_{il} \} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

При использовании МНМ могут быть найдены точные оценки модели (1). Для этого требуется решить задачу частично-булевого линейного программирования (ЧБЛП), сформулированную, например, в [4; 12]. При использовании МНК можно получить лишь приближённые оценки модели (1). Один из возможных алгоритмов такого оценивания предложен в [4]. Он предполагает формирование l -мерного многогранника, из которого простым перебором выбираются наилучшие с точки зрения некоторого критерия МНК-оценки. Иной алгоритм предложен в [17]. Он также предполагает формирование многогранника, но меньшего объёма. Сформулируем далее ещё один алгоритм приближённого оценивания модели (1).

Нетрудно показать, что модель (1) равносильна следующей многослойной конструкции:

$$y_i = \min \{ z_{i, l-2}, \alpha_l x_{il} \} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где

$$z_{i, l-2} = \min \{ z_{i, l-3}, \alpha_{l-1} x_{i, l-1} \}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$z_{i, l-3} = \min \{ z_{i, l-4}, \alpha_{l-2} x_{i, l-2} \}, \quad i = \overline{1, n},$$

...

$$z_{i2} = \min\{z_{i1}, \alpha_3 x_{i3}\}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$z_{i1} = \min\{\alpha_1 x_{i1}, \alpha_2 x_{i2}\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Например, если $l = 4$, то получим многослойную конструкцию вида

$$y_i = \min\{z_{i2}, \alpha_4 x_{i4}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где

$$z_{i2} = \min\{z_{i1}, \alpha_3 x_{i3}\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$z_{i1} = \min\{\alpha_1 x_{i1}, \alpha_2 x_{i2}\}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), а (4) в (3), получим модель

$$y_i = \min\{\min\{\min\{\alpha_1 x_{i1}, \alpha_2 x_{i2}\}, \alpha_3 x_{i3}\}, \alpha_4 x_{i4}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n},$$

которая равносильна производственной функции Леонтьева при $l = 4$:

$$y_i = \min\{\alpha_1 x_{i1}, \alpha_2 x_{i2}, \alpha_3 x_{i3}, \alpha_4 x_{i4}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Действительно, выбор минимума из нескольких чисел может быть организован путём последовательного выбора на каждом шаге минимума из двух соседних чисел. Таким же образом определяется максимум из нескольких чисел. Поскольку, как отмечено в [17], модель (1) является частным случаем НЛР, то конструкцию (2) будем называть многослойной НЛР. Число слоёв в ней равно $(l-1)$.

Так, как это сделано в работе [15] для двухфакторных функций Леонтьева, вынесем из-под знака \min в модели (1) параметр $\alpha_1 > 0$ и добавим в неё свободный член α_0 :

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \min\left\{x_{i1}, \frac{\alpha_2}{\alpha_1} x_{i2}, \dots, \frac{\alpha_l}{\alpha_1} x_{il}\right\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (6)$$

При $\alpha_0 = 0$ модель (6) равносильна регрессии (1). Свободный член α_0 введён в модель (6) для того, чтобы при её МНК-оценивании была справедлива формула для коэффициента детерминации R^2 .

С учётом замен $\lambda_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \dots, \lambda_l = \frac{\alpha_l}{\alpha_1}$, модель (6) принимает вид

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \min\{x_{i1}, \lambda_2 x_{i2}, \dots, \lambda_l x_{il}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Представим модель (7) в виде следующей многослойной конструкции:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 \min\{z_{i,l-2}^*, \lambda_l x_{il}\} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где

$$z_{ij}^* = \min\{z_{i,j-1}^*, \lambda_{j+1} x_{i,j+1}\}, \quad j = \overline{2, l-2}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$z_{i1}^* = \min\{x_{i1}, \lambda_2 x_{i2}\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Как следует из [15], область возможных значений параметра λ_2 на первом слое НЛР (8)

$$D_1: \min\left\{\frac{x_{11}}{x_{12}}, \frac{x_{21}}{x_{22}}, \dots, \frac{x_{n1}}{x_{n2}}\right\} \leq \lambda_2 \leq \max\left\{\frac{x_{11}}{x_{12}}, \frac{x_{21}}{x_{22}}, \dots, \frac{x_{n1}}{x_{n2}}\right\}; \quad (9)$$

области возможных значений параметров λ_{j+1} , $j = \overline{2, l-1}$, на остальных слоях

$$D_j : \min \left\{ \frac{z_{1,j-1}^*}{x_{1,j+1}}, \frac{z_{2,j-1}^*}{x_{2,j+1}}, \dots, \frac{z_{n,j-1}^*}{x_{n,j+1}} \right\} \leq \lambda_{j+1} \leq \max \left\{ \frac{z_{1,j-1}^*}{x_{1,j+1}}, \frac{z_{2,j-1}^*}{x_{2,j+1}}, \dots, \frac{z_{n,j-1}^*}{x_{n,j+1}} \right\}, \quad j = \overline{2, l-1}. \quad (10)$$

Тогда для приближённого оценивания многослойной НЛР (8) нужно действовать последовательно. Сначала на первом слое найти область D_1 , разбить её точками и вычислить в каждой из них значения переменной z_1^* . Затем на втором слое для каждой переменной z_1^* найти область D_2 , разбить её точками и вычислить в каждой из них значения переменной z_2^* . Строгое математическое описание этого алгоритма можно сформулировать следующим образом:

Шаг 1 (первый слой). Идентифицировать область D_1 возможных значений параметра λ_2 по формуле (9). Равномерно разбить полученный отрезок r точками $\lambda_2^{(1)}, \lambda_2^{(2)}, \dots, \lambda_2^{(r)}$. В каждой такой точке вычислить значения переменных $z_1^*(\lambda_2^{(i)}) = \min\{x_1, \lambda_2^{(i)}x_2\}$, $i = \overline{1, r}$.

Шаг 2 (второй слой). Для каждой переменной $z_1^*(\lambda_2^{(i)})$, $i = \overline{1, r}$, идентифицировать область D_2 возможных значений параметра λ_3 по формуле (10). Первый полученный отрезок равномерно разбить r точками $\lambda_3^{(1,1)}, \lambda_3^{(1,2)}, \dots, \lambda_3^{(1,r)}$, второй – $\lambda_3^{(2,1)}, \lambda_3^{(2,2)}, \dots, \lambda_3^{(2,r)}$ и т. д. В каждой такой точке вычислить значения переменных $z_2^*(\lambda_3^{(i,j)}) = \min\{z_1^*, \lambda_3^{(i,j)}x_3\}$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, r}$.

Шаг 3 (третий слой). Для каждой переменной $z_2^*(\lambda_3^{(i,j)})$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, r}$, идентифицировать область D_3 возможных значений параметра λ_4 по формуле (10). Первый полученный отрезок равномерно разбить r точками $\lambda_4^{(1,1,1)}, \lambda_4^{(1,1,2)}, \dots, \lambda_4^{(1,1,r)}$, второй – $\lambda_4^{(1,2,1)}, \lambda_4^{(1,2,2)}, \dots, \lambda_4^{(1,2,r)}$ и т. д. В каждой такой точке вычислить значения переменных $z_3^*(\lambda_4^{(i,j,k)}) = \min\{z_2^*, \lambda_4^{(i,j,k)}x_4\}$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, r}$, $k = \overline{1, r}$.

...

Шаг ($l-1$) (последний слой). Для каждой переменной $z_{l-2}^*(\lambda_{l-1}^{(i_1, i_2, \dots, i_{l-2})})$, $i_1, i_2, \dots, i_{l-2} = \overline{1, r}$, идентифицировать область D_{l-1} возможных значений параметра λ_l по формуле (10). Каждый из полученных отрезков равномерно разбить r точками. В каждой такой точке $\lambda_l^{(i_1, i_2, \dots, i_{l-1})}$, $i_1, i_2, \dots, i_{l-1} = \overline{1, r}$, оценить с помощью МНК или МНМ модель парной линейной регрессии (8). Из полученного набора r^{l-1} моделей выбрать ту, у которой сумма квадратов или модулей ошибок минимальна.

Стоит отметить, что описанный выше алгоритм предполагает использование только точек разбиения, расположенных внутри идентифицированных отрезков. При оценивании многослойной НЛР надёжнее будет использовать и концы этих отрезков, но при этом количество парных регрессий на последнем шаге алгоритма увеличится с r^{l-1} до $(r+2)^{l-1}$.

Разработанный в [17] алгоритм оценивания функции Леонтьева (7) предполагает формирование для оценок параметров $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_l$ системы линейных неравенств, решением которой является выпуклый многогранник в многомерном пространстве. Проблема состояла в том, как выбрать внутри этого многогранника точки. Предложенный выше алгоритм не требует решения этой проблемы, поскольку все точки разбиения лежат внутри этого многогранника.

Заметим, что в многослойной конструкции (8) на первом слое преобразуются переменные x_1 и x_2 , а далее на каждом слое последовательно добавляются переменные x_3, x_4 и т. д. Изменится ли результат работы алгоритма, если поменять порядок переменных в слоях? Ответ – да. С изменением порядка переменных в слоях выпуклый многогранник не меняется, но меняются точки

его разбиения. Поэтому при малых r разница при изменении порядка факторов может быть существенной, но с ростом r эта разница уменьшается.

Вычислительные эксперименты. Главной целью проведения вычислительных экспериментов было сравнить на реальных данных скорость и качество точного МНМ-оценивания функции Леонтьева, пользуясь аппаратом ЧБЛП, и приближённого МНМ- и МНК-оценивания с помощью предложенного алгоритма.

Для проведения вычислительных экспериментов использовался обычный персональный компьютер с процессором AMD Ryzen 3 4300U (тактовая частота 2.7 ГГц) и 16 ГБ оперативной памяти.

Для точного МНМ-оценивания функции Леонтьева был использован математический аппарат из работ [4; 12]. При формировании задач ЧБЛП большое число M было выбрано равным 100 000. Для решения задач ЧБЛП был использован оптимизационный решатель LPSolve. Лимит времени в нём для получения оптимального решения был выбран 1800 с. (30 мин.). При превышении лимита времени автоматически фиксировалось полуоптимальное решение задачи.

Для приближённого оценивания функции Леонтьева с помощью МНК и МНМ был использован предложенный выше алгоритм. Предварительно он был реализован в виде программы на скриптовом языке программирования *hansl* эконометрического пакета *Gretl*. Для МНМ-оценивания парных регрессий на последнем шаге алгоритма была использована встроенная в пакет *Gretl* функция «*lad*», а для МНК-оценивания – «*ols*».

Для обработки были выбраны встроенные в пакет *Gretl* данные по кабельным системам (файл *data7-22.gdt*). Объём выборки n составляет 101. Объясняемой переменной выступает *sub* – число подписчиков кабельной системы. К объясняющим переменным относятся:

homes – количество домов с установленной кабельной системой;

inst – плата за установку (в долларах);

svc – ежемесячная плата за обслуживание;

cblchanl – количество телевизионных сигналов, передаваемых кабельной системой;

tvchanl – количество полученных телевизионных сигналов;

princome – доход на душу населения.

Для удобства обозначим все эти переменные, как $y, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ и x_6 соответственно.

В ходе экспериментов оценивались функции Леонтьева с пятью объясняющими переменными, причём как без свободного члена, так и с ним. Сначала эти 12 моделей были оценены точно с помощью МНМ. Затем эти 12 регрессий оценивались приближённо с помощью МНМ и МНК. При этом для каждой модели число точек r разбиения отрезков в алгоритме устанавливалось равным 6, 9 и 12. Также использовались точки на концах идентифицированных отрезков. Результаты проведённых экспериментов приведены в табл. 1.

В табл. 1 в первом столбце приведены составы объясняющих переменных в функциях Леонтьева, во втором и третьем столбце – результаты точного МНМ-оценивания, а именно суммы модулей остатков моделей $\sum |e|$ и время t_1 решения задач ЧБЛП в пакете LPSolve. Если в третьем столбце зафиксировано значение 1800, то это означает, что оптимальность решения не доказана в установленный лимит времени. Такое решение принято называть полуоптимальным. В четвёртом столбце указаны значения параметра r , а в пятом, шестом, седьмом и восьмом столбцах – результаты приближённого МНМ-оценивания, а конкретно суммы модулей остатков моделей $\sum |e|$, относительные отклонения δ в процентах, время t_2 работы алгоритма в пакете *Gretl* и отношения t_1/t_2 . Относительное отклонение δ находится по формуле

$$\delta = \frac{J_{\text{алг}} - J_{\text{ЧБЛП}}}{J_{\text{алг}}} \cdot 100\%,$$

где $J_{\text{алг}}$ – сумма модулей остатков, полученная в результате приближённого оценивания в *Gretl*; $J_{\text{ЧБЛП}}$ – сумма модулей остатков, полученная в результате решения задачи ЧБЛП в LPSolve. Заме-



тим, что $J_{\text{ЧБЛП}}$ не обязательно принимает оптимальное значение, поскольку в LPSolve установлен лимит времени на поиск решения. Близкое к нулю положительное значение δ говорит о несущественном превосходстве использования аппарата ЧБЛП по сравнению с предложенным алгоритмом.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов

Состав пере- менных	Задача ЧБЛП		Предложенный алгоритм							
	$\sum e $	$t_1, \text{ с}$	r	МНМ				МНК		
				$\sum e $	$\delta, \%$	$t_2, \text{ с}$	t_1/t_2	$\sum e^2$	$t_3, \text{ с}$	t_1/t_3
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Без свободного члена										
x_1, x_2, x_3, x_4, x_5	2414,7	598,8	6	2423,4	0,36	46,7	12,82	190 231,9	19,8	30,24
			9	2422,7	0,33	160,7	3,73	189 799,0	67,9	8,82
			12	2440,1	1,04	426,4	1,40	187 820,1	173,9	3,44
x_1, x_2, x_3, x_4, x_6	2414,7	1499,9	6	2423,4	0,36	47,8	31,38	190 231,9	20,2	74,25
			9	2422,7	0,33	159,6	9,40	189 799,0	67,8	22,12
			12	2440,1	1,04	429,8	3,49	187 820,1	182,6	8,21
x_1, x_2, x_3, x_5, x_6	2414,7	339,3	6	2423,4	0,36	46,9	7,23	191 165,8	19,9	17,05
			9	2422,7	0,33	166,7	2,04	190 758,4	72,4	4,69
			12	2440,1	1,04	440,3	0,77	189 652,5	177,0	1,92
x_1, x_2, x_4, x_5, x_6	2414,7	839,1	6	2423,4	0,36	45,1	18,61	190 231,9	20,0	41,96
			9	2422,7	0,33	158,1	5,31	189 799,0	67,7	12,39
			12	2440,1	1,04	425,7	1,97	187 820,1	184,4	4,55
x_1, x_3, x_4, x_5, x_6	2480,1	790,7	6	2490,9	0,43	46,7	16,93	192 009,4	20,2	39,14
			9	2488,0	0,32	165,3	4,78	190 307,3	68,9	11,48
			12	2485,2	0,21	423,1	1,87	190 244,6	185,1	4,27
x_2, x_3, x_4, x_5, x_6	4472,6	1800	6	3914,3	-14,26	46,7	38,54	428 241,9	20,0	90,00
			9	3920,4	-14,09	160,9	11,19	430 038,0	68,0	26,47
			12	3920,1	-14,09	429,6	4,19	427 806,7	184,3	9,77
Со свободным членом										
x_1, x_2, x_3, x_4, x_5	2413,6	1558,4	6	2423,1	0,39	53,9	28,91	188 300,2	20,5	76,02
			9	2420,2	0,27	184,6	8,44	188 426,3	72,5	21,50
			12	2437,8	0,99	480,7	3,24	186 235,9	174,0	8,96
x_1, x_2, x_3, x_4, x_6	2413,6	1800	6	2423,1	0,39	54,4	33,09	188 300,2	19,8	90,91
			9	2420,2	0,27	192,2	9,37	188 246,6	68,2	26,39
			12	2437,8	0,99	488,2	3,69	186 235,9	183,2	9,83
x_1, x_2, x_3, x_5, x_6	2413,6	905,1	6	2423,1	0,39	55,4	16,34	189 977,0	20,1	45,03
			9	2420,2	0,27	189,6	4,77	189 348,2	69,0	13,12
			12	2437,8	0,99	505,3	1,79	187 981,8	176,3	5,13
x_1, x_2, x_4, x_5, x_6	2413,6	1800	6	2423,1	0,39	54,9	32,79	188 300,2	20,3	88,67
			9	2420,2	0,27	192,7	9,34	188 246,6	74,2	24,26
			12	2437,8	0,99	503,4	3,58	186 235,9	177,6	10,14
x_1, x_3, x_4, x_5, x_6	2479,3	1800	6	2490,8	0,46	55,2	32,61	189 982,7	20,0	90,00
			9	2487,9	0,35	193,3	9,31	188 421,2	73,1	24,62
			12	2485,1	0,23	522,7	3,44	188 303,2	176,9	10,18
x_2, x_3, x_4, x_5, x_6	4339,3	1800	6	3899,6	-11,28	56,8	31,69	427 996,2	20,6	87,38
			9	3892,6	-11,48	195,3	9,22	428 762,3	69,7	25,82
			12	3895,7	-11,39	509,1	3,54	427 797,1	185,7	9,69

В девятом, десятом и одиннадцатом столбцах табл. 1 приведены результаты приближённого МНК-оценивания функций Леонтьева, а именно суммы квадратов остатков моделей $\sum e^2$, время t_3 работы алгоритма в пакете Gretl и отношения t_1/t_3 .

По табл. 1 можно сделать следующие выводы.

1. Время МНМ-оценивания функции Леонтьева, предполагающего решение задачи ЧБЛП в пакете LPSolve, непредсказуемо. Так, без использования свободного члена в моделях для одного и того же числа ограничений в задачах ЧБЛП это время варьировалось в диапазоне от 339,3 до 1800 с., а со свободным членом – от 905,1 до 1800 с. Также видно, что без использования свободного члена только в одном случае из шести не было получено оптимальное решение, тогда как включение свободного члена увеличило число таких случаев до четырёх из шести.

2. При МНМ-оценивании функции Леонтьева без свободного члена с использованием предложенного алгоритма относительные отклонения лежат в диапазоне: от $-14,26$ до $0,43\%$ при $r = 6$; от $-14,09$ до $0,33\%$ при $r = 9$; от $-14,09$ до $1,04\%$ при $r = 12$. Положительные значения в указанных диапазонах довольно малы, т. е. нет никакой серьёзной разницы между суммами модулей остатков, полученными точным и приближённым методом. А отрицательные значения относительных отклонений и вовсе говорят о том, что предложенный алгоритм нашёл более качественную по величине суммы модулей остатков модель, чем метод ЧБЛП в установленный лимит времени. Время МНМ-оценивания предложенным алгоритмом лежит в диапазоне: от 45,1 до 47,8 с. при $r = 6$; от 158,1 до 166,7 с. при $r = 9$; от 423,1 до 440,3 с. при $r = 12$. Отношение времени t_1 МНМ-оценивания с помощью аппарата ЧБЛП ко времени t_2 МНМ-оценивания с помощью нашего алгоритма попадает в диапазон: от 7,23 до 38,54 при $r = 6$; от 2,04 до 11,19 при $r = 9$; от 0,77 до 4,19 при $r = 12$. Практически все эти отношения превосходят единицу, т. е. скорость работы предложенного алгоритма в подавляющем большинстве случаев оказалась выше, чем скорость решения задач ЧБЛП.

3. Включение свободного члена в функцию Леонтьева повышает вычислительную трудность задачи её МНМ-оценивания. Так, время оценивания предложенным алгоритмом лежит в диапазоне: от 53,9 до 56,8 с. при $r = 6$; от 184,6 до 195,3 с. при $r = 9$; от 480,7 до 522,7 с. при $r = 12$. Отношение времени t_1 МНМ-оценивания с помощью аппарата ЧБЛП ко времени t_2 МНМ-оценивания с помощью нашего алгоритма попадает в диапазон: от 16,34 до 33,09 при $r = 6$; от 4,77 до 9,37 при $r = 9$; от 1,79 до 3,69 при $r = 12$. Из этого следует, что скорость работы предложенного алгоритма во всех случаях оказалась выше, чем скорость решения задач ЧБЛП. Относительные отклонения лежат в диапазоне: от $-11,28$ до $0,46\%$ при $r = 6$; от $-11,48$ до $0,35\%$ при $r = 9$; от $-11,39$ до $0,99\%$ при $r = 12$. Следовательно, точный метод МНМ-оценивания по величине сумм модулей остатков либо незначительно выигрывает у приближённого алгоритма, либо существенно ему уступает.

4. Время МНК-оценивания функции Леонтьева без свободного члена с помощью предложенного алгоритма лежит в диапазоне: от 19,8 до 20,2 с. при $r = 6$; от 67,7 до 72,4 с. при $r = 9$; от 173,9 до 185,1 с. при $r = 12$. А при использовании свободного члена: от 19,8 до 20,6 с. при $r = 6$; от 68,2 до 74,2 с. при $r = 9$; от 174 до 185,7 с. при $r = 12$. Из этого следует, во-первых, что при использовании МНК включение в модель свободного члена абсолютно не повлияло на скорость работы алгоритма. Во-вторых, применение МНК в алгоритме гораздо эффективнее, чем применение МНМ. Так, без использования свободного члена отношение времени t_1 МНМ-оценивания с помощью аппарата ЧБЛП ко времени t_3 МНК-оценивания с помощью нашего алгоритма попадает в диапазон: от 17,05 до 90 при $r = 6$; от 4,69 до 26,47 при $r = 9$; от 1,92 до 9,77 при $r = 12$. А при включении свободного члена это отношение лежит в диапазоне: от 45,03 до 90,91 при $r = 6$; от 13,12 до 26,39 при $r = 9$; от 5,13 до 10,18 при $r = 12$.

5. Увеличение числа точек r при использовании любого метода оценивания модели приводит к увеличению времени работы алгоритма. При этом нет гарантии, что качество модели при увеличении r будет улучшено.

По табл. 1 наилучшим качеством аппроксимации обладает следующая оценённая с помощью МНК функция Леонтьева:

$$\tilde{y} = 5,9792 + 0,4302 \min \{x_1, 23.178x_2, 18.343x_4, 90.575x_5, 44.035x_6\}, \quad (11)$$

для которой $\sum e^2 = 186235,9$, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,7056$. Заметим, что модель (11) адекватнее линейной регрессии со всеми шестью объясняющими переменными, для которой $\sum e^2 = 218447,4$, а $R^2 = 0,6547$.

Многослойная НЛР. Достоинство разработанного алгоритма приближённого оценивания функций Леонтьева в том, что он будет справедлив и для некоторых других математических форм многослойных НЛР.

Представим многослойную конструкцию (8) в следующем виде:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 g_{k_{l-1}}(\lambda_1, z_{i,l-2}^*, x_{i,s_l}) + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где

$$z_{ij}^* = g_{k_j}(\lambda_{j+1}, z_{i,j-1}^*, x_{i,s_{j+1}}), \quad j = \overline{2, l-1}, \quad i = \overline{1, n},$$

$$z_{il}^* = g_{k_l}(\lambda_2, x_{i,s_1}, x_{i,s_2}), \quad i = \overline{1, n};$$

здесь s_1, s_2, \dots, s_l – элементы вектора S , содержащего последовательность номеров, включаемых в слои объясняющих переменных; k_j , $j = \overline{1, l-1}$ – номер выбранного в каждом слое неэлементарного преобразования g_{k_j} двух переменных из набора $G = (\min\{u_1, \lambda u_2\}, \max\{u_1, \lambda u_2\}, \min\{u_1, \lambda + u_2\}, \max\{u_1, \lambda + u_2\})$.

Например, если $S = (1, 2, 3, \dots, l)$, а $k_j = 1$, $j = \overline{1, l-1}$, то многослойная НЛР (8) трансформируется в функцию Леонтьева.

Комбинируя в (12) элементы вектора S и состав неэлементарных преобразований, можно получить множество различных форм многослойных НЛР. При этом для них будет справедлив предложенный нами алгоритм. При использовании в нём преобразования $\min\{u_1, \lambda + u_2\}$ или $\max\{u_1, \lambda + u_2\}$, как следует из работ [15–17], область возможных значений параметра λ_2 на первом слое НЛР (12)

$$D_1: \min \{x_{1,s_1} - x_{1,s_2}, \dots, x_{n,s_1} - x_{n,s_2}\} \leq \lambda_2 \leq \max \{x_{1,s_1} - x_{1,s_2}, \dots, x_{n,s_1} - x_{n,s_2}\};$$

области возможных значений параметров λ_{j+1} , $j = \overline{2, l-1}$, на остальных слоях

$$D_j: \min \{z_{1,j-1}^* - x_{1,s_{j+1}}, \dots, z_{n,j-1}^* - x_{n,s_{j+1}}\} \leq \lambda_{j+1} \leq \max \{z_{1,j-1}^* - x_{1,s_{j+1}}, \dots, z_{n,j-1}^* - x_{n,s_{j+1}}\},$$

$$j = \overline{2, l-1}.$$

Для демонстрации работоспособности алгоритма по тем же данным с помощью МНК оценивалась многослойная НЛР с параметрами $S = (5, 2, 4, 1, 6)$, $k_1 = 3$, $k_2 = 1$, $k_3 = 3$, $k_4 = 1$. В результате при $r = 12$ была построена следующая четырёхслойная модель:

$$\tilde{y} = 503,0913 + 0,4639 \min \{z_3^*, -30,387x_6\}, \quad (13)$$

где

$$z_3^* = \min \{z_2^*, -1079,1 + x_1\},$$

$$z_2^* = \min \{z_1^*, -7,6481x_4\},$$

$$z_1^* = \min \{x_5, -55,838 + x_2\},$$

для которой $\sum e^2 = 182905,4$, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,7109$. Как видно, по обоим показателям многослойная НЛР (13) адекватнее функции Леонтьева (11).

Заключение. С использованием математического приёма представления функции Леонтьева в виде многослойной конструкции сформулирован новый алгоритм приближённого оценивания её неизвестных параметров. Этот алгоритм может быть использован при оценивании функции Леонтьева как с помощью МНМ, так и с помощью МНК. В ходе вычислительных экспериментов установлено, что при использовании МНМ качество полученных по нашему алгоритму моделей оказалось либо несущественно ниже, либо существенно выше (в установленный лимит времени), чем качество построенных с использованием аппарата ЧБЛП регрессий. При этом скорость работы предложенного алгоритма в подавляющем большинстве случаев оказалась в разы выше, чем скорость решения задач ЧБЛП. А при использовании МНК скорость работы алгоритма ещё больше увеличилась. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения разработанного алгоритма на практике. К тому же вызывает научный интерес дальнейшее исследование предложенной в статье многослойной НЛР, которая является обобщением функции Леонтьева и для которой справедлив разработанный алгоритм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. SN computer science, 2 (3), 160.
2. Greener, J. G., Kandathil, S. M., Moffat, L., & Jones, D. T. (2022). A guide to machine learning for biologists. *Nature reviews Molecular cell biology*, 23 (1), 40-55.
3. Айвазян, С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1005 с.
4. Носков, С. И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных / С. И. Носков. – Иркутск: РИЦ ГП Облинформпечать, 1996. – 320 с.
5. Никонорова, Ю. В. Применение метода наименьших квадратов для нахождения параболических функций, описывающих динамику цены биткоина и цены акций МММ / Ю. В. Никонорова // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2021. – Т. 10. – № 4. – С. 357-362.
6. Абotalеб, М. С. А. Исследование возможностей параллелизма для прогнозирования с использованием квазилинейного рекуррентного уравнения / М. С. А. Абotalеб, Т. А. Макаровских, А. В. Панюков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2023. – Т. 12. – № 4. – С. 94-109.
7. Абotalеб, М. С. А. Установление значимости коэффициентов квазилинейного уравнения n-факторной авторегрессии / М. С. А. Абotalеб // Проблемы информатики. – 2024. – № 3 (64). – С. 5-28.
8. Клейнер, Г. Б. Производственные функции: теория, методы, применение / Г. Б. Клейнер. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
9. Mohajan, H. K. (2021). Estimation of cost minimization of garments sector by Cobb-Douglas production function: Bangladesh perspective. *Annals of Spiru Haret University. Economic Series*, 21 (2), 267-299.
10. Vasyl'yeva, O. (2021). Assessment of factors of sustainable development of the agricultural sector using the Cobb-Douglas production function. *Baltic Journal of Economic Studies*, 7 (2), 37-49.
11. Михеев, А. В. Вероятностный подход к определению производственных функций / А. В. Михеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 4. – С. 82-94.
12. Носков, С. И. Программный комплекс построения некоторых типов кусочно-линейных регрессий / С. И. Носков, А. А. Хоняков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2019. – № 3. – С. 47-55.
13. Усова, А. А. Анализ модели роста с производственной CES-функцией / А. А. Усова, А. М. Тарасьев // Математическая теория игр и её приложения. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С. 96-114.
14. Черемухин, А. Д. Исследование применимости CES-функций для описания процессов сельскохозяйственного производства / А. Д. Черемухин, Г. В. Груздев // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 9 (136). – С. 65-83.



15. Базилевский, М. П. МНК-оценивание параметров специфицированных на основе функций Леонтьева двухфакторных моделей регрессии / М. П. Базилевский // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 2 (26). – С. 66-70.
16. Базилевский, М. П. Отбор информативных операций при построении линейно-неэлементарных регрессионных моделей / М. П. Базилевский // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Т. 9. – № 5. – С. 30-35.
17. Базилевский, М. П. Обобщение неэлементарных линейных регрессий / М. П. Базилевский // Моделирование и анализ данных. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 85-98.
18. Базилевский, М. П. Программное обеспечение для оценивания модульных линейных регрессий / М. П. Базилевский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 3 (31). – С. 136-146.
19. Базилевский, М. П. Алгоритм приближённого оценивания с помощью метода наименьших квадратов двухслойных неэлементарных линейных регрессий с двумя объясняющими переменными / М. П. Базилевский // Современные научно-технические технологии. – 2024. – № 4. – С. 10-14.
20. Установление технологических зависимостей работы концентратора КС-CVD6 с помощью метода группового учёта аргументов / В. В. Пелих, В. М. Салов, А. Е. Бурдонов, Н. Д. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 139-150.
21. Муравина, О. М. Применение метода группового учёта аргументов для анализа петрофизических данных / О. М. Муравина, И. А. Пономаренко, М. В. Минц // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2021. – № 3. – С. 5-15.
22. Kumar, S., Haq, M. A., Jain, A., Jason, C. A., Moparthi, N. R., Mittal, N., & Alzamil, Z. S. (2023). Multilayer Neural Network Based Speech Emotion Recognition for Smart Assistance. *Computers, Materials & Continua*, 75 (1).
23. Nguyen, P. M., & Pham, H. T. (2023). A rigorous framework for the mean field limit of multilayer neural networks. *Mathematical Statistics and Learning*, 6 (3), 201-357.
24. Носков, С. И. Идентификация параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № III (67). – С. 57-61.
25. Базилевский, М. П. Оценивание неизвестных параметров многослойной модульной регрессии методом наименьших модулей / М. П. Базилевский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12. – № 2 (45). – URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1581> (дата обращения: 20.12.2024). – Текст: электронный.

Петрова А. Н., Фролов Д. О., Дмитриева Т. Л.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

Петрова А. Н., Фролов Д. О., Дмитриева Т. Л.

A. N. Petrova, D. O. Frolov, T. L. Dmitrieva

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В СИСТЕМАХ БОЛЬШИХ ДАННЫХ

ANALYSIS OF SMOOTHING METHODS TO INCREASE THE ACCURACY OF INFORMATION SEARCH IN BIG DATA SYSTEMS

Петрова Анна Николаевна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Проектирование, управление и развитие информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Anna N. Petrova – PhD in Engineering, Head of Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: PetrovaAN2006@yandex.ru.

Фролов Дмитрий Олегович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Dmitriy O. Frolov – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: optcompanys@mail.ru.

Дмитриева Татьяна Львовна – доктор технических наук, заведующий кафедрой механики и сопротивления материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: dmital@ex.istu.edu.

Tatiana L. Dmitrieva – D. Sc. in Engineering, Head of Mechanics and Strength of Materials Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: dmital@ex.istu.edu.

Аннотация. Данная работа посвящена анализу методов сглаживания, направленных на улучшение точности поиска информации в системах, обрабатывающих большие объёмы данных. Были изучены три основных метода: сглаживание по Елинеку – Мерсеру, байесовский подход с использованием распределения Дирихле и метод абсолютного дисконтирования. В рамках исследования был создан набор данных из 10 000 документов и 5 поисковых запросов, на основе которого проведён эксперимент для оценки эффективности указанных подходов в задаче ранжирования документов. Итоги эксперимента продемонстрировали, что байесовское сглаживание с распределением Дирихле показало наивысшую точность (MAP = 0.78) благодаря способности адаптироваться к большим объёмам данных. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации и разработки алгоритмов поиска, используемых в обработке крупных текстовых массивов.

Summary. This paper is devoted to the analysis of smoothing methods aimed at improving the accuracy of information retrieval in systems processing large volumes of data. Three main methods were studied: smoothing according to Jelinek-Mercer, Bayesian approach using Dirichlet distribution and absolute discounting method. As part of the study, a dataset of 10,000 documents and 5 search queries was created, on the basis of which an experiment was conducted to evaluate the effectiveness of these approaches in the task of ranking documents. The results of the experiment demonstrated that Bayesian smoothing with Dirichlet distribution showed the highest accuracy (MAP = 0.78) due to the ability to adapt to large volumes of data. The obtained results have practical significance for the optimization and development of search algorithms used in the processing of large text arrays.

Ключевые слова: информационный поиск, релевантность, методы сглаживания, распределение Дирихле, метод Елинека – Мерсера, абсолютное дисконтирование.

Key words: information retrieval, relevance, smoothing methods, Dirichlet distributions, Jelinek-Mercer method, absolute discounting.

УДК 517.95

Введение. С ростом объёмов данных и развитием информационных технологий задача поиска релевантной информации в системах больших данных приобретает всё большее значение. В условиях обработки массивных информационных потоков крайне важно эффективно определять, насколько документы соответствуют пользовательским запросам. В этом контексте процесс ранжирования играет центральную роль, поскольку он обеспечивает сортировку документов по степени их релевантности. Несмотря на достижения в сфере информационного поиска, проблема повышения точности ранжирования остаётся актуальной. Одним из подходов к её решению является применение методов сглаживания, которые позволяют справляться с проблемой редких слов в текстах, тем самым улучшая оценку вероятности их релевантности запросу.

В этой работе анализируются три подхода к сглаживанию, способные существенно повысить качество ранжирования документов: метод Елинека – Мерсера, байесовский метод на основе распределения Дирихле и метод абсолютного дисконтирования. Каждый из них обладает уникальными характеристиками и подходами к улучшению оценки вероятности появления слов в документах, что напрямую отражается на результатах ранжирования.

Цель исследования заключается в экспериментальном сравнении эффективности этих методов в задаче релевантного поиска. Для проведения эксперимента был создан набор данных, включающий 10 000 документов и 5 поисковых запросов, что позволяет воссоздать условия, приближённые к реальным сценариям поиска в больших данных. Для каждого метода сглаживания было выполнено ранжирование документов, а качество результатов оценено с использованием метрики средней точности (MAP).

Полученные результаты демонстрируют, какой из методов наиболее эффективен в заданном контексте, что вносит значительный вклад в развитие и оптимизацию алгоритмов поиска в системах обработки больших объёмов информации.

Использование методов сглаживания. Современные системы информационного поиска сталкиваются с вызовом обработки огромных массивов данных, что усложняет задачу нахождения наиболее релевантных документов. Точность поиска и качество их ранжирования напрямую зависят от подходов, применяемых для оценки вероятности соответствия документов запросу пользователя. Ключевым фактором, влияющим на эти показатели, является использование методов сглаживания, которые позволяют справляться с проблемой редких слов в текстах и запросах, особенно в условиях работы с большими объёмами информации.

Методы сглаживания представляют собой подходы, корректирующие вероятностные оценки появления слов в документах с помощью статистических инструментов, включая гиперпараметры и модели распределения языковых данных. Их основная цель – минимизировать влияние редко встречающихся или малозначимых терминов, что в итоге повышает точность ранжирования. На практике применяются различные техники сглаживания, такие как метод Елинека – Мерсера, байесовский подход с использованием распределения Дирихле и метод абсолютного дисконтирования. Каждый из этих методов обладает уникальными свойствами, что делает их эффективными в зависимости от специфики данных и поставленной задачи.

Метод Елинека – Мерсера представляет собой один из традиционных подходов к сглаживанию, который корректирует вероятности появления слов, основываясь на их частотах. Этот метод часто используется в статистических языковых моделях, предлагая эффективный способ нормализации распределения вероятностей. Байесовский подход на основе распределения Дирихле выделяется своей универсальностью, позволяя моделировать более сложные вероятностные структуры, что делает его особенно ценным для задач, связанных с обработкой больших объёмов данных. Метод абсолютного дисконтирования, в свою очередь, направлен на устранение последствий отсутствия определённых слов в текстах, что значительно улучшает работу моделей с редкими терминами и обеспечивает повышение точности их прогнозов.

Сглаживание Елинека – Мерсера. Для любого документа D и запроса Q оценивается вероятность появления каждого слова из запроса в данном документе. Для каждого слова w из за-

проса используется метод сглаживания Елинека – Мерсера, чтобы вычислить вероятность его присутствия в документе:

$$P(w|D) = \frac{C(w, D) + \alpha}{N(D) + \alpha|V|}, \quad (1)$$

где $C(w, D)$ – частота слова w в документе D ; $N(D)$ – общее количество слов в документе D ; α – параметр сглаживания; $|V|$ – размер словаря. После вычисления вероятностей для каждого слова в запросе вероятность документа по запросу вычисляется как произведение вероятностей для всех слов в запросе.

Байесовское сглаживание на основе распределения Дирихле. В методе, основанном на распределении Дирихле, вероятность каждого слова w в запросе определяется аналогично методу Елинека – Мерсера, но с добавлением гиперпараметра α_g . Этот параметр регулирует распределение вероятностей, особенно для редких слов, корректируя их оценку и улучшая точность моделирования:

$$P(w|D) = \frac{C(w, D) + \alpha_g}{N(D) + \alpha|V|}. \quad (2)$$

Этот метод позволяет более гибко учитывать неопределенности в частотах слов, что может быть полезно при работе с небольшими выборками данных.

Абсолютное дисконтирование. Для метода абсолютного дисконтирования, если частота слова $C(w, D) > 0$, вероятность слова w для документа D вычисляется по формуле

$$P(w|D) = \frac{C(w, D) - D}{N(D)} + D * P_{default}, \quad (3)$$

где D – параметр дисконтирования; $N(D)$ – общее количество слов в документе D ; $P_{default}$ – вероятность для слов с нулевой частотой. Для слов с нулевой частотой используется небольшая положительная вероятность.

Эксперимент. Для выполнения эксперимента требуется создать набор данных, включающий 10 000 документов и 5 поисковых запросов. Затем необходимо применить методы сглаживания для ранжирования документов по релевантности запросам. После того как для каждого запроса будут получены ранжированные списки документов с использованием каждого из методов сглаживания, следует оценить точность результатов и представить итоги точности для всех 10 000 документов.

Подготовка данных. Был создан набор данных, который моделирует условия реального поиска в системах обработки больших данных. Поисковые запросы представлены в табл. 1. Все запросы были сосредоточены на темах «искусственный интеллект» и «машинное обучение», что соответствует популярным ключевым словам в данной области. Документы, содержащие случайно выбранные слова, были структурированы таким образом, чтобы иметь общую тематическую направленность, при этом их релевантность для каждого запроса варьировалась.

Таблица 1
Поисковые запросы

Запрос	Релевантные документы
Как нейронные сети помогают в классификации?	1, 3
Что такое байесовское сглаживание?	2
Методы для улучшения точности машинного обучения.	1, 5
Нейронные сети машинное обучение.	3
Применение сглаживания в языковых моделях.	2, 4

Каждый из 10 000 документов представлял собой случайное сочетание слов из словаря, включающего как часто встречающиеся, так и редкие термины, что обеспечивало разнообразие

содержания. Особое внимание было уделено тому, что для каждого из пяти запросов заранее были установлены метки релевантности для документов. Эти метки играли ключевую роль в оценке качества ранжирования, поскольку они позволяли определить, какие из документов наиболее соответствуют запросу на различных уровнях релевантности.

Набор данных был разработан с учётом актуальных тем поиска. Каждый документ представлял собой текст со случайным набором слов, но с ясной тематической направленностью, что позволило создать оптимальные условия для тестирования эффективности методов сглаживания.

Применение методов сглаживания для ранжирования документов. Для каждого запроса мы применяли три метода сглаживания и ранжировали все 10 000 документов в зависимости от их вероятности релевантности для данного запроса.

Сглаживание Елинека – Мерсера

Для метода Елинека – Мерсера мы использовали формулу (1) для вычисления вероятности слова w в документе D .

Мы рассчитали вероятности для каждого слова в запросе и перемножили их для каждого документа. Документы были отсортированы по убыванию полученной вероятности релевантности.

Байесовское сглаживание с распределением Дирихле

В байесовском сглаживании для оценки вероятности каждого слова в документе применялась формула (2). Аналогичные расчёты выполнялись для каждого запроса и документа, где байесовское сглаживание использовалось для определения вероятности каждого слова, после чего вычислялся произведённый результат этих вероятностей для всего документа.

Абсолютное дисконтирование

Для метода абсолютного дисконтирования использовалась формула (3). Этот метод также рассчитывал вероятности для каждого слова запроса в каждом документе и использовал произведение этих вероятностей для ранжирования документов.

Оценка результатов ранжирования. После того как мы получили ранжированные списки документов для каждого запроса с использованием каждого метода сглаживания, нам нужно было оценить их точность. Для этого мы использовали метку релевантности для каждого документа, чтобы рассчитать МАР.

Для расчёта МАР для одного запроса «нейронные сети машинное обучение» и метода Елинека – Мерсера ранжированный список был следующим:

- документ 1 «Модели нейронных сетей и их применение в машинном обучении» релевантен;
- документ 2 «Обзор современных методов машинного обучения» частично релевантен;
- документ 3 «Искусственный интеллект и его развитие» не релевантен.

Точность на каждом уровне ранга была рассчитана как доля релевантных документов:

- точность на первом уровне: $P(1) = 1/1 = 1$;
- точность на втором уровне: $P(2) = 2/2 = 1$;
- точность на третьем уровне: $P(3) = 2/3$.

Средняя точность для этого запроса была рассчитана следующим образом:

$$AP = \frac{1 + 1 + \frac{2}{3}}{3} = 0.89.$$

Результаты для всех 10 000 документов. После того как мы рассчитали МАР для всех документов по всем запросам для каждого метода сглаживания, мы получили следующие результаты (см. табл. 2).

Заключение. Результаты анализа продемонстрировали, что при обработке крупного набора данных из 10 000 документов наивысшую точность обеспечило байесовское сглаживание с использованием распределения Дирихле ($MAP = 0.78$). Этот метод показал себя наиболее эффектив-

ным в оценке релевантности документов запросам, особенно в условиях больших объёмов информации.

Таблица 2

Результаты расчётов

Метод сглаживания	MAP
Елинека – Мерсера	0.75
Байесовское сглаживание	0.78
Абсолютное дисконтирование	0.72

Сглаживание Елинека – Мерсера (MAP = 0.75) также продемонстрировало высокую точность, но уступило байесовскому подходу. Метод абсолютного дисконтирования (MAP = 0.72) оказался менее результативным, что подтверждает его ограниченную применимость для работы с масштабными наборами данных.

Таким образом, эксперимент выявил, что байесовское сглаживание с распределением Дирихле является наиболее подходящим методом для задач релевантного поиска в системах, работающих с большими объёмами документов, благодаря своей высокой эффективности в обеспечении точного ранжирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith J., Johnson R. Advances in Smoothing Techniques for Document Ranking // Journal of Information Retrieval. – 2022. – Vol. 34, No. 2. – P. 123-135.
2. Zhang W., Lee C. Neural Networks for Large-Scale Data Processing // AI Research Review. – 2021. – Vol. 12, No. 1. – P. 67-80.
3. Müller K. Probabilistic Models in Information Retrieval // Computational Linguistics Today. – 2020. – Vol. 18, No. 3. – P. 98-110.
4. Brown T., White A. Smoothing Algorithms: Applications and Limitations // Big Data Analytics Journal. – 2023. – Vol. 29, No. 5. – P. 233-247.
5. Li H., Chen Y. Ranking and Relevance in Search Engines // Data Science Insights. – 2021. – Vol. 20, No. 7. – P. 145-159.
6. Сергеев, А. Н. Байесовские методы в обработке текстов / А. Н. Сергеев, В. В. Кузнецов // Научные труды по математике и информатике. – 2022. – Т. 6. – № 2. – С. 101-112.
7. Taylor J., Green S. Performance of Dirichlet Priors in Large Datasets // Journal of Applied Mathematics. – 2023. – Vol. 25, No. 8. – P. 67-82.
8. Kim D., Park J. Document Ranking with Jelinek-Mercer Smoothing // Computational Systems and Models. – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 89-102.
9. Hansen P. Application of Absolute Discounting in Text Retrieval // Information Systems Journal. – 2022. – Vol. 15, No. 6. – P. 123-140.
10. Gruber L., Fischer M. Relevance Metrics in Modern Search Systems // Advances in Data Science. – 2023. – Vol. 8, No. 3. – P. 55-68.
11. Александров, И. В. Нейросетевые подходы к ранжированию документов / И. В. Александров // Искусственный интеллект и большие данные. – 2021. – Т. 12. – № 5. – С. 34-48.
12. Wang X., Zhao L. Statistical Language Models in Search Engines // Machine Learning Journal. – 2020. – Vol. 22, No. 9. – P. 99-113.
13. Carter B., Hill T. Smoothing Parameters and Their Impact on Retrieval // Journal of Data Retrieval. – 2021. – Vol. 17, No. 2. – P. 76-89.
14. Новиков, С. П. Оценка точности методов информационного поиска / С. П. Новиков, Д. А. Беляев // Информационные технологии в науке. – 2023. – Т. 19. – № 3. – С. 15-29.



Гончаренко В. А., Хомоненко А. Д., Абу Хасан Р.
V. A. Goncharenko, A. D. Khomonenko, R. Abu Khasan

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ RAID-МАССИВОВ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯ

GENETIC ALGORITHM FOR SELECTING THE RAID ARRAY OPTIMAL CONFIGURATION OF THE ENTERPRISE DATA STORAGE SYSTEM

Гончаренко Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, преподаватель кафедры информационно-вычислительных систем и сетей Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: vlango@mail.ru.

Vladimir A. Goncharenko – PhD in Engineering, Associate Professor, Information and Computing Systems Department, St. Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Lecturer of Information and Computing Systems and Networks Department, Mozhaisky Military Space Academy (Russia, St. Petersburg). E-mail: vlango@mail.ru.

Хомоненко Анатолий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, профессор кафедры математического и программного обеспечения Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: khomon@mail.ru.

Anatoly D. Khomonenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Information and Computing Systems Department, St. Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I, Professor of Mathematical and Software Engineering Department, Mozhaisky Military Space Academy (Russia, St. Petersburg). E-mail: khomon@mail.ru.

Абу Хасан Рахеб – магистр, аспирант кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: ragheb1997@yandex.ru.

Ragheb Abu Khasan – Master, Postgraduate Student, Information and Computing Systems Department, St. Petersburg State Transport University named after Emperor Alexander I (Russia, St. Petersburg). E-mail: ragheb1997@yandex.ru.

Аннотация. Сформулирована постановка задачи оптимизации выбора конфигурации RAID-массивов из нескольких уровней в качестве системы хранения данных предприятия по критерию надёжности и производительности. Разработан генетический алгоритм её решения. Охарактеризованы основные шаги алгоритма: инициализация популяции, оценка фитнес-функции, отбор лучших особей для дальнейшего размножения путём турнирного или рулеточного отбора, применение кроссовера к отобранным особям для создания новых особей-потомков, применение мутации к новым особям для изменения уровня RAID или количества дисков, замена худших особей текущей популяции новыми потомками, повторение шагов до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное число итераций или оптимальное решение. Приведены примеры расчёта оптимальных вариантов RAID-массивов из нескольких уровней. Выполнены расчёты фитнес-функций по генетическому алгоритму с учётом стохастической параметрической неопределённости характеристик надёжности и производительности RAID-массивов. В задаче выбора RAID-массива для системы хранения данных неопределённость касается характеристик надёжности и производительности различных уровней RAID. В рамках генетического алгоритма это улучшает предсказуемость производительности и надёжности системы, особенно в ситуациях, когда параметры надёжности и производительности подвержены значительным колебаниям.

Summary. The problem of optimizing the choice of a RAID array configuration from several levels as an enterprise data storage system according to the criteria of reliability and performance is formulated. A genetic algorithm for its solution has been developed. The main steps of the algorithm are described: initialization of the population, assessment of the fitness function, selection of the best individuals for further reproduction by tournament or roulette selection, application of crossover to selected individuals to create new offspring, application of mutation to

new individuals to change the RAID level or the number of disks, replacement of the worst individuals of the current population with new descendants, repetition of steps until the maximum number of iterations or the optimal solution is reached. Examples of calculating optimal RAID array options from several levels are given. Calculations of fitness functions using a genetic algorithm have been performed, taking into account the stochastic parametric uncertainty of the reliability and performance characteristics of RAID arrays. In the task of choosing a RAID array for a data storage system, the uncertainty concerns the reliability and performance characteristics of various RAID levels. Within the framework of the genetic algorithm, this improves the predictability of system performance and reliability, especially in situations where reliability and performance parameters are subject to significant fluctuations.

Ключевые слова: RAID-массивы, генетический алгоритм, надёжность, производительность, стохастическая параметрическая неопределённость.

Key words: RAID arrays, genetic algorithm, reliability, performance, stochastic parametric uncertainty.

УДК 004.75

Введение. В условиях стремительного роста объёмов данных и требований к их обработке высокое качество хранения информации становится критически важным для организаций, занимающихся анализом данных и управлением данными [1–3]. Крупнейшие российские и зарубежные компании, такие как Сбербанк, «Газпром», «Яндекс», «Ростелеком», Google, Amazon Web Services, Facebook и др., для эффективного и надёжного хранения данных используют технологии RAID (Redundant Array of Independent Disks – избыточный массив независимых дисков). Это подчёркивает важность выбора оптимальной конфигурации RAID-массива для повышения отказоустойчивости и увеличения скорости доступа к данным [4; 5].

Выбор подходящей комбинации уровней RAID-массива системы хранения данных (СХД) представляет собой сложную задачу, требующую учёта множества факторов, таких как надёжность, производительность, стоимость и объём хранения [6; 7].

Вопросам оценки уровня надёжности и выбора наилучшего уровня RAID для хранилищ данных посвящён ряд работ [8; 9]. При этом в задачах оценивания и выбора решений возникают проблемы учёта стохастической или нечёткой неопределённости исходных данных [9; 10]. Необходимость учёта параметрической неопределённости в характеристиках надёжности и производительности различных уровней RAID связана с эксплуатационными условиями, качеством оборудования и другими факторами, что добавляет дополнительный уровень сложности к процессу принятия решения [11; 12]. В [13] предложен композиционный подход к моделированию систем с неопределённостью исходных данных, когда параметры представляются в виде случайных величин.

В условиях неопределённости даже небольшие изменения в параметрах могут существенно влиять на общую эффективность системы хранения данных. В связи с этим возникает необходимость разработки методов, способных учитывать стохастические аспекты этих параметров и находить оптимальные решения даже в условиях неопределённости. Одним из наиболее перспективных подходов к решению подобных задач являются генетические алгоритмы.

В [14] реализован метод представления битовых массивов для оптимизации структурной топологии с использованием генетических алгоритмов. В [15] представлен многоцелевой генетический алгоритм для оптимизации расположения данных при декластеринге чётности в сетевом RAID, в том числе с учётом распределённой рабочей нагрузки восстановления и распределённой чётности, что может обеспечить лучшую компоновку данных для сетевого хранилища.

В статье рассматривается вопрос выбора оптимальной комбинации RAID-массивов в СХД на основе генетических алгоритмов с учётом многоцелевого хранения информации с различными требованиями по надёжности и производительности, а также с учётом возможной параметрической неопределённости исходных данных.

Постановка задачи. Пусть для построения системы хранения данных предприятия имеется K типов (уровней) RAID-массивов (например, RAID 0, RAID 1, RAID 10, RAID 5, RAID 6) и N дисков, которые можно распределить между различными уровнями RAID. Необходимо выбрать оптимальную комбинацию уровней RAID и количества дисков для каждого уровня, чтобы максимизировать целевую функцию, учитывающую показатели надёжности и производительности, при соблюдении бюджетных и ресурсных ограничений.

Переменные:

- n_k – количество дисков, выделяемых под уровень RAID k , где $k = 0, 1, 2, \dots, K$.
- c_k – стоимость одного диска уровня RAID k .
- r_k – показатель надёжности уровня RAID k .
- p_k – показатель производительности уровня RAID k .
- B – общий бюджет.
- N – общее количество дисков СХД.

Целевая функция представляет собой взвешенную сумму нормализованных показателей надёжности, производительности и эффективности использования дисков:

$$F(n) = w_p \cdot P^h(n) + w_v \cdot V^h(n) + w_e \cdot E^h(n),$$

где w_p , w_v и w_e – весовые коэффициенты для показателей надёжности, производительности и эффективности использования СХД соответственно, отражающие относительную важность того или иного показателя для СХД, причём $w_p + w_v + w_e = 1$; $P^h(x)$, $V^h(x)$, $E^h(x)$ – нормализованные общие показатели надёжности, производительности и эффективности использования СХД соответственно.

Поскольку показатели надёжности, производительности и эффективности использования дискового пространства имеют разные размерность и физический смысл, их нужно нормализовать, т. е. привести к единому масштабу и уравновесить их влияние на целевую функцию. Нормализованные значения показателей надёжности, производительности и эффективности для уровней RAID обычно получают методом мини-макс нормализации:

$$\begin{aligned} P^h_{\text{RAID}k}(n_k) &= (P(n_k) - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}); \\ V^h_{\text{RAID}k}(n_k) &= (V(n_k) - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min}); \\ E^h_{\text{RAID}k}(n_k) &= (E(n_k) - E_{\min}) / (E_{\max} - E_{\min}). \end{aligned}$$

Примем, что максимальное значение показателя надёжности RAID-массива $P_{\max} = 1$, минимальное значение – $P_{\min} = P_{\text{RAID}0}(n)$, поскольку именно в RAID0 отсутствует резервирование, максимальное значение показателя производительности $V_{\max} = V_d \cdot n$ также достигается в RAID0 за счёт технологии чередования, минимальное значение $V_{\min} = V_d$, т. е. равно скорости чтения-записи одиночного диска, максимальное значение показателя эффективности использования дисков $E_{\max} = 1$, или 100 %, которое достигается в RAID0, минимальное значение $P_{\min} = 0.5$.

Общий показатель надёжности СХД рассчитывается как произведение показателей надёжности отдельных уровней RAID:

$$P(n) = \frac{\sum_{k=1}^K P_k(n_k) \cdot n_k}{\sum_{k=1}^K n_k}.$$

Общий показатель производительности системы рассчитывается как средневзвешенный показатель производительности всех уровней RAID:

$$V(n) = \frac{\sum_{k=1}^K V_k(n_k) \cdot n_k}{\sum_{k=1}^K n_k}.$$

Общий показатель эффективности использования дискового пространства системы рассчитывается как средневзвешенный показатель эффективности всех уровней RAID:

$$E(n) = \frac{\sum_{k=1}^K E_k(n_k) \cdot n_k}{\sum_{k=1}^K n_k}.$$

Ограничения:

1. Бюджетное ограничение:

$$\sum_{k=1}^K c_k \cdot x_k \leq B.$$

2. Ресурсное ограничение:

$$\sum_{k=1}^K x_k = N.$$

Рассмотрим основные параметры различных уровней RAID-массивов и требования к их организации.

1. Требования по количеству дисков и применение RAID:

– RAID 0 (чередование). Требуется минимум 2 диска, но не предоставляет избыточности данных. Отказ одного диска ведёт к потере всей информации. *Применение:* для быстрого доступа к временным или некритичным данным, когда требуется высокая производительность и можно восстановить информацию.

– RAID 1 (зеркалирование). Требуется минимум 2 диска, данные дублируются на каждом диске, количество дисков должно быть чётным. RAID-массив остаётся работоспособным, пока работает хотя бы один диск. *Применение:* для максимального повышения надёжности хранения и доступности данных.

– RAID 10 (RAID 1 + RAID 0). Требуется минимум 4 диска, количество дисков должно быть чётным. *Применение:* для работы с корпоративными базами данных, веб-серверами и другими высокотранзакционными нагрузками.

– RAID 5. Требуется минимум 3 диска, производится распределение контрольных сумм по всем дискам массива, позволяет восстанавливать данные при отказе одного диска. *Применение:* для некритичной информации с небольшой нагрузкой на диски, например, в системах видеонаблюдения.

– RAID 6. Требуется минимум 4 диска. Аналогичен RAID 5, но допускает отказ двух дисков. *Применение:* для надёжного хранения критически важных данных, где не важна высокая транзакционная производительность (системы безопасности, архивные системы, системы резервного копирования).

2. Критерии оценки фитнес-функции:

– показатель надёжности – вероятность безотказной работы RAID-массива – P_{RAIDi} (для различных уровней RAID будет отличаться);

– показатель производительности – средняя скорость чтения/записи, IOPS (Input/Output Operations Per Second) – $V_{RAIDi} = (Vr_i + Vw_i)/2$;

– показатель эффективности использования дискового пространства – $E_{RAIDi} = n_e/n$, где n_e – эффективное количество дисков, n – общее количество дисков под RAID-массив.

3. Вероятность безотказной работы уровня RAID:

– RAID 0: $P_{RAID0}(n) = (1 - q)^n$, где q – вероятность отказа одного диска за определённый период (обычно за год), n – количество дисков массива.

– RAID 1: $P_{RAID1}(n) = (1 - q^2)^{n/2}$. Для 2 дисков: $P_{RAID1}(2) = 1 - q^2$.

– RAID 10: $P_{RAID10}(n) = (1 - q^2)^{n/2}$. Для 4 дисков: $P_{RAID10}(4) = (1 - q^2)^2$.

– RAID 5: $P_{RAID5}(n) = (1 - q)^{n-1} (1 + (n-1)q)$. Для 3 дисков: $P_{RAID5}(3) = (1 - q)^2 (1 + 2q)$.

– RAID 6: $P_{RAID6}(n) = (1 - q)^{n-2}(1 + (n - 2)q + (1 - 1,5n + 0,5n^2)q^2)$. Для 4 дисков: $P_{RAID6}(4) = (1 - q)^2(1 + 2q + 3q^2)$.

4. Производительность (для различных уровней RAID будет отличаться):

– RAID 0: $V_{RAID0}(n) = V_d \cdot n$, где V_d – скорость ввода-вывода одиночного диска, n – количество дисков RAID0. Для 2 дисков: $V_{RAID0}(2) = 2V_d$. Для 3 дисков: $V_{RAID0}(3) = 3V_d$. Для 4 дисков: $V_{RAID0}(4) = 4V_d$.

– RAID 1: $V_{RAID1}(n) = (2V_d + V_d/2)/2$. Для 2 дисков: $V_{RAID1}(2) = 1.25V_d$.

– RAID 10: $V_{RAID10}(n) = (V_d \cdot n + V_d \cdot n/2)/2$. Для 4 дисков: $V_{RAID10}(4) = 3V_d$. Для 6 дисков: $V_{RAID10}(6) = 4.5V_d$.

– RAID 5: $V_{RAID5}(n) = (V_d \cdot n + V_d \cdot n/4)/2$. Для 3 дисков: $V_{RAID5}(3) = 1.875V_d$. Для 4 дисков: $V_{RAID5}(4) = 2.5V_d$. Для 5 дисков: $V_{RAID5}(5) = 3.125V_d$. Для 6 дисков: $V_{RAID5}(6) = 3.75V_d$.

– RAID 6: $V_{RAID6}(n) = (V_d \cdot n + V_d \cdot n/6)/2$. Для 4 дисков: $V_{RAID6}(4) = 2.33V_d$. Для 5 дисков: $V_{RAID6}(5) = 2.917V_d$. Для 6 дисков: $V_{RAID6}(6) = 3.5V_d$.

5. Эффективность:

– RAID 0: $E_{RAID0}(n) = n_e/n = 1$, где n_e – эффективное количество дисков, n – общее количество дисков под RAID-массив.

– RAID 1: $E_{RAID1}(n) = 0.5$.

– RAID 10: $E_{RAID10}(n) = 0.5$.

– RAID 5: $E_{RAID5}(n) = (n - 1)/n$. Для 3 дисков: $E_{RAID5}(3) = 0.67$. Для 4 дисков: $E_{RAID5} = 0.75$.

Для 5 дисков: $E_{RAID5} = 0.8$.

– RAID 6: $E_{RAID6}(n) = (n - 2)/n$. Для 4 дисков: $E_{RAID6}(4) = 0.5$. Для 5 дисков: $E_{RAID6} = 0.6$. Для 6 дисков: $E_{RAID6} = 0.67$.

Характеристика и математическая модель генетического алгоритма. Генетические алгоритмы, основанные на эволюционных подходах, представляют собой мощный инструмент для решения задач оптимизации, позволяя находить приемлемые решения в сложных и многомерных пространствах поиска. В статье представлен генетический алгоритм, который нацелен на выбор оптимального варианта RAID-массива с учётом надёжности, производительности, эффективности использования дисков, а также стохастической природы входящих данных.

Основные шаги алгоритма включают инициализацию популяции возможных решений, оценку их приспособленности по заданным критериям, отбор лучших особей, генетические операции (крессовер и мутацию) и повторение этих шагов до достижения заданного критерия остановки. Особое внимание уделяется модификации стандартного алгоритма для учёта стохастической неопределённости, что позволяет повысить его предсказуемость и надёжность.

Рассмотрим задачу оптимизации функции $f(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} – вектор переменных, который нужно оптимизировать. Задача заключается в поиске вектора \mathbf{x} , который минимизирует или максимизирует функцию $f(\mathbf{x})$ в зависимости от постановки задачи.

Элементы генетического алгоритма:

1. **Хромосомы (индивиду)** есть представление потенциального решения задачи. В нашем случае хромосома представляет собой вектор \mathbf{x} , состоящий из n элементов (генов): $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

2. **Популяция:** множество хромосом (индивидуов), представляющих возможные решения задачи. Размер популяции обозначим через P .

3. **Фитнес-функция** $F(\mathbf{x})$ оценивает качество каждого индивида в популяции: в случае задачи минимизации $F(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})$, а в случае задачи максимизации $F(\mathbf{x}) = -f(\mathbf{x})$. Для учёта стохастической неопределённости параметров вводится их интервальное представление в виде диапазона возможных значений.

4. **Операции над популяцией:**

– **Инициализация популяции:** на первом шаге создаётся начальная популяция размером P , состоящая из случайно сгенерированных хромосом.

– **Оценка фитнес-функции:** для каждой хромосомы в популяции вычисляется значение фитнес-функции.

– *Отбор (селекция)*: из текущей популяции выбираются лучшие индивиды для создания следующего поколения. Существует несколько методов селекции, например, турнирный отбор, пропорциональный отбор и др.

– *Скрещивание (крессовер)*: два выбранных родителя обмениваются частями своих хромосом, создавая новое поколение потомков.

– *Мутация*: случайные изменения в некоторых генах потомков вносятся для поддержания разнообразия популяции.

– *Замещение*: новое поколение заменяет старое либо частично обновляет его.

В рамках представленной работы приводится пример расчёта оптимального варианта RAID-массива, иллюстрируя эффективность предложенного подхода на основе исходных данных. Результаты исследования могут быть полезны для современных компаний, стремящихся к оптимизации своих систем хранения данных в условиях растущих требований к надёжности и производительности.

Описание генетического алгоритма расчёта конфигурации RAID. Приведём описание алгоритма и пример расчёта конфигурации RAID с учётом, что типы RAID включают: RAID 0, RAID 1, RAID 10, RAID 5, RAID 6, а также с учётом стохастической параметрической неопределённости.

Рассмотрим генетический алгоритм сначала без учёта, затем с учётом стохастической параметрической неопределённости. Эта модификация предполагает, что параметры надёжности и производительности для каждого типа RAID могут варьироваться случайным образом, что требует учёта этой вариации при расчёте фитнес-функции и выборе оптимальной конфигурации.

1. *Представление хромосомы*: каждая хромосома представляет собой список целых чисел, соответствующих количеству дисков, назначаемому каждому уровню RAID. Например, хромосома [2, 2, 6, 0, 0] означает, что два диска назначаются RAID 0, два диска – RAID 1, шесть дисков – RAID 10, и ни одного диска – RAID 5 и RAID 6.

2. *Инициализация популяции*: сначала создаётся начальная популяция из случайных хромосом, каждая из которых удовлетворяет ограничениям на бюджет и количество дисков.

3. *Оценка фитнес-функции (целевой функции)*: для каждой хромосомы вычисляется фитнес-функция, которая учитывает надёжность, производительность и эффективность использования.

Показатели надёжности, производительности и эффективности использования СХД считаются как средние значения для каждого типа RAID, умножаемые на количество дисков, назначенное этому типу. Решения, нарушающие бюджетные или ресурсные ограничения, могут получать штрафы в фитнес-функции, но при этом учитываются стохастические flуктуации этих параметров.

4. *Отбор*: используется турнирный отбор, где из трёх случайно выбранных хромосом остаётся та, у которой наибольшее значение фитнес-функции.

5. *Крестовер (скрещивание)*: при скрещивании двух хромосом производится обмен частей хромосомы, что создаёт новую хромосому-потомка.

6. *Мутация*: с небольшой вероятностью одна из хромосом подвергается мутации, что приводит к изменению количества дисков, назначенного какому-то типу RAID.

7. *Замещение (создание новой популяции)*: новое поколение хромосом замещает текущее (потомки занимают места своих родителей).

8. *Повторение и останов*: процесс повторяется, пока не будет достигнуто условие остановки, например, достижение определённого числа поколений или стабилизация фитнес-функции. Популяция не производит потомство, которое значительно отличается от предыдущего поколения.

Пример расчёта. Предположим, что у нас есть *следующие параметры*:

Бюджет: 30 000 рублей.

Стоимость одного диска: 1600 рублей.

Максимальное количество дисков: 16.

$16 \times 1600 = 25600 \leq 30000$.

В случае недостаточности бюджета либо уменьшаем количество дисков, либо ищем другого поставщика, либо корректируем бюджет.

Вероятность отказа одного диска в течение года – $q = 0.05$.

Количество операций ввода/вывода в секунду (IOPS) – $V_d = 100$.

Коэффициенты важности: $w_p = 0.5$; $w_v = 0.4$; $w_e = 0.1$.

Характеристики RAID (минимальное количество):

- RAID 0 (2 диска): надёжность 0.9025, производительность 200, эффективность 100 %.
- RAID 1 (2 диска): надёжность 0.9975, производительность 125, эффективность 50 %.
- RAID 10 (4 диска): надёжность 0.995, производительность 300, эффективность 50 %.
- RAID 5 (3 диска): надёжность 0.9928, производительность 187.5, эффективность 67 %.
- RAID 6 (4 диска): надёжность 0.9995, производительность 233, эффективность 50 %.

Количество дисков для определённого уровня RAID также может быть равно нулю, если это поможет улучшить фитнес-функцию за счёт других уровней RAID.

Шаг 1: Инициализация популяции. Случайная инициализация хромосом:

- хромосома 1: [4, 0, 10, 0, 0];
- хромосома 2: [0, 2, 0, 3, 5];
- хромосома 3: [3, 0, 6, 4, 0];
- хромосома 4: [2, 2, 0, 5, 6];
- хромосома 5: [0, 0, 8, 0, 7];
- ...

Шаг 2: Оценка фитнес-функции. Рассчитаем фитнес-функцию для первой хромосомы [4, 0, 10, 0, 0]:

- RAID 0 (4 диска): $P_{RAID0}(n) = (1 - q)^n = 0.815$; $V_{RAID0}(n) = V_d \cdot n = 400$; $E_{RAID0}(n) = n_e/n = 1$.

Нормализованные значения: $P^H_{RAID0}(4) = 0$; $V^H_{RAID0}(4) = 1$; $E^H_{RAID0}(4) = 1$;

- RAID 1 (0 дисков): $P^H_{RAID1}(0) = 0$; $V^H_{RAID1}(0) = 0$; $E^H_{RAID1}(0) = 0$;

- RAID 10 (10 дисков): $P_{RAID10}(10) = (1 - q^2)^5 = 0.988$; $V_{RAID10}(10) = (V_d \cdot 10 + V_d \cdot 10/2)/2 = 750$;

$E_{RAID10}(n) = 0.5$.

Нормализованные значения: $P^H_{RAID10}(10) = 0.969$; $V^H_{RAID0}(10) = 0.722$; $E^H_{RAID0}(10) = 0.5$;

- RAID 5 (0 дисков): $P^H_{RAID5}(0) = 0$; $V^H_{RAID5}(0) = 0$; $E^H_{RAID5}(0) = 0$;

- RAID 6 (0 дисков): $P^H_{RAID6}(0) = 0$; $V^H_{RAID6}(0) = 0$; $E^H_{RAID6}(0) = 0$.

Суммарная надёжность: $(0 \times 4 + 0.988 \times 10)/16 = 0.6056$.

Суммарная производительность: $(1 \times 4 + 0.722 \times 10)/16 = 0.7014$.

Суммарная эффективность использования: $(1 \times 4 + 0.5 \times 10)/16 = 0.5625$.

Фитнес-функция: $F_1(n) = 0.5 \times 0.6056 + 0.4 \times 0.7014 + 0.1 \times 0.5625 = \mathbf{0.6396}$.

Аналогично находим фитнес-функции 2-5-й хромосом:

$F_2(n) = 0.5 \times 0.611 + 0.4 \times 0.263 + 0.1 \times 0.4375 = \mathbf{0.4543}$.

$F_3(n) = 0.5 \times 0.5955 + 0.4 \times 0.575 + 0.1 \times 0.5625 = \mathbf{0.584}$.

$F_4(n) = 0.5 \times 0.7749 + 0.4 \times 0.5098 + 0.1 \times 0.75 = \mathbf{0.6664}$.

$F_5(n) = 0.5 \times 0.9173 + 0.4 \times 0.582 + 0.1 \times 0.625 = \mathbf{0.7539}$.

Шаг 3: Отбор. Проведём турнирный отбор среди первых пяти хромосом:

- Хромосома 1: [4, 0, 10, 0, 0] – **0.6396**.
- Хромосома 2: [0, 2, 0, 3, 5] – **0.4543**.
- Хромосома 3: [3, 0, 6, 4, 0] – **0.584**.
- Хромосома 4: [2, 2, 0, 5, 6] – **0.66646**.
- Хромосома 5: [0, 0, 8, 0, 7] – **0.7539**.

Победителем тура станет хромосома 5.

Шаг 4: Кроссовер. Проведём кроссовер между хромосомой 5 и другой случайно выбранной хромосомой, например, хромосомой 4:

- хромосома 4: [2, 2, 0, 5, 6];
- хромосома 5: [0, 0, 8, 0, 7].

После одноточечного кроссовера в точке 5 получаем хромосомы-потомки:

- хромосома 4: [2, 2, 0, 5, 7];
- хромосома 5: [0, 0, 8, 0, 6].

Шаг 5: Мутация. С вероятностью 0.05 произойдёт мутация в пятой хромосоме, например, во втором типе RAID:

- Мутация: изменяется количество дисков для RAID 1 – с 0 на 2.

Новая хромосома: [0, 2, 8, 0, 6].

Шаг 6: Замещение. Новое поколение хромосом замещает старое, и процесс продолжается до достижения максимального числа поколений или стабилизации фитнес-функции.

Итоговый результат. По завершении работы алгоритма может быть найдена оптимальная конфигурация RAID:

- **Итоговая хромосома:** [0, 0, 10, 0, 6] с фитнес-функцией **0.8068**. У остальных хромосом значительно меньше.
- **Конфигурация RAID:** 10 дисков для RAID 10, 6 дисков для RAID 6, 0 дисков для RAID 0, RAID 1 и RAID 5.

При выборе других коэффициентов важности победителем в итоге может оказаться другая хромосома с большей по значению фитнес-функцией. Кроме того, на выбор может также повлиять учёт неопределённости исходных данных, таких как вероятность отказа или скорость чтения/записи.

Учёт параметрической неопределённости. При наличии возможных колебаний или не точном задании параметров, таких как вероятность отказа одного диска и скорости чтения-записи диска, изменение параметров может значительно повлиять на финальный результат вычисления значений фитнес-функций и последующий выбор. Допустим, неопределённость параметра q задаётся интервальным диапазоном: $q \in [0.03, 0.07]$ либо в процентах отклонения – $\pm 40\%$. Неопределённость параметра V_d задаётся интервальным диапазоном: $V_d \in [80, 120]$ либо в процентах отклонения – $\pm 20\%$.

Рассмотрим, как неопределённость может повлиять на оценки и, соответственно, на выбор конфигураций.

Шаг 1. Определение интервалов неопределённости.

Для вероятности отказа одного диска: $0.03 \leq q \leq 0.07$.

Для скорости чтения-записи: $80 \leq V_d \leq 120$.

Это означает, что при вычислении фитнес-функций для каждой хромосомы необходимо учитывать оценки в границах этих интервалов. Мы можем сделать несколько расчётов с разными значениями q и V_d в пределах заданных границ.

Шаг 2. Пересчёт фитнес-функции.

Предположим, что для каждого параметра у нас имеются значения, соответствующие различным сценариям. Например, мы можем рассмотреть следующие значения:

- для q : 0.03, 0.05, 0.07;
- для V_d : 80, 100, 120.

Используя различные комбинации этих значений, мы можем пересчитать фитнес-функцию для каждой хромосомы при различных комбинациях параметров, а затем проанализировать, как это повлияет на финальный выбор конфигурации RAID.

Для начальной хромосомы 5: [0, 0, 8, 0, 7]:

При $q = 0.03$ и $V_d = 80$:

суммарная надёжность $P(n) = (0.9834 \times 8 + 0.9804 \times 7)/16 = 0.9206$,

суммарная производительность $(0.9286 \times 8 + 0.6840 \times 7)/16 = 0.7635$,

суммарная эффективность использования $(0.5 \times 8 + 0.8571 \times 7)/16 = 0.625$,

фитнес-функция $F_5(n) = 0.5 \times 0.9206 + 0.4 \times 0.7635 + 0.1 \times 0.625 = 0.8282$.

При $q = 0.05$ и $V_d = 100$:

суммарная надёжность $P(n) = (0.9704 \times 8 + 0.9875 \times 7)/16 = 0.9173$,

суммарная производительность $(0.7143 \times 8 + 0.5139 \times 7)/16 = 0.5820$,

суммарная эффективность использования $(0.5 \times 8 + 0.8571 \times 7)/16 = 0.625$,

фитнес-функция $F_5(n) = 0.5 \times 0.9173 + 0.4 \times 0.5820 + 0.1 \times 0.625 = 0.7539$.

При $q = 0.07$ и $V_d = 120$:

суммарная надёжность $P(n) = (0.9558 \times 8 + 0.9906 \times 7)/16 = 0.9113$,

суммарная производительность $(0.5714 \times 8 + 0.4005 \times 7)/16 = 0.4609$

суммарная эффективность использования $(0.5 \times 8 + 0.8571 \times 7)/16 = 0.625$,

фитнес-функция $F_5(n) = 0.5 \times 0.9113 + 0.4 \times 0.4609 + 0.1 \times 0.625 = 0.7025$.

Шаг 3. Обработка результатов.

Анализ результатов показывает, что возможен существенный разброс значений фитнес-функции. Кроме того, симметричное отклонение значений параметров от среднего ($q = 0.05 \pm 0.02$, $V_d = 100 \pm 20$) тем не менее приводит к несимметричному отклонению фитнес-функций от исходного невозмущённого значения:

$(q = 0.07) \text{ и } (V_d = 120)$,

$(q = 0.05) \text{ и } (V_d = 100)$,

$(q = 0.03) \text{ и } (V_d = 80)$,

$F^-_5(n) = 0.7025$,

$F_5(n) = 0.7539$,

$F^+_5(n) = 0.8282$,

отклонение от $F_5(n)$: $\Delta^- = 0.0743$,

$(F^-_5(n) + F^+_5(n))/2 = 0.7654$,

отклонение от $F_5(n)$: $\Delta^+ = 0.0514$.

При тех же неопределённых параметрах фитнес-функция другой хромосомы [2, 2, 0, 5, 6] будет показывать следующие значения:

$(q = 0.07) \text{ и } (V_d = 120)$,

$(q = 0.05) \text{ и } (V_d = 100)$,

$(q = 0.03) \text{ и } (V_d = 80)$,

$F^-_4(n) = 0.6259$,

$F_4(n) = 0.6664$,

$F^+_4(n) = 0.7230$,

отклонение от $F_4(n)$: $\Delta^- = 0.0405$,

$(F^-_4(n) + F^+_4(n))/2 = 0.7654$,

отклонение от $F_4(n)$: $\Delta^+ = 0.0566$.

Правая граница диапазона $F^+_4(n)$ перекрывается левой границей диапазона $F^-_5(n)$, а это значит, что в процессе работы генетического алгоритма может быть сделан выбор в пользу другой хромосомы, что приведёт к выбору несколько другой конфигурации СХД.

Шаг 4. Учёт влияния неопределённости на выбор конфигурации.

Получаемые фитнес-функции будут меняться с изменением параметров q и V_d , а также в случае уточнения коэффициентов важности в процессе эксплуатации и пополнения статистики. Например, увеличение вероятности отказа диска, а также рост скорости чтения/записи могут положительно сказаться на одной конфигурации и негативно на другой. В результате конфигурация, которая изначально выглядела менее предпочтительной, может оказаться более устойчивой с учётом этих неопределённостей.

Учёт неопределённости позволяет получать решения, более устойчивые к изменениям параметров, а не рассчитывать на их статические значения, которые могут измениться из-за различных обстоятельств. Например, если в условиях интенсивной эксплуатации и высокой вероятности отказов оборудования выясняется, что определённые конфигурации RAID оказываются менее надёжными, можно улучшить свой выбор, увеличив количество дисков на уровне RAID 6 вместо RAID 5, что обеспечит лучшими показателями, даже если производительность может немного падать (что может быть в рамках допустимого). Таким образом, используя диапазоны значений и учитывая неопределённость, можно получить более сбалансированное, обоснованное и рыночное решение.

Заключение. Предложенный генетический алгоритм эффективно справляется с задачей выбора оптимальной конфигурации RAID-массива, принимая во внимание стохастическую природу параметров надёжности и производительности [8–10]. Такой подход позволяет минимизировать риски, связанные с непредсказуемостью поведения систем, и обеспечить максимальную надёжность и производительность при заданных ограничениях. Приведённый пример показывает, как генетический алгоритм может использоваться для поиска оптимальной конфигурации RAID-массива с учётом ограничений на бюджет и количество дисков, а также неопределённости параметров надёжности и производительности.

Учет неопределённости параметров при расчёте фитнес-функций обеспечивает более обоснованный и надёжный выбор конфигураций. Он позволяет гибко адаптироваться к изменяющимся условиям, повышая вероятность выбора наиболее эффективного решения в конечном итоге. Страгегический подход к определению параметров и их колебаний может дать концептуальное преимущество в условиях неопределённости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, Б. А. Моделирование каскадной системы повышения качества хранения информации / Б. А. Савельев, Г. В. Бобрышева // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». – 2005. – Т. 1. – С. 205-207.
2. Cottrill C. D., Derrible S. Leveraging big data for the development of transport sustainability indicators // Journal of Urban Technology. 2015. Т. 22. № 1. Р. 45-64.
3. Иванцов, Д. С. Подход к обеспечению устойчивости и оперативности функционирования распределённых хранилищ данных о безопасности информации / Д. С. Иванцов, И. Б. Саенко // XIX Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2024)», Санкт-Петербург, 23-25 октября Р32 2024 г. – СПб.: СПОИСУ, 2024. – С. 108.
4. Лазарева, С. В. Системы хранения данных RAIDIX: российские инновации на мировой арене / С. В. Лазарева, А. В. Маров // Инновации. – 2016. – № 5 (211). – С. 25-30.
5. Thomasian A., Tang Y. Performance, reliability, and performability of a hybrid RAID array and a comparison with traditional RAID1 arrays // Cluster Computing. 2012. Т. 15. Р. 239-253.
6. Савин, И. В. Выбор оптимального уровня RAID для повышения надёжности хранения информации / И. В. Савин // Современные тенденции развития образования, науки и технологий: сборник научных трудов по материалам V междунар. науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. В. Туголукова. – М.: Индивидуальный предприниматель Туголуков Александр Валерьевич, 2018. – С. 216-219.
7. Anderson E. et al. Selecting RAID Levels for Disk Arrays // FAST. 2002. Т. 2. Р. 189-201.
8. Атрощенко, В. А. К вопросу выбора наилучшего уровня RAID для хранилищ данных информационной системы, обеспечивающей быструю обработку больших данных / В. А. Атрощенко, А. И. Тымчук // Современные научно-технические технологии. – 2017. – № 4. – С. 12-16.
9. К оценке уровня надёжности и управлению конфигурацией RAID-массивов системы хранения данных на основе нечёткого вывода / Гончаренко В. А. [др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 94-106.
10. Гончаренко, В. А. Обоснование выбора производительности вычислительных систем при неизвестных параметрах распределений рабочей нагрузки / В. А. Гончаренко, А. Н. Соколовский, А. В. Калюжный // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2021. – № 4. – С. 152-160.



11. Zhao Y., Wu H., Yang C., Liu Z., Cheng Q. New Reliability Modeling Methods for Structural Systems with Hybrid Uncertainty. *Quality and Reliability Engineering International*. 2020. Vol. 36. no. 6. P. 1855-1871.
12. Гончаренко, В. А. Модели и методы анализа систем массового обслуживания с параметрической неопределенностью / В. А. Гончаренко // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2017. – № 4 (12). – С. 5-11.
13. Гончаренко, В. А. Композиционный подход к имитационному моделированию систем массового обслуживания со случайными параметрами / В. А. Гончаренко, А. Д. Хомоненко, Р. Абу Хасан // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23. – № 6. – С. 1577-1608.
14. Wang S. Y., Tai K. Structural topology design optimization using Genetic Algorithms with a bit-array representation // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 194, Issues 36–38, 23 September 2005, p. 3749-3770.
15. Liu X., Wang G., Liu J. A Double-Objective Genetic Algorithm for Parity Declustering Optimization in Networked RAID // *Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP 2007)*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/221312608> (accessed 26 January 2025).

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINERY

Шиляев А. В., Бахматов П. В.
A. V. Shilyaev, P. V. Bakhmatov

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ТАКТИЧЕСКИМ ПРИЁМОМ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЁТНЫХ ДАННЫХ

STUDY OF PERMANENT JOINTS PRODUCED BY TACTICAL ARGON-ARC WELDING USING COMPUTATIONAL DATA

Шиляев Алексей Вячеславович – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Aleksey V. Shilyaev – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: mim@knastu.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологии сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В работе представлены методика и результаты практического использования расчёта параметров для осуществления тактических приёмов аргонодуговой сварки. Показаны образцы, полученные путём расчёта угла наклона горелки с изменением диаметра сопла и увеличением силы сварочного тока. Технологическая особенность данного приёма показывает упрощение в выборе нужных параметров при сварке, т. к. в современном исполнении отсутствует точное описание выполнения швов аргонодуговой сварки с использованием расчётных параметров получения нужного пространственного положения горелки при сварке, таких как дуговой зазор, вылет электрода, угол наклона горелки, диаметр сопла, сила сварочного тока и напряжение на дуге.

Summary. The paper presents the results of the practical use of parameter calculations for the implementation of tactical techniques for argon arc welding. The obtained samples are shown by calculating the angle of inclination of the torch with changing the diameter of the nozzle, and increasing the strength of the welding current. The technological feature of this technique shows simplification in the selection of the necessary parameters when welding, since in the modern version there is no precise description of the execution of argon arc welding seams, using calculated parameters for obtaining the desired spatial position of the torch during welding, such as arc gap, electrode stickout, torch inclination angle, nozzle diameter, welding current and arc voltage.

Ключевые слова: аргонодуговая сварка, сварные соединения, режимы сварки, расчётная схема, калькулятор тактических параметров.

Key words: argon arc welding, welded joints, welding modes, design diagram, tactical parameters calculator.

Научно-исследовательские работы выполнены за счёт средств ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (НИР № ВН001/2023 «Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочного/наплавочного валика (в том числе и в применении аддитивных технологий) на установке автоматической сварки в защитных газах»).

УДК 621.791

Введение. Аргонодуговая TIG сварка в современном исполнении является одним из основных видов сварки труб из цветных сплавов и нержавеющих сталей. Основным преимуществом изготовления сварных конструкций аргонодуговой сваркой становится возможность получить каче-

ственное сварное соединение с использованием современных присадочных материалов. В практике получения сварных соединений различных сталей и сплавов ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом всё чаще применима технология обкатки (опирания) керамическим соплом горелки свариваемой поверхности, получившая название «бабочка» или «американка» (см. рис. 1).

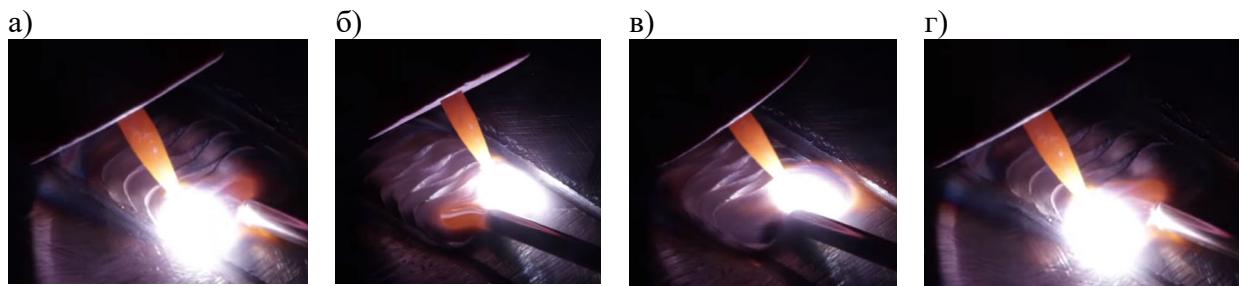


Рис. 1. Движения керамического сопла и дуги по технике «бабочка»:
а – крайнее правое положение; б – крайнее левое положение; в – возврат в крайнее правое положение; г – повторное крайнее правое положение

Эта техника проста за счёт упора горелки на деталь, позволяет поддерживать стабильные значения дугового зазора, тем самым облегчает монотонную работу сварщика, при этом сварщик манипулирует горелкой, делая движения, напоминающие восьмёрку (см. рис. 2), а движение горелки с постоянной амплитудой гарантирует равномерность геометрических параметров сварного шва (см. рис. 3). Тем не менее ни в справочной, ни в какой-то другой нормативно-технической литературе не задаются такие параметры, как вылет электрода, дуговой зазор, а, как видно из расчётной схемы (см. рис. 4), они взаимозависимые. Например, выбор меньшего радиуса керамического сопла потребует меньшего вылета электрода при сохранении угла наклона горелки.

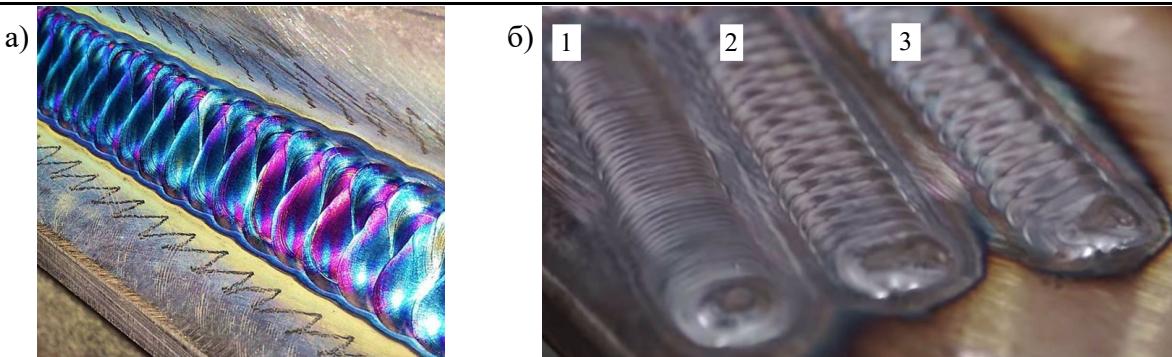


Рис. 2. Манипуляция положением горелки: а – крайнее левое; б – среднее; в – крайнее правое

На рис. 3, а видны характерные следы, расположенные в зоне термического влияния, рядом со швом, оставляемые керамическим соплом. Размер чешуйки зависит от скорости манипулирования горелкой: при медленной скорости чашутик крупнее, при весьма быстром перемещении – мельче (см. рис. 3, б).

Методология экспериментального исследования. Ручная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом без присадочного материала производилась сварочным аппаратом Kemppi MLS 320, радиус сопла (номер) 8 и 10 мм, диапазон сварочного тока 100 и 120 А, газовая линза, вольфрамовый электрод диаметром 2,4 мм. Расход газа – 5 л/мин. Основной металл: конструкционная низколегированная сталь обыкновенного качества Ст3пс.

Визуально-измерительный контроль производился набором ВИК по ГОСТ Р ИСО 17637-2014 с использованием измерительной лупы 10-кратного увеличения ЛИ-10.

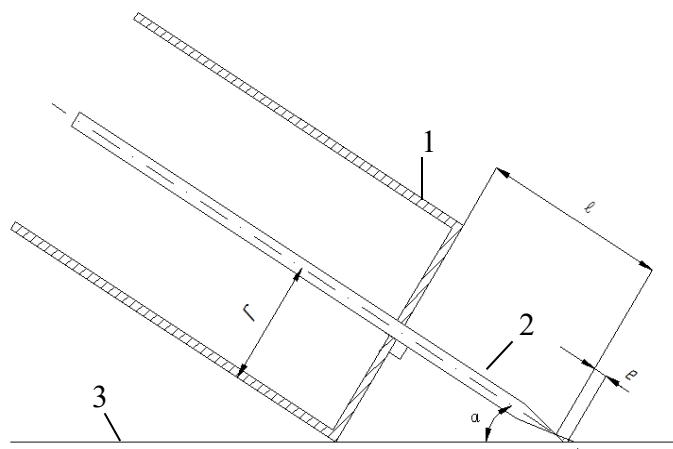


1 – большая скорость; 2 – средняя скорость; 3 – низкая скорость

Рис. 3. Сварной шов, полученный методом «бабочка» (а)
на различных скоростях манипулирования (б)

Для поверхностного травления использовался реагент Гейна, содержащий на 1000 мл воды 53 г хлористого аммония NH_4Cl и 85 г хлорной меди CuCl_2 . При погружении макрошлифа в реагент на 30...60 с происходит обменная реакция: железо вытесняет медь из водного раствора, и она оседает на поверхности шлифа на участках, недостаточно защищённых медью (поры, трещины, неметаллические включения), происходит травление. Затем макрошлиф вынимают, слой осевшей меди снимают тампоном под струёй воды и протирают макрошлиф досуха, чтобы предохранить его от быстрого окисления на воздухе. Этот реагент хорошо выявляет характер ликвации (особенно фосфора и углерода), волокнистую структуру деформированной низко- и среднеуглеродистой стали, а также сравнительно крупную пористость, например в сварных соединениях. Участки, обогащённые фосфором и углеродом, окрашиваются на макрошлифах в более тёмный цвет. Однако реагенты поверхностного травления не могут заменить реагента глубокого травления при выявлении флокенов, а также трещин и пор, не выходящих непосредственно на поверхность металла.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Расчётная схема для определения величин тактических параметров аргонодуговой сварки неплавящимся электродом приведена на рис. 4. Учитывая, что керамическое сопло 1 постоянно опирается на поверхность свариваемой детали 3, а угол между вольфрамовым электродом 2 и выходной плоскостью сопла прямой, для расчёта тактических параметров следует принять схему прямоугольного треугольника за расчётную (см. рис. 4), где r – диаметр сопла, α – угол наклона горелки, ℓ – вылет вольфрамового электрода, e – дуговой зазор.



1 – керамическое сопло горелки; 2 – вольфрамовый электрод; 3 – поверхность детали

Рис. 4. Расчётная схема для определения величин тактических параметров аргонодуговой сварки неплавящимся электродом

При расчёте вылета электрода значения угла наклона сварочной горелки α измеряются в радианах, полученные значения переведены в $\text{tg}(\alpha)$ с получением формулы

$$l = r/(\text{tg}(\alpha) - e).$$

Влияние вылета вольфрамового электрода изменяет угол наклона горелки, следовательно, ширину сварочной ванны, ширину колебательного движения, чешуйчатость шва, глубину проплавления, надёжность газовой защиты. Так, при уменьшении вылета электрода увеличивается угол наклона горелки, сварочная ванна приобретает концентрические очертания, минимизируется в диаметре, увеличивается глубина проплавления, улучшается газовая защита, что видно по соломенному цвету следов побежалости на поверхности сформированного валика. Увеличение вылета электрода уменьшает угол наклона, вытягивает сварочную ванну в направлении сварки, что минимизирует величину диапазона колебательного движения, снижает глубину проплавления, ухудшает газовую защиту (цвета побежалости от синего до фиолетового свидетельствуют о перегреве металла шва) [2].

Расчёт данных параметров для получения неразъёмных соединений позволит получить равномерную защиту сварочной ванны инертным газом, избежать наружных и внутренних дефектов, в том числе вольфрамовых включений, возникающих при касании электродом сварочной ванны [3].

Для упрощения вычислений разработан калькулятор расчёта тактических параметров при сварке, учитывающий угол наклона горелки, вылет электрода, размер газового сопла, а также дуговой зазор при сварке (см. рис. 5).

Для получения расчёта принято постоянное положение горелки 45° , дуговой зазор 2 мм, радиус рабочего сопла для корневого, заполняющего и облицовочного прохода. В ходе вычисления получаем размер вылета электрода при сварке (см. рис. 5) [2].

a)	б)	в)	г)
$\ell, \text{мм}$	3,000	$\ell, \text{мм}$	6,000
$r, \text{мм}$	5	$r, \text{мм}$	8
$e, \text{мм}$	2	$e, \text{мм}$	2
$\alpha, \text{град.}$	45	$\alpha, \text{град.}$	45

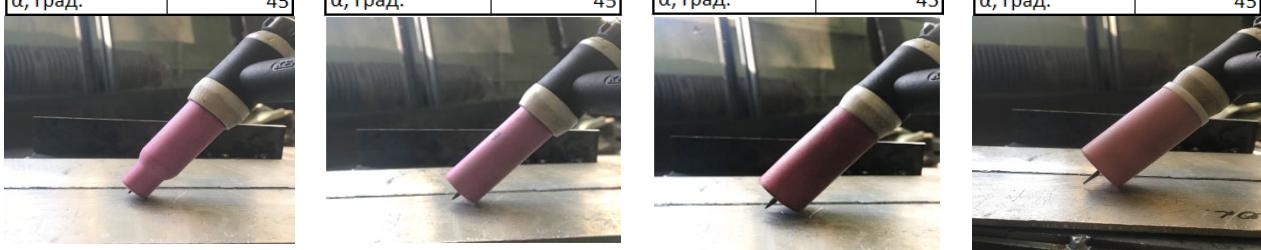


Рис. 5. Калькулятор расчёта тактических параметров и его практическое применение для многопроходного шва

На рис. 5 показана удовлетворительная сходимость параметров калькуляции с параметрами, полученными на практике: при сохранении угла наклона горелки и изменении радиуса сопла (требуется при многопроходной сварке) рассчитывается вылет электрода.

При выполнении сварных соединений ручной аргонодуговой TIG сваркой существуют рекомендованные параметры вылета электрода, что затрудняет получение правильного положения сварочной горелки при сварке по технике «бабочка». В ходе получения неразъёмных соединений (см. рис. 6) выполнено четыре сварных шва с использованием сопла диаметром 8 и 10 мм, сварочный ток устанавливался 100 и 120 А соответственно. При выполнении сварки всех образцов неизменным параметром принята ширина шва – 10 мм, с этой целью на образцах нанесены продольные риски для ориентировки сварщика при выполнении манипуляций горелкой.



Рис. 6. Образцы сварных соединений

В табл. 1 показаны образцы, полученные в ходе реализации эксперимента путём установления параметров исходя из калькуляции расчётов. При изменении параметров наблюдается увеличение глубины проплавления при выполнении тактического приёма. Скорость перемещения электрода вдоль сварного шва влияет на то, сколько времени есть у энергии дуги на то, чтобы проникнуть в основной материал в каждой отдельно взятой точке шва. По мере увеличения скорости сварки время нахождения дуги в отдельной точке шва снижается, из-за чего снижается глубина проплавления. По мере снижения скорости сварки время нахождения дуги в отдельной точке шва увеличивается, а глубина проплавления становится больше. Напряжение дуги, напротив, не оказывает практически никакого влияния на глубину проплавления. Хотя изменения напряжения могут вызвать минимальные изменения глубины проплавления, его влияние по сравнению с силой тока и другими переменными весьма ограничено. Напряжение дуги оказывает большее влияние на её длину.

Таблица 1
Влияние тактических параметров сварки на геометрические параметры сварных швов

Но- мер об- разца	Сварной образец	Тактические параметры сварки							Геометрические параметры шва	
		Наруж- ный ра- диус соп- ла (номер сопла), мм	Сва- роч- ный ток, А	Вы- лет элек- тро- да, мм	Угол накло- на элек- тро- да, град	Ду- гово- й зазор, мм	Ско- рость свар- ки, мм/ч	Напря- жение на дуге, В	Шири- на, мм	Глуби- на про- пра- вле- ния, мм
1		8	100	10	45	2	11	19	10	1,9
2		8	120	10			10	20	10	2,0
3		10	100	12			11	19	10	2,3
4		10	120	12			10	20	10	2,9

При равных значениях ширины шва в процессе сварки, угла наклона горелки, дугового зазора с изменением параметров сварочного тока, радиуса сопла, вылета электрода было установлено изменение глубины проплавления на 52 % (см. рис. 7). С повышением значений сварочного тока скорость сварки увеличилась, соответственно, увеличилась амплитуда колебательного движения, при этом сопротивление на участке цепи уменьшилось, что привело к стабильности горения дуги на протяжении всего процесса.

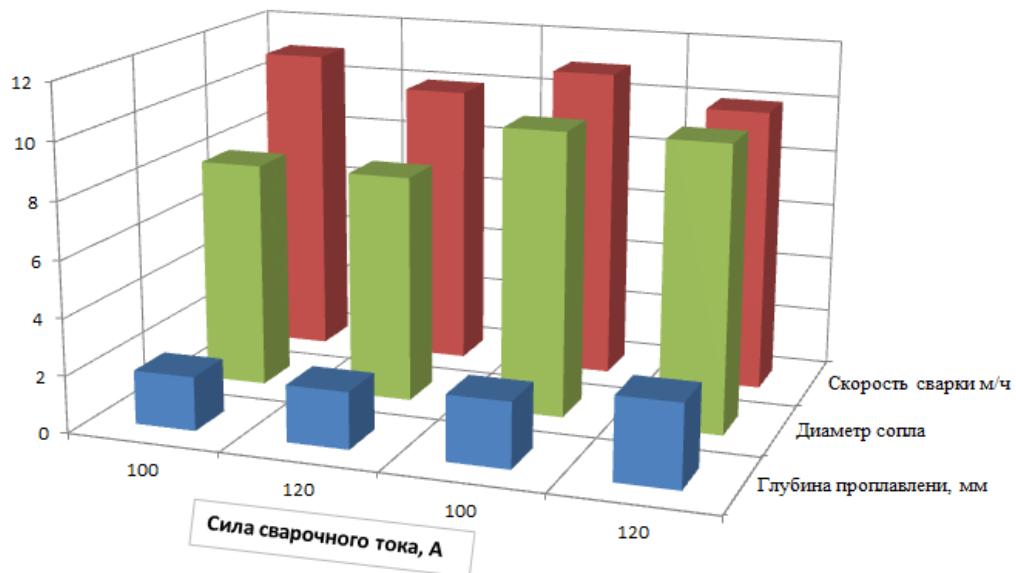


Рис. 7. Зависимость расчётных параметров и данных, полученных экспериментальным способом

Выводы. В ходе экспериментального выполнения образцов согласно расчётной схеме определения величин тактических параметров аргонодуговой сварки неплавящимся электродом получены значения, которые показывают, что изменение параметров силы сварочного тока, напряжения, радиуса сопла, вылета электрода, скорости сварки и принятых параметров положения угла наклона электрода, дугового зазора положительно сказывается на увеличении глубины проплавления. Показано, что с увеличением глубины проплавления повышаются прочностные характеристики сварного соединения, которые приведут к качественному сплавлению свариваемых кромок нужных параметров согласно требованиям нормативно-технической документации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиляев, А. В. Тактические приёмы выполнения швов аргонодуговой сварки / А. В. Шиляев, П. В. Бахматов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы II Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 14-18 ноября 2022 года / редкол.: А. В. Космынин (отв. ред.) [и др.]. Ч. 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2022. – С. 188-192.
2. Бахматов, П. В. Исследование влияния техники манипулирования рабочим торцом электрода при TIG сварке на качество формирования шва / П. В. Бахматов, А. В. Фролов, А. С. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III (51). – С. 90-94.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Технология и оборудование сварки плавлением / под ред. Г. Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
5. Mikami, H. Rapports sur le comportement des electrodes de tungstene en soudage. TIG / H. Mikami, M. Suzuki, R. Ishii // Soudage et techn. Connexes. – 1966. – № 7-8. – P. 333-336.
6. Goodman, I. S. New gas tungsten – arc welding electrodes / I. S. Goodman, H. J. Ehringer, R. L. Hackman // Welding Journal. – 1963. – № 7. – P. 567-569.
7. Справочник по сварке. В 2 т. Т. 2 / под ред. Е. В. Соколова. – М.: Машгиз, 1961. – 664 с.

Саблин П. А., Косачев К. Д.

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Саблин П. А., Косачев К. Д.

P. A. Sablin, K. D. Kosachev

ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

THE SEARCH FOR THE OPTIMAL USE OF DIGITAL TWINS IN THE MACHINING OF MACHINE PARTS BASED ON THE ANALYSIS LITERARY SOURCES

Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

Косачев Кирилл Дмитриевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета, ассистент кафедры «Машиностроение» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Kirill D. Kosachev – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University, Assistant at the Department of Mechanical Engineering (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: KodmicH@yandex.ru.

Аннотация. В статье описано современное состояние вопроса применения цифровых двойников при изготовлении деталей машин механической обработкой. На основании анализа литературных источников выявлены недостатки существующих моделей цифровых двойников, описывающих процесс резания. Предложена блок-схема цифрового двойника процесса резания, который включает в себя цифровые двойники основных компонентов системы резания.

Summary. The article describes the current state of the issue of the use of digital twins in the manufacture of machine parts by mechanical processing. Based on the analysis of literary sources, the disadvantages of existing digital twin models describing the cutting process have been identified. A block diagram of the digital twin of the cutting process is proposed, which includes digital twins of the main components of the cutting system.

Ключевые слова: цифровой двойник, механическая обработка, обработка резанием, шероховатость поверхности, индустрия 4.0, нелинейная динамика, нейросеть.

Key words: digital twin, mechanical processing, cutting, surface roughness, industry 4.0, nonlinear dynamics, neural network.

УДК 621.9

Введение. В рамках концепции четвёртой промышленной революции (так называемой индустрии 4.0) предполагается широкое внедрение в промышленное производство информационных технологий, анализа данных и киберфизических систем – превращение автоматизированного с помощью электроники и вычислительной техники в рамках индустрии 3.0 производства в умное производство. Переход промышленности к индустрии 4.0 повышает эффективность производства, снижает затраты ресурсов при производстве продукции, а также открывает широкие возможности для оптимизации существующих производственных цепочек и процессов путём цифровизации. Одним из возможных вариантов перехода к индустрии 4.0 в обрабатывающей промышленности является цифровой двойник.

Целью работы является выявление недостатков существующих моделей цифровых двойников на основании анализа литературных источников, а также предложение возможных вариантов по оптимизации применения действующих моделей цифровых двойников.

На основании распоряжения Правительства Российской Федерации, утверждающего стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, предполагается, что при реализации стратегического направления необходимы широкое внедрение в промышленности технологий искусственного интеллекта, переход к умному производству [1]. Одной из множества задач, необходимых для цифровой трансформации, является повышение доли предприятий, использующих технологии цифровых двойников.

Цифровой двойник – концепция, впервые предложенная Майклом Гривсом в 2002 году для описания виртуальной копии реального объекта, полностью описывающей его свойства и позволяющей прогнозировать поведение реального объекта путём виртуального моделирования без проведения практических экспериментов [2].

В настоящее время на территории Российской Федерации приняты нормативная документация, стандартизирующая цифровые двойники изделий, и модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 [3; 4], описывающие определения и общую структуру применения данных понятий. Однако определения цифрового двойника, сформулированные разными исследователями с момента создания концепции, отличаются [5–7]. Также неоднозначно понимание концепции цифрового двойника в исследовательской среде. Существуют различные структуры и классификации цифровых двойников в зависимости от сферы применения (логистика наземного и воздушного транспорта, добыча полезных ископаемых, медицина, атомная энергетика, менеджмент качества, строительство, электрические сети, образование, социология, сложные технические изделия, технологические режимы химических производств и т. д.) и масштабов описываемых реальных процессов, но все классификации сходятся к наличию трёх компонентов, являющихся частью цифрового двойника (см. рис. 1):

– наличие реального объекта, с которого производится копирование в цифровую реальность;

– наличие цифрового объекта, копирующего реальный объект;

– наличие двунаправленной связи между реальным объектом и его цифровой копией: цифровая копия получает данные от реального объекта с помощью различных средств автоматизации, например датчиков скорости, вибрации, силы тока, температуры, расхода и т. д., производит обработку полученных сигналов, на основании полученного результата вычислений при обработке прогнозирует (например, при помощи алгоритмов нейронносетевого моделирования) и корректирует реальные параметры, привязанные к реальному объекту.

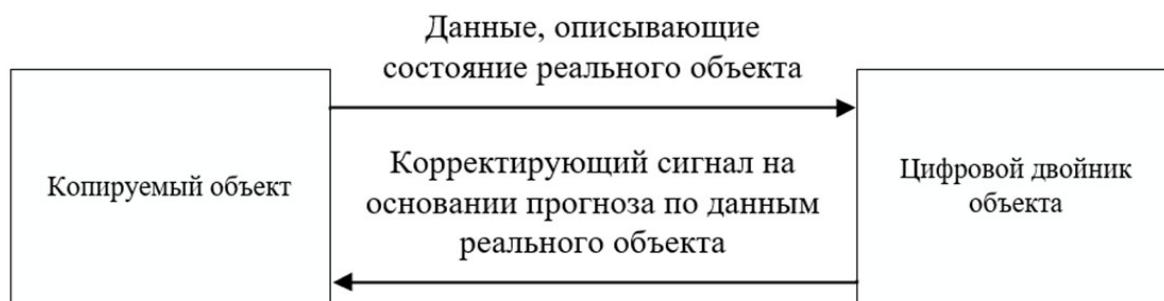


Рис. 1. Базовая схема работы цифрового двойника

Одной из основных задач, стоящих перед исследователями и промышленностью при переходе к цифровому производству и индустрии 4.0, является разработка комплексного цифрового двойника процесса механической обработки материалов, который позволит повысить эффективность процесса механической обработки путём достижения заданного качества поверхности изделия, минимальных потерь материала, наиболее оптимального использования инструмента при заданных режимах резания и материале заготовки, корректной эксплуатации станочного оборудования на основании данных, поступающих от датчиков.

Данный цифровой двойник будет являться одним из компонентов комплексной киберфизической системы производства деталей машин.

Однако в силу нелинейности процессов, происходящих при механической обработке, формирование цифрового двойника, корректирующего входные параметры обработки в процессе производства деталей машин, является нетривиальной задачей.

Обработка деталей машин осуществляется на станочных системах. При индустрии 4.0 станочные системы представляют собой станки с числовым программным управлением (ЧПУ), предоставляющие широкий набор параметров, позволяющий косвенно контролировать процесс производства.

В качестве основных компонентов, которые необходимо включить в процесс цифровизации механической обработки деталей машин (т. е. формирования цифрового двойника), можно рассматривать компоненты системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» (СПИД), каждый из которых вносит свои лимитирующие факторы при производстве продукции.

В исследованиях [8; 9] авторы предлагают технологию создания и устройство для разработки цифрового двойника станка с ЧПУ. Создание цифрового двойника проходит в два этапа: 1) сбор рабочих характеристик станка, 2) машинное обучение функциональности станка. Предложенное устройство собирает данные систем станка, запоминает, преобразует их и далее переводит в локальную сеть для симуляции работы станка. Но данные исследования требуют дальнейшего развития, формирования прототипа цифрового двойника и затем его экспериментального подтверждения.

В работах [10; 11] разрабатывается цифровой двойник станка лазерной резки листового металла путём моделирования его конструкции и проводятся вычисления мощности лазера, скорости резания и других входных параметров. Данные работы демонстрируют цифровой двойник станочного оборудования, однако они носят узкоспециализированный характер, поскольку станки предназначены только для резки листового металла, а также требуют сбора практических данных и экспериментального подтверждения моделирования.

В работе [12] предлагается концепция формирования цифрового двойника станочного оборудования при помощи трёхмерного сканирования. Данный подход имеет большой потенциал для внедрения и применения в промышленности, поскольку применение трёхмерного сканирования не сопровождается большой сложностью работ, что позволяет быстро получать и использовать полученную модель с данными измерительных приборов станка для разработки цифрового двойника высокой точности, тем самым повышая эффективность производства деталей машин.

Разработанный и детализированный цифровой двойник станка будет позволять смоделировать возможность применения различной технологической оснастки (приспособлений) для установки детали, инструмента и подбора оптимальных комбинаций использования различной технологической оснастки без натурных испытаний, что позволит существенно снизить временные затраты на подготовку производства.

В работе [13] исследуется зависимость текущей способности шлифовального круга от акустического сигнала, возникающего при обработке деталей. Приём сигнала осуществляется с помощью микрофона. Установлен косвенный критерий зависимости износа шлифовального инструмента от уровня звука, позволяющий оценить состояние инструмента в процессе механической обработки. Данное исследование имеет потенциал для дальнейшего развития и формирования цифрового двойника шлифовального круга, в котором входными данными для цифрового двойника будут являться акустические сигналы из зоны резания. На основании обработки цифровым двойником акустических сигналов возможна корректировка входных параметров процесса механической обработки.

В работе [14] исследуется взаимосвязь износа инструмента с изменением сигналов вибраакустической эмиссии (ВАЭ) от инструмента в процессе резания. Выявлены зависимости между сигналами ВАЭ и износом инструмента. Сформулированные математические зависимости позволяют по изменению свойств частотного сигнала ВАЭ идентифицировать износ инструмента. Ввиду широкого использования процесса резания при изготовлении деталей машин механической обработкой данное исследование несёт в себе широкий потенциал по разработке цифрового двойни-

ка инструмента. Входной параметр цифрового двойника – сигналы ВАЭ, на основании сигналов ВАЭ проводится оценка износа инструмента с последующей возможной корректировкой параметров процесса резания.

Важной составляющей при разработке цифрового двойника процесса резания является разработка системы, позволяющей оценивать и контролировать качество обработанной поверхности во время обработки заготовки, тем самым исключая брак в производстве, что особенно актуально при производстве уникальных дорогих научно-технических изделий.

В работах [15; 17; 18] авторы проводят исследования по управлению динамической устойчивостью процесса резания на основе подходов нелинейной динамики.

В работе [15] установлены корреляционные зависимости между фрактальной размерностью шероховатости поверхности обработанной детали и фрактальной размерностью сигналов ВАЭ, снятых с инструмента в процессе резания. Данный результат предоставляет широкие возможности по управлению шероховатостью поверхности детали в процессе обработки и разработке цифрового двойника путём обработки сигналов ВАЭ в потоке и последующей корректировки входных параметров процесса резания.

В работе [16] представлен цифровой двойник шероховатости поверхности при резании с использованием нейронно-сетевого моделирования. Производится обучение нейронной сети, входными данными в нейросеть являются входные параметры процесса резания, выходными – фрактальная размерность шероховатости поверхности. При выполнении механической обработки проводится постоянный расчёт фрактальной размерности шероховатости поверхности при помощи обученной нейросети и направляется управляющий сигнал в систему резания для корректировки режима резания и обеспечения заданного качества поверхности. Данное исследование представляет большой потенциал для внедрения в промышленность, однако применение для большой номенклатуры материалов деталей, инструмента, различных режимов резания требует дополнительных времязатрат по обучению нейронной сети.

В работе [17] авторы проводят исследования взаимосвязи критерииев нелинейной динамики (фрактальной размерности, показателя Ляпунова), рассчитанных для сигнала ВАЭ, снятого при резании, с амплитудой колебаний упругой динамической системы. Установлена зависимость между критериями нелинейной динамики и коэффициентом трения, что объясняется ростом энтропии при росте коэффициента трения.

В работе [18] проводится нейронно-сетевое моделирование процесса трения при резании и экспериментально подтверждаются результаты моделирования коэффициента трения нейросетью. Полученные результаты позволяют оценивать эффективность выбранных режимов механической обработки и расширить возможности по управлению результативностью процессов резания.

В работе [19] приведена модель – цифровой двойник, симулирующая съём слоя металла переменной толщины при круглом врезном шлифовании с ЧПУ, однако отсутствуют экспериментальные подтверждения применимости приведённой модели и применяемых при её создании зависимостей.

В работе [20] приведён алгоритм диагностики силы резания «на ходу» с использованием сигнала силы тока главного движения станка. Данная разработка позволяет использовать взаимосвязь параметра работы станка (сила тока) с параметрами режима резания, что позволит расширить количество факторов, учитываемых цифровым двойником процесса резания при достижении заданного качества деталей машин.

Имеются концепции по созданию цифровых двойников станочного оборудования, а также ограниченно используемые виртуальные модели узкоспециализированных станков. В настоящий момент отсутствуют цифровые копии, описывающие и прогнозирующие состояние станка и его систем в процессе резания. Учёт работы систем станка в цифровом двойнике процесса механической обработки позволит минимизировать негативные факторы, влияющие на процесс обработки.

Существующие работы по оценке износа инструмента требуют более обширного экспериментального подтверждения, однако уже сформированные и подтверждённые зависимости формируют пространство для создания цифровых двойников, позволяющих учитывать фактор износа инструмента при подборе режимов резания и минимизировать его влияние на качество деталей машин.

В настоящий момент наиболее успешное и результативное практическое применение описано в трудах [15–18] по цифровизации управления качеством детали в ходе обработке заготовки. Существующие варианты цифровых двойников шероховатости поверхности, коэффициента трения, процесса круглого шлифования, в том числе с использованием нейронносетевого моделирования, позволяют контролировать качество поверхности детали в процессе механической обработки, что повышает эффективность производства и создаёт возможности для дальнейшего масштабирования и использования данных цифровых двойников как компонентов комплексного цифрового двойника процесса механической обработки.

В работе [21] в качестве компонентов цифрового двойника станочной системы (киберфизической системы) рассматриваются четыре основные нейронные сети: силы резания, шероховатости, динамического состояния и износа инструмента.

В рамках четвёртого технологического перехода в настоящий момент перед промышленностью и исследователями стоит задача разработки и опробования комплексной системы моделирования и прогнозирования процесса резания заготовок при производстве деталей машин с заданным качеством, минимальными потерями материала, наиболее оптимальным использованием инструмента при заданных режимах резания и материале заготовки, корректной эксплуатации станочного оборудования на основании данных, поступающих от датчиков.

Заключение. Рассмотрены основные актуальные направления научной деятельности по разработке и экспериментальному подтверждению моделей цифровых двойников компонентов системы СПИД в области механической обработки деталей машин. На основании проведённого анализа литературных источников на рис. 2 авторами предлагается блок-схема комплексного цифрового двойника процесса резания, учитывающая все компоненты системы СПИД как отдельные составляющие процесса, каждая из которых отвечает за отдельные факторы, ведущие к достижению заданного качества продукции.

Цифровой двойник процесса механической обработки

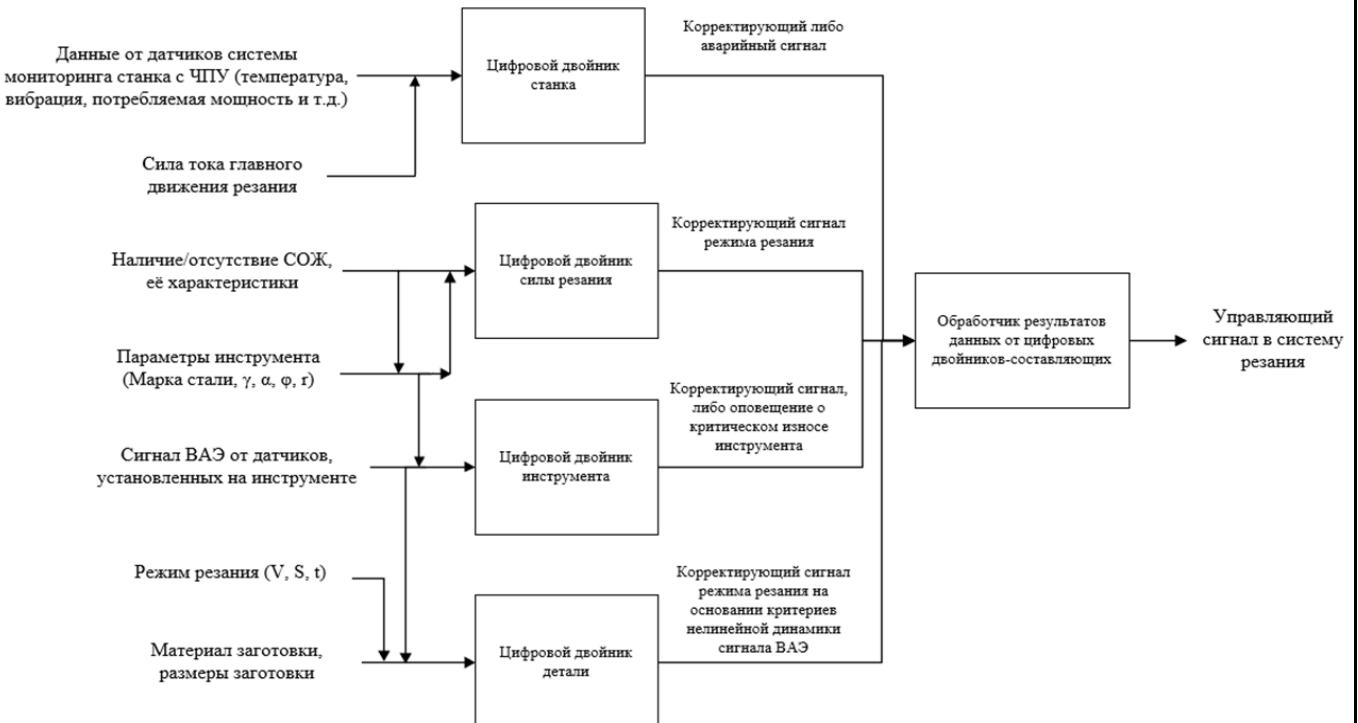


Рис. 2. Блок-схема комплексного цифрового двойника системы обработки деталей машин

Выводы. Предложенный цифровой двойник процесса механической обработки является оптимальным примером применения цифровых двойников, а также следующим этапом в расширении использования цифровых двойников в области обрабатывающей промышленности – создании комплексного цифрового двойника, учитывающего и моделирующего множество компонентов системы и их многофакторное воздействие на результат обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности: утв. распоряжением Правительства РФ от 06 ноября 2021 г. № 3142-р // Правительство России, официальный сайт. – URL: <http://static.government.ru/media/files/Yu4vXEtPvMyDVAw88UuBGB3dGER6r8zP.pdf> (дата обращения: 10.12.2024). – Текст: электронный.
2. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication // White paper. 2014. Т. 1, 2014. Р. 1-7.
3. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: нац. стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 16 сентября 2021 г. № 979-ст: введён впервые: дата введения 2022-01-01 / разработан ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – IV, 10 с.
4. ГОСТ Р 59799-2021. Умное производство. Модель Эталонной архитектуры и индустрии 4.0 (RAMI 4.0): нац. стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 25 октября 2021 г. № 1301-ст: введён впервые: дата введения 2022-04-30 / разработан Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”». – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – IV, 29 с.
5. Лычкина, Н. Н. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование: теория и практика (ИММОД-2023). – М.: Изд-во АН РТ, 2023. – С. 139-149.
6. Султан, Н. Литературный обзор: применение автоматизированных цифровых производственных систем на основе цифровых двойников / Н. Султан, В. Е. Петров // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 07/2. – С. 168-172.
7. Чернигин, А. Н. Вопрос применения термина «цифровой двойник» в современном информационном обществе / А. Н. Чернигин, С. Б. Плотников // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 03. – С. 123-129.
8. Вихляев, И. И. Технология создания цифрового двойника станка с ЧПУ / И. И. Вихляев, Д. А. Ворох // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы всерос. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23-26 апреля 2024 г. – Самара: Самарский университет им. Королева, 2024. – С. 38-40.
9. Вихляев, И. И. Устройство для создания цифрового двойника станка с ЧПУ / И. И. Вихляев, Д. А. Ворох // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы всерос. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 23-26 апреля 2024 г. – Самара: Самарский университет им. Королева, 2024. – С. 40-42.
10. Шевченко, А. А. Разработка и применение цифрового двойника станка лазерной резки листового металла для планирования производства на основе анализа потребления ресурсов / А. А. Шевченко // Наука настоящего и будущего. – 2024. – Т. 3. – С. 191-195.
11. Шевченко, А. А. Анализ технологического оборудования станка лазерной резки LVD IMPULS с помощью цифрового двойника / А. А. Шевченко // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы VI всерос. науч.-практ. (с международным участием) конф., в 2 т., 07-08 ноября 2024 г. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 364-369.
12. Возможности использования цифровых двойников станочного оборудования на предприятиях машиностроения / О. А. Рябинина, А. И. Болдырев, А. А. Болдырев, Д. Ю. Левин // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2024. – Т. 1. – С. 297-302.
13. Ардашев, Д. В. Исследование взаимосвязи режущей способности инструмента с параметрами акустического сигнала в процессе профильного шлифования / Д. В. Ардашев, А. С. Жуков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24. – № 3. – С. 64-83.

14. Заковоротный, В. Л. Информационные свойства частотных характеристик динамической системы резания при диагностике износа инструментов / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, К. В. Кислов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 114-134.
15. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамической устойчивостью металлорежущих систем в процессе резания по фрактальности шероховатости обработанной поверхности / Ю. Г. Кабалдин, П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Frontier Materials & Technologies. – 2023. – № 3. – С. 43-51.
16. Цифровой двойник шероховатости обработанной поверхности / Д. А. Шатагин, М. В. Желонкин, М. С. Аносов, Д. Е. Платонов // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 105-13. – С. 234-237.
17. Кабалдин, Ю. Г. Управление устойчивостью трибосистемами при внешнем трении и резании на основе алгоритмов нелинейной динамики, теории фракталов и нейросетевого моделирования / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Иванов, А. А. Башков // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2024. – № 13. – С. 150-156.
18. Нейронносетевое моделирование процессов трения при резании / Ю. Г. Кабалдин, А. А. Башков, С. В. Иванов, И. Д. Замураев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 52-58.
19. Акинцева, А. В. Моделирование взаимосвязи силы резания с глубиной резания и объёмами снимаемого металла единичными зёрнами при плоском шлифовании / А. В. Акинцева, П. П. Переверзев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 6-21.
20. Севастьянов, А. А. Использование пакета Tsfresh для разработки алгоритма диагностики процесса твёрдого точения / А. А. Севастьянов // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: материалы VI Всероссийской научной конф. с междунар. участием, Тольятти, 18-20 апреля 2023 г. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. – С. 97-102.
21. Анализ модели цифровых двойников машиностроительного производства / А. Д. Павлов, М. С. Аносов, Д. А. Шатагин, М. В. Желонкин // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – № 104-13. – С. 205-207.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Паньшин И. О., Ри Э. Х., Ким Е. Д., Попова В. С.
I. O. Panshin, E. Kh. Ri, E. D. Kim, V. S. Popova

**ВЛИЯНИЕ ТИТАНА НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И МИКРОТВЁРДОСТЬ
ВЫСОКОЭНТПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti),
СИНТЕЗИРОВАННОГО СВС-МЕТАЛЛУРГИЕЙ**

**INFLUENCE OF TITANIUM ON STRUCTURE FORMATION AND MICROHARDNESS
OF HIGH-ENTPY ALLOY OF THE Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti) SYSTEM SYNTHESIZED
BY SHS METALLURGY**

Паньшин Иван Олегович – магистрант высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(924)142-61-26. E-mail: 2020102345@pnu.edu.ru.

Ivan O. Panshin – Master's Degree Student, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(924)142-61-26. E-mail: 2020102345@pnu.edu.ru.

Ри Эрнст Хосенович – доктор технических наук, директор высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)214-09-99. E-mail: erikri999@mail.ru.

Ernst Kh. Ri – D. Eng., Prof., Director of the Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(914)214-09-99. E-mail: erikri999@mail.ru.

Ким Евгений Давидович – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; тел. 8(914)202-27-52. E-mail: jenya_1992g@mail.ru.

Evgenie D. Kim – Ph.D. in Engineering, Assistant Professor, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(914)202-27-52. E-mail: jenya_1992g@mail.ru.

Попова Виктория Сергеевна – аспирант высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136; tel. 8(924)208-60-80. E-mail: Alex_Naumov21@pnu.edu.ru.

Victoriya S. Popova – Postgraduate Student, Higher School of Industrial Engineering of the Polytechnic Institute, Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tikhookeanskaya Str., 680042 Khabarovsk; tel. 8(924)208-60-80. E-mail: Alex_Naumov21@pnu.edu.ru.

Аннотация. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой перспективный класс металлических материалов, характеризующихся наличием пяти или более элементов в почти равных атомных долях. Система AlCoCrFeV в последнее время привлекает к себе повышенный интерес благодаря своей микроструктуре и эксплуатационным свойствам. Эта система ВЭС обладает сочетанием высокой прочности и сохранения прочности при высоких температурах. Добавление Ti может не только влиять на размер зерна матрицы, выделившейся фазы и объёмную долю выделившейся фазы, но и существенно изменять пластичность и прочность ВЭС. Методом микроанализа идентифицированы структурные составляющие в сплаве системы Al-Co-Cr-Fe-V-Ti в зависимости от добавки титана от 3,5 до 9 ат. %. Структурными составляющими являются модифицированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV с решёткой ГЦК, легированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV, имеющий решётку ГЦК, легированный Ti, Fe, Ni твёрдый раствор ванадия с хромом, твёрдый раствор AlCoCrFeVTi с решёткой ГЦК. С увеличением концентрации титана в твёрдых растворах, модифицированных и легированных Ti, снижается концентрация Al. При добавке 9 ат. % Ti наблюдается максимальная микротвёрдость твёрдых растворов, модифицированных Ti.

Summary. High-entropy alloys (HEA) are a promising class of metallic materials characterized by the presence of five or more elements in nearly equal atomic fractions. The AlCoCrFeV system has recently attracted increased

interest due to its microstructure and operational properties. This HEA system has a combination of high strength and retention of strength at high temperatures. The addition of Ti can not only affect the grain size of the matrix, the precipitated phase, and the volume fraction of the precipitated phase, but also significantly change the ductility and strength of the HEA. Using microanalysis, structural components in the Al-Co-Cr-Fe-V-Ti system alloy were identified depending on the addition of titanium from 3.5 to 9 at.%. The structural components are the Ti-modified AlCoCrFeV solid solution with an FCC lattice, the Ti-doped AlCoCrFeV solid solution with an FCC lattice, the Ti, Fe, Ni-doped vanadium-chromium solid solution, and the AlCoCrFeVTi solid solution with an FCC lattice. With an increase in the titanium concentration in the solid solutions of modified and alloyed Ti, the Al concentration decreases. With the addition of 9 at. % Ti, the maximum microhardness of the solid solutions of modified Ti is observed.

Ключевые слова: твёрдые растворы, микротвёрдость, титан, содержание элементов, СВС, ВЭС.

Key words: solid solutions, microhardness, titanium, element content, SHS, HEA.

УДК 669.1

Введение. Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой перспективный класс металлических материалов, характеризующихся наличием пяти или более элементов в почти равных атомных долях [1; 2]. ВЭС уникальны тем, что содержат множество компонентов, каждый из которых присутствует примерно в равных количествах (от 3 до 35 ат. % каждый) [3; 4]. В отличие от традиционных сплавов, где компоненты могут образовывать интерметаллические соединения, компоненты ВЭС образуют твёрдые растворы [5; 6; 7]. Эта особая форма в сочетании с рядом других эффектов, таких как «эффект высокой энтропии», «эффект искажения решётки», «эффект замедленной диффузии» и «эффект коктейля», придаёт ВЭС повышенные свойства по сравнению с традиционными сплавами [8; 9].

Система AlCoCrFeV в последнее время привлекает к себе повышенный интерес благодаря своей микроструктуре и эксплуатационным свойствам. Эта система ВЭС обладает сочетанием высокой прочности и сохранения прочности при высоких температурах [10; 11]. Это делает его привлекательным в качестве материала для изделий, требующих высокие показатели прочности и долговечности в широком интервале температур. Также ВЭС AlCoCrFeV обладает более высокой износостойкостью, чем обычные сплавы. Он подходит для таких деталей, как шестерни и подшипники, которые подвергаются значительному износу. Благодаря высокому соотношению прочности и веса ВЭС AlCoCrFeV является потенциальным материалом для лёгких конструкций в аэрокосмической и автомобильной промышленности. Замена тяжёлых материалов ВЭС может привести к существенной экономии топлива. Согласно исследованиям, ВЭС AlCoCrFeV обладает хорошей коррозионной стойкостью в определённых условиях. Это открывает перспективы для его применения в условиях агрессивных сред, таких как морская среда или химические заводы.

На основании проанализированных источников дуговая плавка является единственным процессом, который использовался для получения сплава AlCoCrFeV из чистых реагентов. Однако высокая стоимость чистых элементов увеличивает себестоимость производства сплава. В качестве альтернативы самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), или синтез горения (СГ), представляет собой процесс, который используется для получения керамических и интерметаллических соединений посредством высокоэкзотермических реакций [14–16].

В этом процессе локальное тепло используется для запуска реакции в уплотнённой смеси реагентов. После начала реакции выделяющееся в ходе реакции тепло обеспечивает необходимую энергию для самоподдерживающейся реакции вдоль оставшегося компакта. Простота, применение оксидов в качестве недорогого сырья, низкое потребление энергии и высокая производительность являются основными преимуществами этого процесса для изготовления устойчивых сплавов и соединений. В этом процессе размер частиц реагента, давление уплотнения и добавление разбавителя являются некоторыми важными факторами, которые можно использовать для управления скоростью распространения реакции (v_c) и температурой горения (T_c) [14–16].



Исследования показали, что добавление Ti может не только влиять на размер зерна матрицы и выделившейся фазы, но и на объёмную долю выделившейся фазы, а также существенно изменять пластичность и прочность ВЭС [12; 13].

Цель работы – исследование влияния титана на структурообразование и микротвёрдость структурных составляющих высоконтропийных сплавов системы Al-Co-Cr-Fe-V-Ti.

Материалы и методы исследования. Компонентами исходной шихты являлись оксид титана марки ч согласно ТУ 6-09-2166-77, оксид хрома марки ч. д. а. согласно ГОСТ 2912-79, оксид ванадия марки ч. д. а. согласно ТУ 6-09-4093-75, оксид кобальта марки КО-1 согласно ГОСТ 18671-73, оксид железа марки ч согласно ТУ 6-09-563-85, фторид кальция согласно ТУ 2621-007-69886968-2015 с изм. 1, нитрат натрия чистотой х. ч. согласно ГОСТ 4168-79 и алюминий использовался в виде порошка марки ПА-4 согласно ГОСТ 6058-73.

Для синтезирования высоконтропийных сплавов использовали керамические тигли, в качестве футеровки использовали алюмохромфосфат.

Для равномерного распределения порошковых материалов использовалась планетарная мельница PULVERISETTE 5, смешивание происходило в течение 180 с со скоростью 300 об/с, для предотвращения синтеза в размольных стаканах использовался изопропиловый спирт в качестве среды. Сушка порошков производилась в вакуумном сушильном шкафу ШС-90/В при температуре 80 °C.

Далее производилась загрузка шихты в тигель. Для инициирования процесса синтеза использовался пероксид натрия в количестве 5 мг. Масса шихты для каждого эксперимента составляла $63 \pm 0,5$ г. После инициации синтеза формировался расплав, состоящий из двух фаз. При кристаллизации вследствие взаимной нерастворимости происходит разделение на металл и шлак.

Для определения количественного содержания элементов в полученных сплавах использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр Спектроскан МАКС-GV.

Для исследования морфологии и элементного состава структурных составляющих сплавов использовались методы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микрорентгеноспектрального анализа на аналитическом исследовательском комплексе на базе FE-SEM Hitachi «SU-70» с приставками для элементного ЭДС-анализа (Thermo Scientific Ultra Dry).

Определение микротвёрдости производилось методом Виккерса (HV) на микротвердомере Shimadzu «HMV-G21DT».

Результаты и обсуждение. Содержание компонентов в составе шихты в долевых частях и элементный состав полученных в результате слитков представлены в табл. 1. Содержание в исходной шихте V_2O_3 , CoO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 составляет 16 мас. % каждый.

Таблица 1
Составы шихты и синтезированных сплавов Al-Co-Cr-Fe-V-Ti

№ спла-ва	Состав шихты, мас. %			Содержание элементов в сплаве Al-Ti-Co-Cr-Fe-V, мас. %					
	Ti	Al	V_2O_3 , CoO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3	Al	Ti	V	Cr	Fe	Co
1	3	30	16	18	3,5	18,5	19,7	22	18
2	6,5	29	16	15,5	6	19	19,4	22,7	17
3	12	27	16	13	8,35	16,5	22,1	22,3	18

Как видно на рис. 1, с увеличением добавок легирующих элементов происходит формирование гетерогенных фаз с последующей гомогенизацией структурных составляющих сплава Al-Co-Cr-Fe-V-Ti.

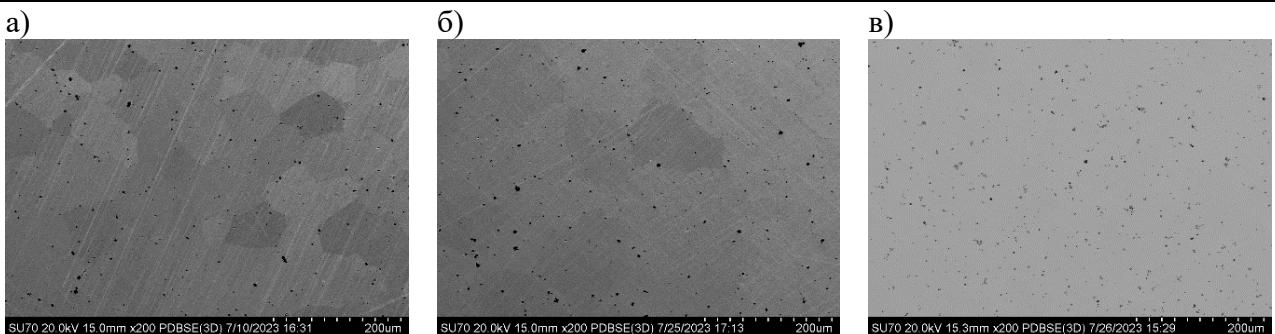


Рис. 1. Микроструктуры синтезированных сплавов Al-Co-Cr-Fe-V-Ti в отражённых электронах на растровом электронном микроскопе (РЭМ):
а – 3,43 мас. %; б – 6,06 мас. %; в – 8,35 мас. %

В легированных сплавах кристаллизуются следующие фазы:

- Модифицированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV с решёткой ГЦК, доля которого уменьшается при добавках 6,5 мас. % Ti в шихту. При дальнейшем увеличении добавки наблюдается исчезновение данной фазы.
- Легированный Ti твёрдый раствор, доля которого увеличиваются при добавках 6,5 мас. % Ti в шихту. При дальнейшем увеличении доли наблюдается превращение данной фазы в твёрдый раствор AlCoCrFeVTi с решёткой ГЦК.
- Твёрдый раствор AlCoCrFeVTi с решёткой ГЦК появляется при добавке 8,35 мас. % Ti. Формируется из легированного Ti твёрдого раствора AlCoCrFeV.

Как видно из табл. 2, увеличение в шихте доли титана способствует снижению содержания алюминия в твёрдом растворе AlCoCrFeV, модифицированном титаном. Происходит перераспределение алюминия в твёрдых растворах AlCoCrFeV и AlCoCrFeVTi.

Содержание Cr, Fe, и V при увеличении доли титана в твёрдых растворах практически не изменяется.

Таблица 2
Влияние титана на распределение элементов в структурных составляющих сплава системы Al-Co-Cr-Fe-V-Ti

Содержание титана в сплаве, мас. %	Структурные составляющие	Содержание элементов в структурных составляющих Al-Ni-Co-Cr-Fe-V, мас. %					
		Al	V	Cr	Fe	Co	Ti
3,43	Модифицированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV с решёткой ГЦК	18,04	18,66	19,59	21,95	18,32	3,44
6,06	Модифицированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV с решёткой ГЦК	15,8	24,07	19,61	22,8	12,24	5,49
	Легированный Ti твёрдый раствор AlCoCrFeV с решёткой ГЦК	13,41	22,45	18,8	22,55	9,96	10,48
8,35	Легированный Ti, Fe, Ni твёрдый раствор ванадия с хромом	6,2	19,08	27,24	24,05	17,55	5,89
	Твёрдый раствор AlCoCrFeVTi с решёткой ГЦК	11,13	20,68	17,34	16,91	16,45	17,48

При увеличении содержания титана до 8,35 мас. % происходит гомогенизация сплава, структурной составляющей которой становится фаза твёрдого раствора AlCoCrFeVTi с решёткой ГЦК.

Фазовый состав подтверждён рентгенофазовым анализом.

Микротвёрдость металлических матриц при добавлении Ti (см. рис. 2) изменяется по прямой зависимости, точка максимума не была найдена. По-видимому, данное повышение микротвёрдости исследованных твёрдых растворов связано с изменением соотношений твёрдых растворов, составляющих матрицу, и повышением уровня энтропии сплава в связи с увеличением в них титана.

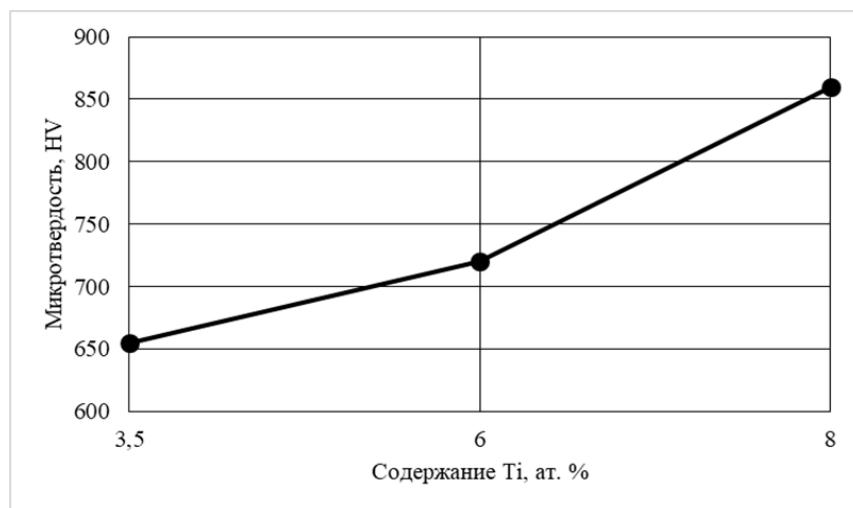


Рис. 2. Влияние добавок титана на микротвёрдость твёрдых растворов синтезированного сплава $\text{Al-Ni-Co-Cr-Fe-V-Ti}$

Выводы:

1. Исследовано влияние добавок титана на структурообразование сплава Al-Ni-Co-Cr-Fe-V . Максимальная гомогенизация структуры сплава наблюдается при добавках 8 мас. % Ti.
2. Установлена зависимость изменения содержания элементов в твёрдых растворах AlCoCrFeV сплава системы $\text{Al-Ni-Co-Cr-Fe-V-Ti}$. С повышением содержания титана существенно снижается содержание алюминия в твёрдых растворах, а концентрация остальных элементов практически не изменяется от добавок Ti.
3. Максимальное значение микротвёрдости металлической матрицы в исследованном интервале добавок наблюдается при 8,35 мас. % Ti.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jien-Wei Y. E. H. Recent progress in high entropy alloys // Ann. Chim. Sci. Mat. – 2006. – Т. 31. – № 6. – Р. 633-648.
2. Murty B. S., Yeh J. W., Ranganathan S. High-Entropy Alloys // High Entropy Alloys. – 2014. – Р. 13-35.
3. Tsai M. H., Yeh J. W. High-entropy alloys: a critical review // Materials Research Letters. – 2014. – Т. 2. – № 3. – Р. 107-123.
4. Thirugnanasambantham K. G. et al. A novel alloy design for non-equiautomic high-entropy alloy (Cr-Fe-Ni-Ti-Nb): predicting entropy mix and enthalpy mix // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2023. – Р. 1-11.
5. Ghazi S. S., Ravi K. R. Phase-evolution in high entropy alloys: Role of synthesis route // Intermetallics. – 2016. – Т. 73. – Р. 40-42.
6. Arun S., Radhika N., Saleh B. Exploring the potential of high entropy alloys: a comprehensive review on microstructure, properties, and applications // Johnson Matthey Technology Review. – 2027.

7. Radhika N., Noble N., Adediran A. A. Electrochemical and hot corrosion behaviour of annealed AlCoCrFeNi HEA coating over steel // *Scientific Reports*. – 2024. – Т. 14. – № 1. – P. 5652.
8. Krishna S. A. et al. A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Т. 109. – P. 583-606.
9. Kaushik N., Meena A., Mali H. S. High entropy alloy synthesis, characterisation, manufacturing & potential applications: a review // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2022. – Т. 37. – № 10. – P. 1085-1109.
10. Tokarewicz M., Grądzka-Dahlke M. Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Metals*. – 2021. – Т. 11. – № 8. – P. 1302.
11. Uporov S. et al. Effect of synthesis route on structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Intermetallics*. – 2017. – Т. 83. – P. 1-8.
12. Liu Q. et al. Ultra-fine grain $Ti_xVNbMoTa$ refractory high-entropy alloys with superior mechanical properties fabricated by powder metallurgy // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Т. 865. – P. 158592.
13. Han Z. D. et al. Microstructures and mechanical properties of $Ti_xNbMoTaW$ refractory high-entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Т. 712. – P. 380-385.
14. Moore J. J., Feng H. J. Combustion synthesis of advanced materials: Part I. Reaction parameters // *Progress in materials science*. – 1995. – Т. 39. – № 4-5. – P. 243-273.
15. Školáková A. et al. Formation of Ti-Al phases during SHS process // *Acta Phys. Pol. A*. – 2018. – Т. 134. – № 3. – P. 743-747.
16. Mishra S. K., Gokul V., Paswan S. Alumina-titanium diboride in situ composite by self-propagating high-temperature synthesis (SHS) dynamic compaction: Effect of compaction pressure during synthesis // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – Т. 43. – P. 19-24.



Каримов Ш. А., Шакиров Ш. М., Джемилов Э. Ш., Белова И. В.
Sh. A. Karimov, Sh. M. Shakirov, E. Sh. Dzhemilov, I. V. Belova

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОМ ПРИПЕКАНИИ

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT PROPAGATION IN ELECTRIC CONTACT SINTERING

Каримов Шоир Ахрорович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Ташкентского государственного технического университета (Республика Узбекистан, Ташкент). E-mail: karimovsh@mail.ru.

Shoir A. Karimov – PhD in Engineering, Associate Professor, Materials Science Department, Tashkent State Technical University (Uzbekistan, Tashkent). E-mail: karimovsh@mail.ru.

Шакиров Шухрат Мусаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения Ташкентского государственного технического университета (Республика Узбекистан, Ташкент).

Shukhrat M. Shakirov – PhD in Engineering, Associate Professor, Materials Science Department, Tashkent State Technical University (Uzbekistan, Tashkent). E-mail: shuhratshakirov71@gmail.com.

Джемилов Эшреб Шефикович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: eshreb@mail.ru.

Eshreb Sh. Dzhemilov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: eshreb@mail.ru.

Белова Инна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Inna V. Belova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Materials Science and Technologies of New Materials Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения и прогнозирования распространения тепловых полей в процессе электроконтактного припекания на основе математического моделирования процесса. Показано, что наиболее значимыми технологическими режимами процесса являются: величина напряжения, сила тока, усилие прижатия порошкового материала и время воздействия этих факторов. Результаты обработки математической модели показали, что повышение температуры покрытия единичной точки наблюдается только в начальный период подачи импульса тока (0,02...0,04 с), далее идёт стабилизация температуры, а источником тепловыделения является возникающее сопротивление между материалом спрессованного порошка и микронеровностями поверхности подложки. Изменение микроструктуры материала в результате электроконтактного припекания – один из ключевых аспектов, который необходимо учитывать. Нагрев и давление могут приводить к рекристаллизации, образованию нового фазового состояния и улучшению механических свойств соединений. Понимание этих процессов позволяет точно настраивать технологии для достижения желаемых характеристик готовых изделий.

Summary. The article considers the issues of determining and predicting the distribution of thermal fields in the process of electrocontact sintering based on the mathematical process of modeling. It is shown that the most significant parameters of the process are: the magnitude of voltage, current strength, increased pressing of the powder material and the time of exposure to these factors. The results of processing the mathematical model of the phenomenon show that an increase in the coating temperature of a single point is observed only in the initial period of supplying a pulsed current (0.02-0.04 sec.), then the temperature stabilizes, as a result of which heat generation resistance occurs between the resistance of the pressed powder and the microns of the surface of the substrate material. The change in the microstructure of the material as a result of electrical contact baking is one of the key aspects

that must be taken into account. Heating and pressure can lead to recrystallization, formation of a new phase state, and improvement of the mechanical properties of the compounds. Understanding these processes allows you to fine tune the technology, achieving the desired characteristics of the finished products.

Ключевые слова: электроконтактное припекание, математическое моделирование, тепловое распределение, режимы обработки.

Key words: electrocontact sintering, mathematical modeling, thermal distribution, processing modes.

УДК 629.113.004.67

Введение. Процесс электроконтактного припекания (ЭКП) является одним из ресурсо-энергосберегающих способов восстановления и упрочнения деталей [1]. Преимуществами способа являются доступность присадочных материалов, простота изготовления оборудования, высокая производительность и возможность механизации и автоматизации [2].

Однако недостаточность литературных данных о механизмах явлений, протекающих при ЭКП, таких как диффузионные, электрические и особенно тепловые процессы и их взаимосвязи, ограничивает широкое применение данного способа.

Характер распределения температуры оказывает влияние практически на все процессы, происходящие в зоне соединения покрытие-подложка [3; 4]. Поэтому возможность определения или прогнозирования тепловых процессов, температурных полей в зоне соединения является важной частью исследование процесса ЭКП в целом.

Экспериментальное определение оптимальных параметров процесса ЭКП требует проведения большого количества опытов и дорогостоящего оборудования. Быстротечность процесса, изменение агрегатного состояния материалов покрытия и подложки, большие токовые наводки, изменение параметров режимов значительно усложняют измерения температурных параметров термического цикла при ЭКП.

Методика проведения эксперимента. Эффективным методом прогнозирования параметров термического цикла и распространения тепла в пространственно-временной системе является метод математического моделирования. В качестве базовой формы для математического моделирования была выбрана цилиндрическая втулка грунтового насоса.

Моделирование проводилось при следующих условиях:

– покрытие и подложка имеют цилиндрические поверхности с разными значениями радиусов, обладают цилиндрической симметрией;

– температура и тепловое поле в зоне соединения являются результатом сложных физических процессов, которые зависят как от величины контактного сопротивления, так и от тока, протекающего через этот контакт. При увеличении тока через соединение растёт мощность, выделяемая в виде тепла, что может привести к перегреву. Особенно критичным становится момент, когда контактное сопротивление существенно увеличивается, что вызывает локальное повышение температуры;

– температура работы деформации покрытия и температура нагрева электрода-ролика часто оказываются незначительными в условиях охлаждения, что позволяет ими пренебречь;

– температура распределяется по внешней винтовой линии припекания, и её распространение симметрично относительно осям X и Y .

Начальная пористость $\Pi_0(z) = \text{const}$. Усилие прижатия P приводит к уплотнению слоя покрытия, уменьшая пористость. Уменьшение пористости оказывает влияние на теплофизические свойства и удельное электросопротивление покрытия. Припекание со скоростью V образует на поверхности покрытия полосу шириной h_i , перекрытие предыдущей полосы с последующей составляет 15...20 % по ширине и 20...30 % по длине. Охлаждение осуществляется спреером, в качестве охладителя выступает 1,5%-й водный раствор, модифицированный карбоксилметилцеллулозой.

Учитывая специфику ЭКП, мы должны принимать во внимание постепенный рост нагрева металла подложки в начальный момент процесса, т. е. начальную температуру при установившей-

ся температуре. Температура подложки незначительно отличается от температуры зоны соединения. Для упрощения расчётов они принимаются равными [5].

Для каждой точки зоны соединения температура при многократном воздействии импульса тока припекания будет зависеть только от времени $T(t)$ и распространения температуры по объёму подложки $\theta(t)$. Схема распространения температуры нагрева подложки показана на рис. 1.

С допущениями, указанными выше, можно определить температуру в точке A из условия

$$T_A(t) = \theta(t_u + t_n) - \theta(t_n).$$

При подаче следующего импульса тока температуру в уравнении в точке B можно определить по условию $T_B = T_A + \Delta T_1$.

Приращение температуры от последующего импульса можно определить из соотношения

$$\Delta T_1 = \theta[2(t_u + t_n) - \theta[2(t_u + t_n) - t_n]].$$

Тогда температура в точке B

$$T_B = [\theta(t_0 + t_n) - \theta(t_n)] + \theta[2(t_u + t_n) - \theta[2(t_u + t_n) - t_n]].$$

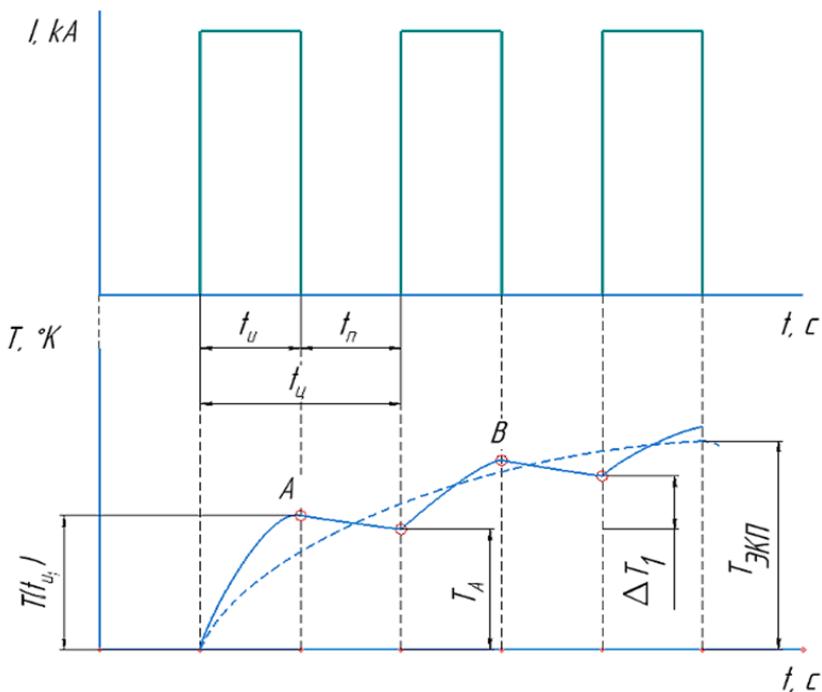


Рис. 1. Схема распределения температуры нагрева подложки при ЭКП

Для точного определения теплового воздействия и импульса тока при ЭКП большое значение имеет среднеквадратичная величина импульса тока. Величина же напряжения влияет незначительно. Используемые приборы для измерения величины напряжения и силы тока показывают среднеарифметическое значение параметров.

Так как параметры режима ЭКП (сила тока, усилие прижатия и длительность импульса тока) действуют в коротком промежутке времени, то среднее арифметическое и среднеквадратичные величины этих параметров будут сильно отличаться друг от друга (см. рис. 2).

Пористость покрытия в процессе ЭКП уменьшается по экспоненте в зависимости от усилия прижатия и времени его воздействия:

$$\Pi' = \Pi_0 \exp(-z \cdot t_{\text{пр}}),$$

где $t_{\text{пр}}$ – время воздействия усилия прижатия.

Границные условия по оси $R_1 = 0$; $0 \leq z \leq l_{\text{пр}}$, следовательно, $\frac{\partial T}{\partial R_1} = 0$.

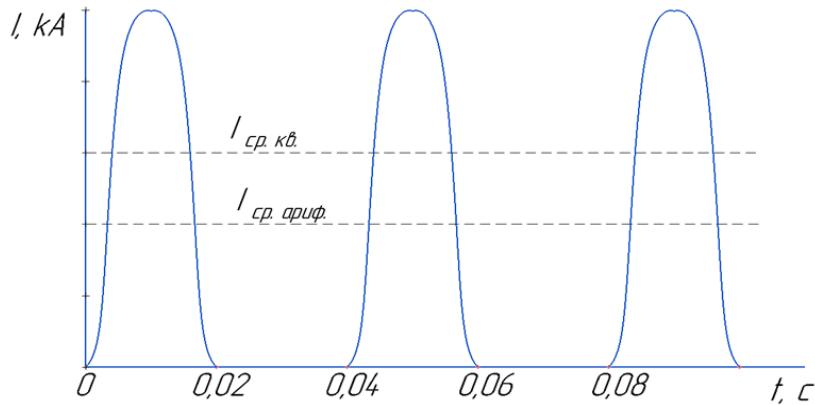


Рис. 2. Изменение тока припекания

Для моделирования температурного поля при нагреве массивного тела мгновенным источником тепла, смещённым по времени и местам воздействия, свойственного ЭКП, можно применить формулу

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{U \cdot I \cdot t_u \cdot \eta}{C\rho(4\pi \cdot a \cdot t_i)^2} \exp\left(\frac{-x^2 - z^2 - (y + h_i)^2}{4 \cdot a \cdot t_i} - \frac{2 \cdot \alpha \cdot t_i}{C\rho \cdot R_b}\right),$$

где U – напряжение импульса, В; I – ток импульса, кА; t_u – время действия импульса, с; η – КПД нагрева основного металла; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $C\rho$ – коэффициент объёмной теплоёмкости, $\text{КДж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; h_i – шаг между соседними точками припекания, см; α – коэффициент поверхностной теплоотдачи; $t_i = t_u + t_p$, здесь t_p – время паузы; R_b – радиус припекаемой втулки, мм.

Результаты и их обсуждение. Материал втулки – сталь 45. Режимы припекания: $I = 1,4 \dots 2,2$ кА, $U = 3,45$ В, $t_u = 0,02 \dots 0,04$ с, $t_i = 0,04 \dots 0,06$ с, $\eta = 0,12$; $R_b = 55$ мм, $\alpha = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; $C\rho = 4,8 \cdot 10^3 \text{ КДж}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; $h_i = 0,4 \dots 0,5$ см.

Обработка результатов опыта в виде кусочно-непрерывной функции реализована программой MathCad [6].

Тепло, выделяемое в зоне соединения, кроме параметров режима, связано с удельными электрическими сопротивлениями металла подложки и покрытия. Удельное электрическое сопротивление металла подложки меняется в зависимости от температуры, т. е. $\rho'_n = \rho_1 \cdot (T)$, где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление подложки. Удельное электрическое сопротивление подложки дополнительно меняется ещё и от пористости покрытия $\rho'_{\text{пок}} = \rho_{\text{пок}}(T, \Pi)$, где $\rho_{\text{пок}}$ – удельное электрическое сопротивление покрытия.

Результаты расчётов показывают, что $f_i(t)$ тепловой поток в единичных контактах остаётся постоянным во времени (см. рис. 3).

Анализ результатов моделирования показал, что температура покрытия единичной точки достигает своего максимума за $0,02 \dots 0,04$ с, далее температура покрытия падает (см. рис. 4).

В начальный момент подачи импульса тока в зоне соединения происходит нагрев покрытия по всей толщине. Нагрев покрытия приводит к его деформации и увеличению площади контакта между покрытием и подложкой, нагреву металла подложки, уменьшению контактного сопротивления, плотности тока, теплоотвод смешается в сторону подложки. Тепловой поток распространяется по осям X и Y симметрично и возрастает по мере движения источника тепла, на рис. 4 показано распределение теплового потока по осям X и Y .

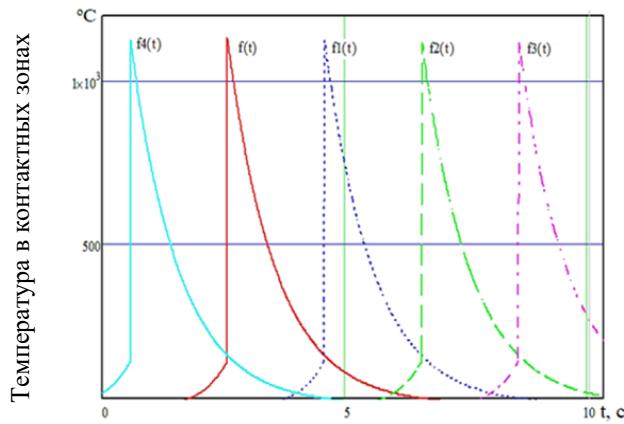


Рис. 3. Изменение теплового потока единичных контактов во времени

По окончании деформации покрытия ток начинает протекать по всей толщине покрытия, происходит окончательное уплотнение слоя.

Кривые изменения температуры показывают, что источником тепловыделения служит контактное электросопротивление, возникающее между микронеровностями металла подложки и частицами покрытия. По мере продолжения процесса электроконтактного припекания температура металла подложки постепенно повышается.

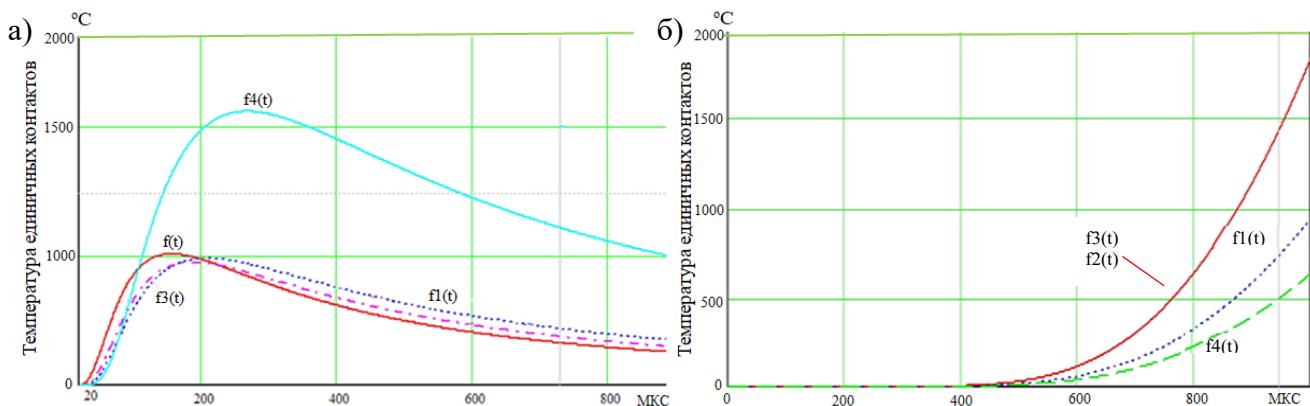


Рис. 4. Распределение теплового потока в металле подложки: а – по оси Y; б – по оси X

Заключение. Математическое моделирование теплового процесса ЭКП позволяет получить характеристики распространения теплового потока во времени с учётом изменения теплофизических свойств зоны соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них / Ф. И. Пантелеенко. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Ярошевич, В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 256 с.
3. Дорожкин, Н. Н. Технологические основы получения порошковых покрытий с использованием импульсных методов / Н. Н. Дорожкин, В. К. Ярошевич, А. С. Гурский // Математические модели физических процессов: материалы 11-й междунар. науч. конф. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2005. – С. 51-56.
4. Теория и практика припекания порошков / Т. М. Абрамович, А. И. Жорник, А. В. Павленко, В. К. Ярошевич. – Таганрог: Изд-во ТГПИ, 2008. – 320 с.
5. Рыкалин, Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

Старцев Е. А., Бахматов П. В.
E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ СВАРОЧНЫХ ФЛЮСОВ И ШЛАКОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

ANALYSIS OF PHASE TRANSITIONS AND MASS CHANGES OF WELDING FLUXES AND SLAGS AT HIGH TEMPERATURES

Старцев Егор Андреевич – старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)188-05-45. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Egor A. Startsev – Senior Lecturer, Department of Technology of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyov, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)188-05-45. E-mail: egorstarts@inbox.ru.

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология сварочного и металлургического производства им. В. И. Муравьева» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Technologies of Welding and Metallurgical Production named after V. I. Muravyev, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлен анализ термических свойств сварочных флюсов и шлаков при высоких температурах. Цель исследования заключалась в изучении фазовых переходов и изменений массы стандартного флюса АН-42, разработанного экспериментального флюса, металлургического шлака и шлаковых корок. Методами термогравиметрического анализа (TG) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) были исследованы температурные зависимости массы и тепловые эффекты. Установлено, что металлургический шлак обладает наивысшей термостабильностью, а разработанный экспериментальный флюс демонстрирует повышенные показатели термической стабильности по сравнению со стандартным флюсом АН-42. Выявленные особенности фазовых переходов и изменения массы имеют практическое значение для оптимизации состава сварочных материалов и улучшения их эксплуатационных характеристик в условиях высоких температур.

Summary. The article presents an analysis of the thermal properties of welding fluxes and slags at high temperatures. The purpose of the study was to study the phase transitions and mass changes of the standard AN-42 flux, the developed experimental flux, metallurgical slag and slag crusts. Thermogravimetric analysis (TG) and differential scanning calorimetry (DSC) methods were used to study the temperature dependences of the mass and thermal effects. It has been established that metallurgical slag has the highest thermal stability, and the developed experimental flux demonstrates increased thermal stability compared to the standard AN-42 flux. The revealed features of phase transitions and mass changes are of practical importance for optimizing the composition of welding materials and improving their performance at high temperatures.

Ключевые слова: сварочные флюсы, металлургический шлак, шлаковые корки, фазовые переходы, термогравиметрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, высокие температуры, металлургические процессы.

Key words: welding fluxes, metallurgical slag, slag crusts, phase transitions, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, high temperatures, metallurgical processes.

УДК 669.054.8;621.791.04

Введение. Производство сварочных материалов занимает важное место в современной промышленности, обеспечивая надёжные решения для производства металлоконструкций в различных отраслях [1–3]. К таким материалам относятся сварочные флюсы, которые выполняют защитные, очистительные и стабилизирующие функции в процессе сварки.

Одним из перспективных направлений развития создания сварочных материалов является использование вторичных ресурсов [4–6], таких как шлаки электросталеплавильного производства [7], для создания флюсов с оптимальными технологическими свойствами. Эти шлаки содержат широкий спектр оксидов (железа, кальция, кремния, магния и др.), которые представляют собой основу сварочных материалов [8–10]. Такой подход позволяет не только сократить себестоимость производства, но и создать материалы с улучшенными характеристиками, в том числе теплофизическими [11–14], отвечающими требованиям современных сварочных процессов.

Целью данного исследования является изучение термических свойств шлака электросталеплавильного производства, экспериментального флюса, разработанного на его основе, стандартного флюса АН-42, а также шлаковых корок, образующихся при сварке. Исследование выполнено методами термогравиметрического анализа (TG) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC), что позволило выявить основные закономерности фазовых переходов, изменения массы и тепловых эффектов материалов при высоких температурах.

На рис. 1 представлены данные, полученные в результате термодинамического анализа стандартного флюса АН-42. Диаграмма DSC показывает наличие нескольких эндотермических пиков, свидетельствующих о фазовых переходах, происходящих в материале при нагреве. Основной пик наблюдается в диапазоне температур 1100...1300 °C, что указывает на плавление легкоплавких компонентов флюса. Наблюдаемые изменения массы на термогравиметрической кривой TG минимальны, что указывает на устойчивость состава к испарению или химическим реакциям в данном температурном диапазоне.

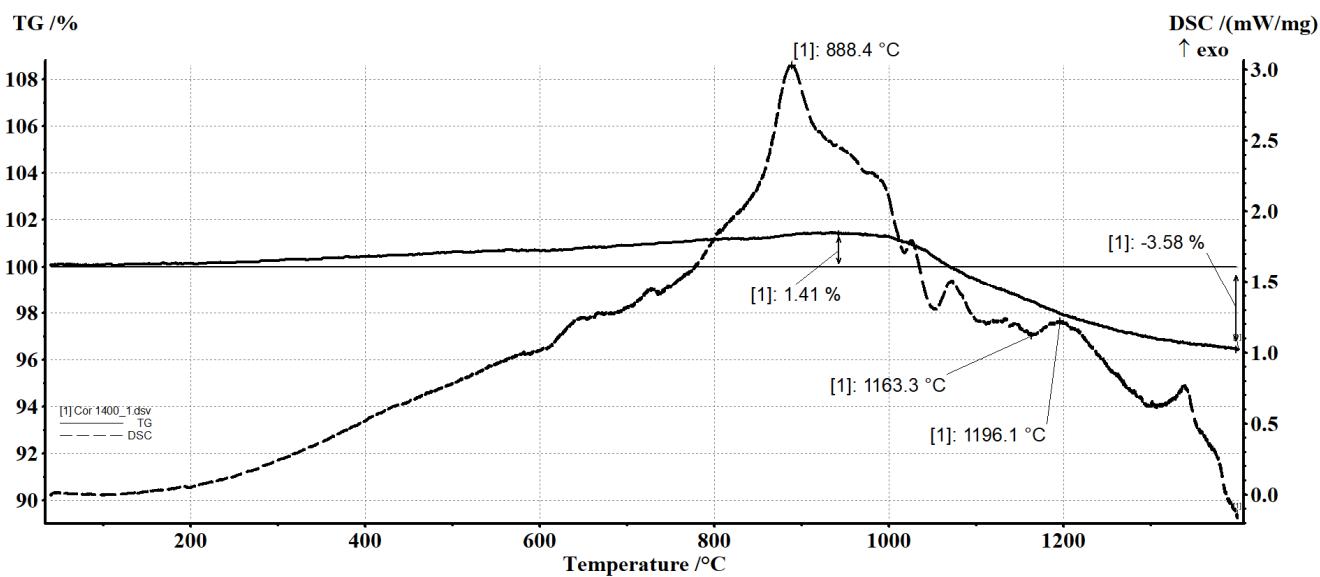


Рис. 1. Результат измерения фазовых переходов во флюсе АН-42 при нагреве до 1400 °C

На рис. 2 представлена обратная реакция материалов флюса АН-42 при охлаждении. Появление экзотермических пиков свидетельствует о кристаллизации или фазовом переходе. Основной экзотермический пик зафиксирован при температуре около 1100 °C, что указывает на обратное преобразование фаз, наблюдавшееся при нагреве. Это говорит о хорошей обратимости процесса и стабильности флюса при циклических изменениях температуры. Подобное поведение благоприятно для использования в металлургических процессах с частыми изменениями температурных условий.

Основной пик фазового перехода был зафиксирован при температуре 1196 °C, что указывает на характерное плавление основного компонента флюса (возможно, силиката или алюмината), типичного для этого состава.

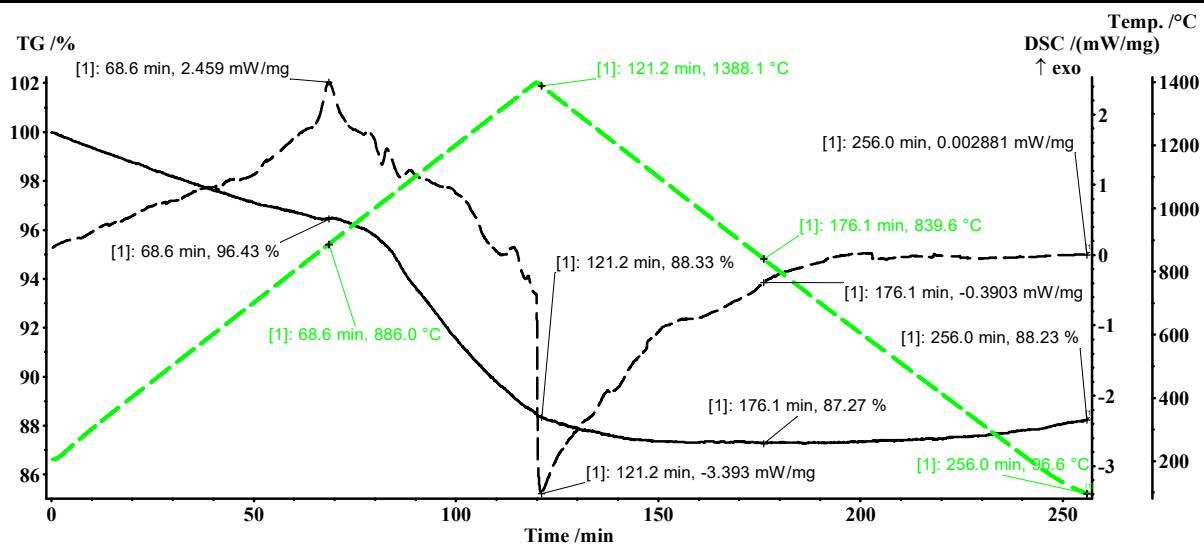


Рис. 2. Результат измерения фазовых переходов во флюсе АН-42 при нагреве до 1400 °С и дальнейшем охлаждении

Диаграмма DSC показала несколько меньших эндотермических пиков, свидетельствующих о локальных фазовых переходах или частичном разложении примесей. Наличие этих пиков указывает на многокомпонентность структуры флюса и сложность фазовых взаимодействий при нагреве.

Изменение массы составляет $-3,58\%$, что является незначительным уменьшением массы и указывает на стабильность данного состава в условиях высоких температур. Это говорит о том, что основные компоненты флюса сохраняют свою целостность и не подвержены испарению или разложению.

Проведённый анализ разработанного флюса (см. рис. 3) демонстрирует более выраженные термодинамические изменения по сравнению со стандартным составом. На DSC-кривой отмечается резкий эндотермический пик при температуре 1200 °С, что свидетельствует о переходе в жидкое состояние основного компонента. Это подтверждается значительным изменением массы на TG-кривой, что указывает на частичное испарение или разложение компонентов флюса. Высокая интенсивность эндотермического пика говорит о необходимости дополнительной стабилизации состава для предотвращения деградации при более высоких температурах.

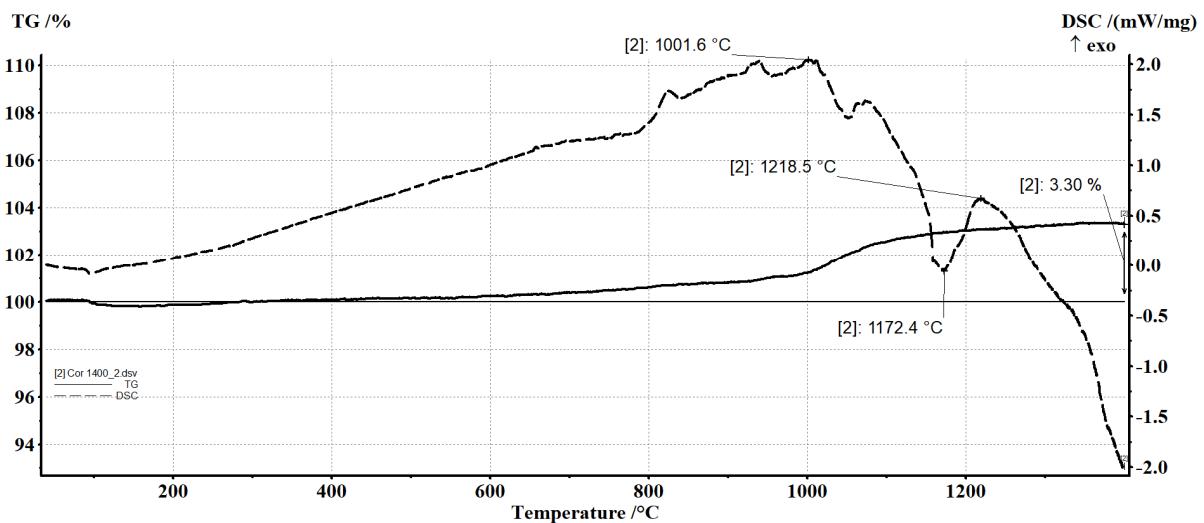


Рис. 3. Результат измерения фазовых переходов в разработанном флюсе при нагреве до 1400 °С

Охлаждение разработанного флюса (см. рис. 4) сопровождается появлением двух основных экзотермических пиков в диапазоне температур 800...1100 °C. Это указывает на сложный характер кристаллизации и образование новых фаз при охлаждении. Разработанный состав демонстрирует высокую чувствительность к изменениям температуры, что может ограничивать его применение при нестабильных термических условиях. Кривые TG также свидетельствуют об увеличении массы, что может быть следствием реакций с кислородом или другими атмосферными компонентами.

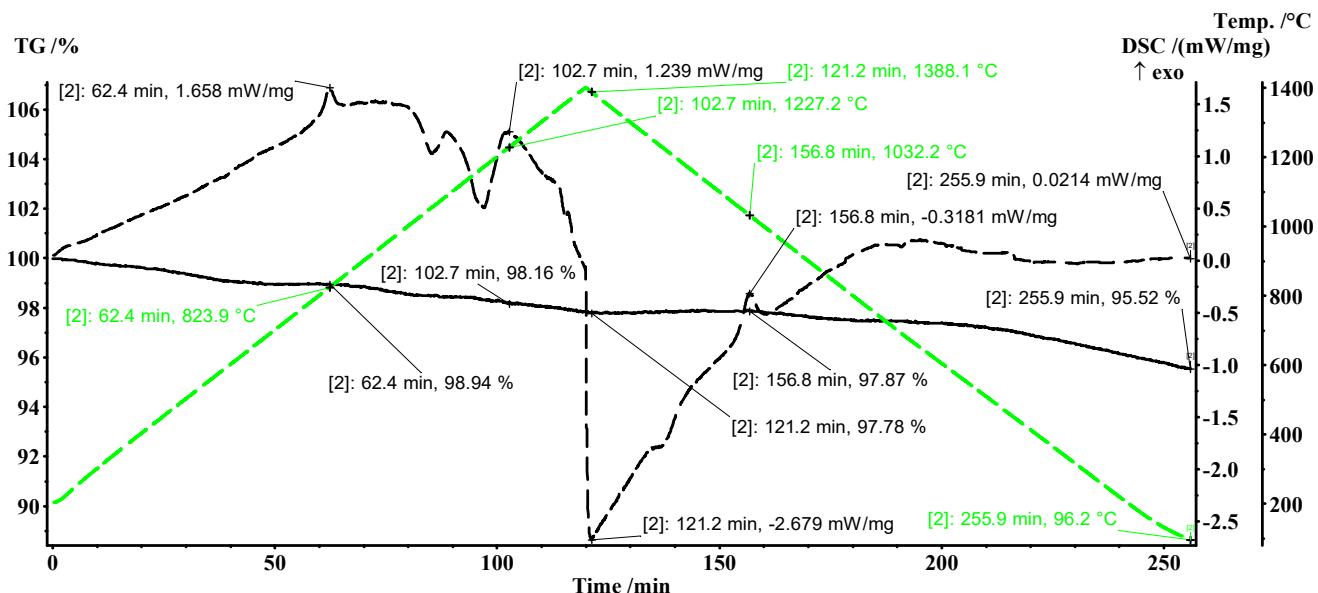


Рис. 4. Результат измерения фазовых переходов в разработанном флюсе при нагреве до 1400 °C и дальнейшем охлаждении

Экспериментальный флюс продемонстрировал фазовый переход при 1218 °C, что свидетельствует о более высокой термостабильности по сравнению со стандартным флюсом. Температура плавления этого состава находится на более высоком уровне, что указывает на его пригодность для использования в условиях высоких температур.

Изменение массы составило 3,30 %, что указывает на интенсивное взаимодействие с атмосферой при нагреве. Это может быть следствием реакции компонентов флюса с кислородом.

Металлургический шлак (см. рис. 5) продемонстрировал гораздо более высокую термостабильность, чем флюсы. На DSC-кривой наблюдается широкий эндотермический пик при температуре 1350 °C, что соответствует плавлению тугоплавких компонентов, таких как оксиды или карбиды. Термогравиметрический анализ показывает незначительные изменения массы, что указывает на инертность шлака к высоким температурам. Данный материал может рассматриваться как термостойкая добавка для улучшения свойств стандартных флюсов.

При охлаждении металлургического шлака (см. рис. 6) наблюдается лишь один выраженный экзотермический пик при 1300 °C, что свидетельствует о высоком уровне стабильности фаз. Это поведение обусловлено химическим составом шлака и его низкой реакционной способностью. Подобная стабильность позволяет использовать данный материал в качестве защитного покрытия или добавки в высокотемпературные процессы, где важно сохранять форму и свойства материала в условиях термических циклов.

Металлургический шлак проявил высокую термостабильность с фазовым переходом при температуре 1365 °C, что значительно выше, чем у флюсов. Это указывает на присутствие тугоплавких компонентов, таких как оксиды железа и магния.

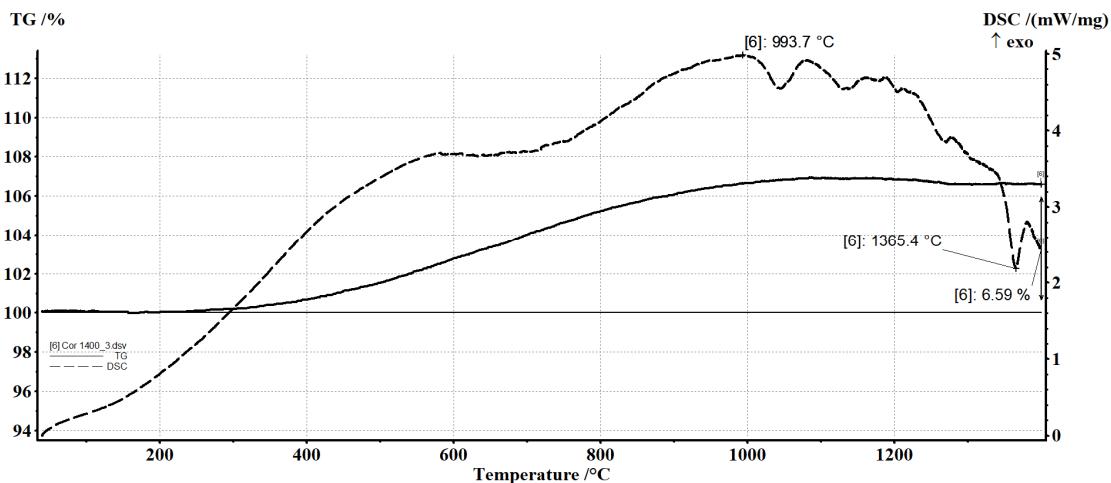


Рис. 5. Результат измерения фазовых переходов в металлургическом шлаке при нагреве до 1400 °C

Изменение массы составило 6,59 %, что свидетельствует о частичном разложении или окислении компонентов шлака. Вероятно, это связано с испарением летучих компонентов или реакцией оксидов с окружающей атмосферой при высокой температуре.

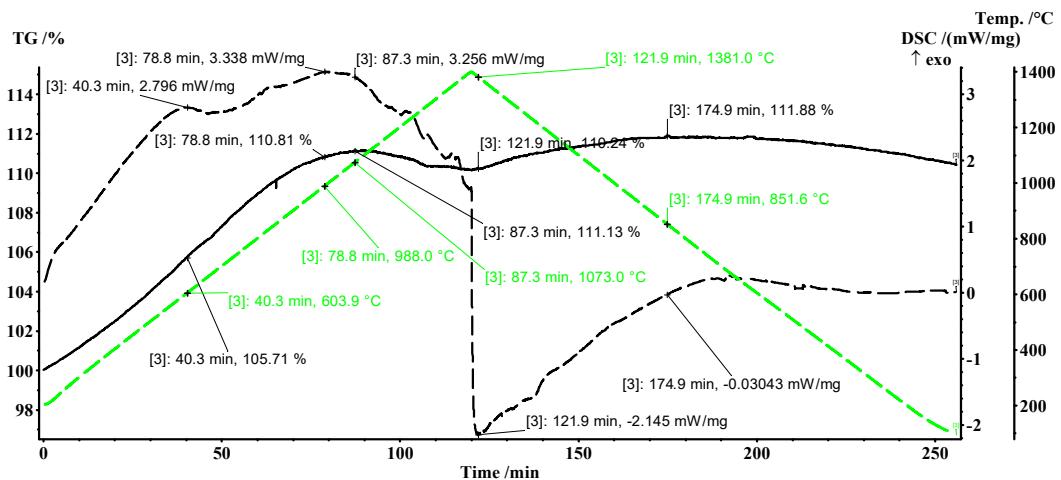


Рис. 6. Результат измерения фазовых переходов в металлургическом шлаке при нагреве до 1400 °C и дальнейшем охлаждении

Шлаковая корка (см. рис. 7), сформированная на поверхности экспериментального флюса, показывает выраженные эндотермические пики при температуре 1250 °C. Это указывает на формирование новых фаз при высоких температурах, что может быть результатом взаимодействия шлака с атмосферой или металлическими компонентами. Термогравиметрический анализ выявил уменьшение массы, что свидетельствует о выделении летучих компонентов, таких как водород или углекислый газ.

Шлаковая корка проявляет фазовый переход на температуре 1374 °C, что указывает на повышенную температуру плавления по сравнению с исходным флюсом. Это свидетельствует о формировании более стабильной структуры, вероятно, за счёт образования новых фаз на основе оксидов и силикатов.

Увеличение массы на 1,89 % указывает на взаимодействие компонентов корки с окружающей средой, что может быть вызвано окислением металлов или адсорбцией кислорода. Это указывает на потенциальное образование окисных фаз на поверхности корки.

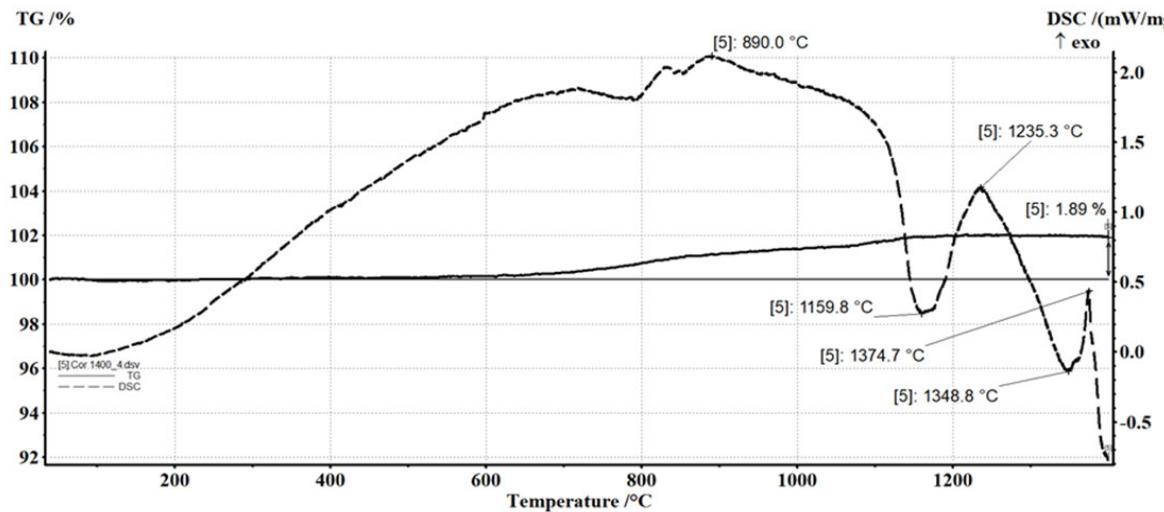


Рис. 7. Результат измерения фазовых переходов в шлаковой корке образца № 1 при нагреве до 1400 °C

Анализ шлаковой корки от стандартного флюса АН-42 (см. рис. 8) показал аналогичные эндотермические пики, однако температурные точки начала фазовых переходов смещены на более низкие значения (1150...1200 °C). Это говорит о большей чувствительности корки данного состава к температурным изменениям. Термогравиметрическая кривая указывает на стабилизацию массы после начального уменьшения, что говорит о завершении реакций и переходе состава в устойчивое состояние.

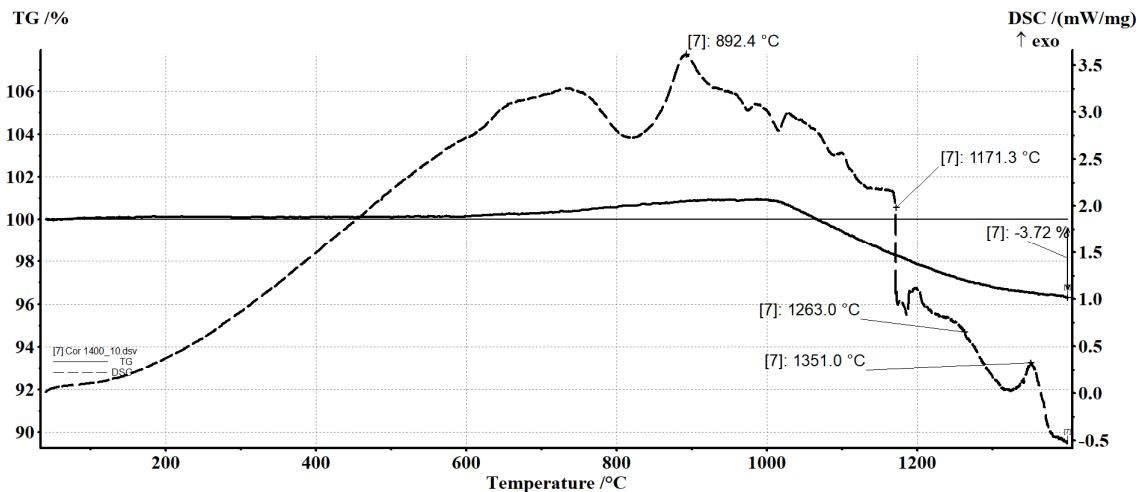


Рис. 8. Результат измерения фазовых переходов в шлаковой корке образца № 8 (флюс АН-42) при нагреве до 1400 °C

Шлаковая корка стандартного флюса демонстрирует фазовые переходы при температуре 1351 °C, что аналогично стандартному флюсу, но с большей термостабильностью. Это указывает на более стабильную кристаллическую структуру, которая формируется при повторном плавлении и кристаллизации.

Изменение массы составляет $-3,72 \%$, что указывает на деградацию структуры корки и выделение летучих компонентов, таких как газы или легкоплавкие примеси.

Общие результаты анализа фазовых переходов и изменения массы представлены на рис. 9 и в табл. 1. Установлено, что каждый из анализируемых составов имеет уникальные точки фазовых

переходов и изменения массы, зависящие от исходного состава и условий обработки. Металлургический шлак показал наивысшую термостабильность, в то время как шлаковые корки и флюсы продемонстрировали высокую реакционную способность и чувствительность к изменениям температуры. Это подчёркивает необходимость выбора оптимального состава флюсов в зависимости от условий эксплуатации.

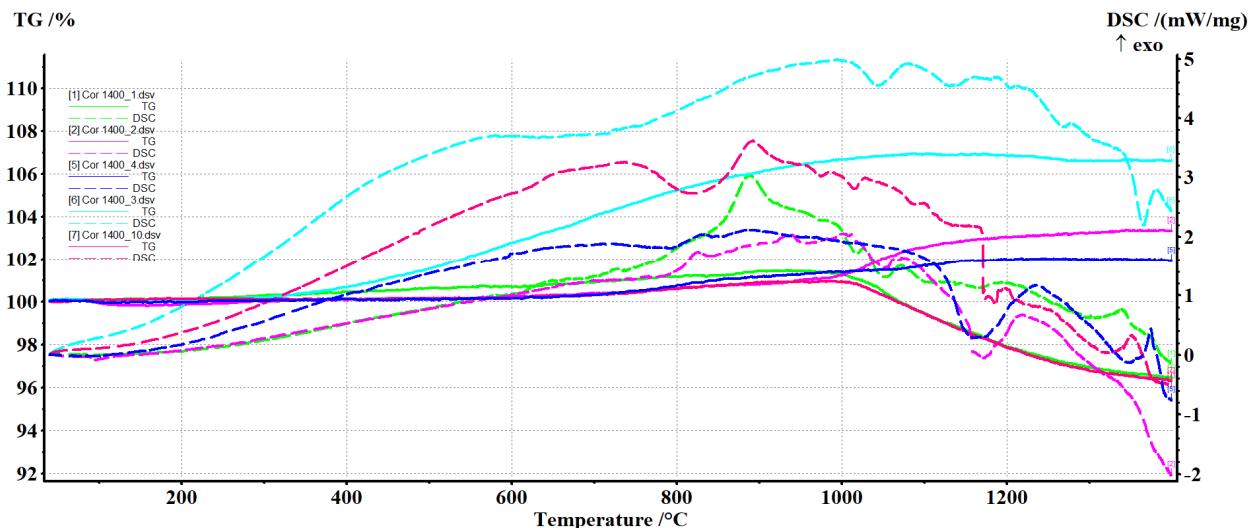


Рис. 9. Общий результат измерения фазовых переходов во флюсах, шлаке и шлаковых корках при нагреве до 1400 °C

Таблица 1
Температурно-весовые показатели шлака и флюсов

Образец	Темпера- тура мак- симума по DSC, °C	Темпера- тура начала изменения массы, °C	Температура фазо- вого перехода, °C		Изменение массы, %
			1	2	
№ 1 (Флюс стандартный)	888,4	200	1196,1	1325	-3,58
№ 2 (Экспериментальный флюс)	1001,6	550	1080	1218,5	3,30
№ 3 (Металлургический шлак)	993,7	200	1300	1365,4	6,59
№ 4 (Шлаковая корка от экспе- риментального флюса (образец № 1))	890	550	1159,8	1374,7	1,89
№ 10 (Шлаковая корка от стан- дартного флюса (образец № 8))	892,4	600	1171,3	1351	-3,72

Разработанный экспериментальный флюс демонстрирует повышенную устойчивость к высоким температурам. Температура максимального теплового эффекта и начало изменения массы для данного флюса выше, чем у стандартного флюса АН-42. Это свидетельствует о его более высокой термической стабильности и возможности применения при высоких температурах, что является важным фактором для металлургических процессов.

Металлургический шлак характеризуется наиболее интенсивным приростом массы среди всех исследованных образцов, что связано с высоким содержанием оксида железа и его активным окислением в условиях нагрева. Данный эффект необходимо учитывать при разработке новых сварочных материалов для минимизации нежелательных изменений массы и структуры.

Шлаковые корки экспериментального и стандартного флюсов обладают схожими термическими характеристиками, однако динамика изменения массы указывает на различие в их восст-

новительных свойствах. Это различие обусловлено особенностями химического состава и различным поведением оксидов в процессе сварки.

Фазовые переходы в диапазоне температур выше 1000 °C определяют основные изменения структуры материалов и оказывают значительное влияние на их термическую стабильность. Выявленные точки фазовых переходов являются ключевыми параметрами для оптимизации состава сварочных флюсов и шлаков, а также режимов сварки (вводимой погонной энергии) с целью повышения эксплуатационных характеристик свариваемых материалов.

Выводы. Установлено, что температура максимума на кривой DSC составляет порядка 890 °C для образцов № 1, 4, 10 и порядка 1000 °C для образцов № 2 и 3. Наблюдается изменение массы во всех образцах от указанных температур до максимальной температуры нагрева 1400 °C. Установлено, что в образце стандартного флюса происходит уменьшение массы, а в металлургическом шлаке и разработанном флюсе – прирост массы в различном температурном диапазоне начала процесса. Наибольший прирост массы обнаруживается в металлургическом шлаке (6,59 %) из-за большого содержания оксида железа, окисляющегося при нагреве в воздушной среде. В разработанном флюсе прирост массы на 36 % меньше, что обусловлено восстановлением железа в процессе сварки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сварочных процессов: учеб. пособие / В. М. Неровный, А. В. Коновалов, Б. Ф. Якушин [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – 2-е изд. – М.: МГТУ им. Баумана, 2016. – 702 с.
2. Технология автоматической сварки под флюсом: [Обзор / Н. Н. Потапов]. – М.: НИИЭнформэнергомаш, 1980. – 27 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 767 с.
4. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками чёрной металлургии: моногр. / К. Г. Пугин, Я. И. Вайсман, Б. С. Юшков, Н. Г. Максимович. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2008. – 316 с.
5. Глазов, В. М. Фазовые превращения в оксидных системах / В. М. Глазов, В. А. Киселев, Ю. А. Степанов. – М.: Металлургия, 1991. – 256 с.
6. Захаров, В. Е. Физико-химические основы сварочных процессов / В. Е. Захаров, А. Н. Петров. – М.: Машиностроение, 2004. – 320 с.
7. Bakhmatov, P. V. Impact and effect study of submerged-arc welding conditions on structural changes in weld metal / P. V. Bakhmatov, E. A. Startsev, B. M. Sobolev // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 200. – P. 65-76.
8. Sampson C., Glover D., Patel S. High-Temperature Phase Transformations in Slag Systems // Journal of Metallurgical Science. – 2019. – Vol. 56, No. 3. – P. 112-128.
9. Jones P. T., Blanpain B. Thermophysical Properties of Slags and Fluxes in Welding Processes // Metallurgical Transactions B. – 2018. – Vol. 49, No. 5. – P. 2211-2230.
10. Murakami H., Tanaka M. Differential Scanning Calorimetry for Investigating Phase Transitions in Welding Fluxes // Welding Journal. – 2020. – Vol. 99, No. 7. – P. 45-52.
11. Плетнев, Н. О. Воздействие температуры зоны термического влияния на деформацию при импульсной лазерной сварке / Н. О. Плетнев, П. А. Полейчук // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2024. – № I (73). – С. 107-110.
12. Исследование влияния термической обработки на физико-механические свойства сэндвич-конструкций / А. Е. Проценко, Д. П. Малышева, В. В. Петров, А. М. Шпилев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № IV-1 (36). – С. 100-105.
13. Абашкин, Е. Е. Влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава / Е. Е. Абашкин, С. Г. Жилин, О. Н. Комаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 96-104.
14. Разработка наплавочной порошковой проволоки ильменито-карбонатно-флюоритного типа / В. М. Макиенко, П. В. Соколов, Д. Г. Перваков, И. О. Романов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1 (26). – С. 47-55.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATHEMATICS AND MECHANICS

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

ГЕНЕТИКА «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

THE GENETICS OF THE «BIG BANG»

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.
Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. Предложена модель, объясняющая в рамках предложенных представлений процессы, происходившие во Вселенной в допланковский период. Определена величина кванта времени для нашей Вселенной, и установлена его связь с квантом информации. Вычислен объем информации, созданной в допланковский период времени и за время существования нашей Вселенной. Введено предположение о формировании в допланковский период генетического кода жизни Вселенной: её рождение и дальнейшее развитие. Определены кванты длины, объема и массы самой маленькой частицы материи (корпускулы) и гравитационные силы их взаимодействия между собой. Показано, что гравитационное и информационное поля взаимосвязаны. Проведено гипотетическое сравнение, в рамках относительных масштабов, нашей Вселенной и Вселенной в частице нейтрино. Показано, что частица нейтрино так же неисчерпаема, как и наша Вселенная.

Summary. A model is proposed that explains, within the framework of the proposed ideas, the processes that took place in the Universe in the pre-Planck period. The value of the time quantum for our Universe has been determined and its connection with the information quantum has been established. The amount of information created in the pre-Planck period of time and during the existence of our Universe has been calculated. An assumption is introduced about the formation of the genetic code of life in the Universe in the pre-Planck period: its birth and further development. Quanta of length, volume, and mass of the smallest particle of matter (corpuscles) and the gravitational forces of their interaction with each other have been determined. It is shown that gravitational and information fields are interrelated. A hypothetical comparison, within the framework of relative scales, of our Universe and the Universe in the neutrino particle is carried out. It has been shown that the neutrino particle is as inexhaustible as our Universe.

Ключевые слова: Вселенная, Большой взрыв, допланковский период, квант, время, информация, поле, волна, бит, энтропия, гравитация, нейтрино, бесконечность.

Key words: The Universe, the Big Bang, the pre-Planck period, quantum, time, information, field, wave, bit, entropy, gravity, neutrinos, infinity.

УДК 524.852:52-423

Известной моделью, описывающей возникновение Вселенной, её формирование и развитие, является модель Большого взрыва [1; 2], созданию которой способствовали труды Г. Гамова и его сотрудников Р. Алфера и Р. Хермана [3] в соединении с наблюдательными данными Э. Хаббла (1929), теоретическими работами А. Фридмана (1922–1924) и Дж. Леметра (1927).

В соответствии с указанной концепцией, около 14 млрд лет назад вещество современной Вселенной было сконцентрировано вблизи точки космологической сингулярности и имело гигант-

ские плотность, температуру и давление. В результате этого взрыва началось формирование нашей Вселенной.

Теория Большого взрыва не даёт ответа на вопрос, что было до него, в допланковский период, но и не отрицает существование чего-либо до него; пока не может ответить на вопрос: что происходило, какие процессы шли вблизи точки космологической сингулярности? Допланковский период в теории Большого взрыва рассматривается как квантовый хаос [2], в котором главным событием считается Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий).

В интервале времени $0 \leq t_{\text{п}} < 10^{-43}$ с (допланковский период) Вселенная, по воззрениям физиков [3], представляла собой плотную ($\rho = 10^{93}$ г/см³) квark-глюонную плазму с температурой $T = 10^{32}$ К. Законченная физическая теория этого этапа рождения Вселенной на данный момент отсутствует.

Предлагается модель, позволяющая в рамках определённых представлений и гипотез дать ответ на вопрос: какие процессы могли происходить во Вселенной в допланковский период времени и пространства?

Для этого сформулируем ряд обобщающих представлений, связывающих между собой категории времени и информации, на базе которых попытаемся дать ответ на вышепоставленный вопрос.

1. Время – это информация, которая является неотъемлемой сущностью времени и её содержанием. Нет информации – нет времени и наоборот. В энциклопедической формулировке [1] время – это форма существования материи, выражающая порядок изменения объектов и явлений действительности.

В работах [4; 5] рассмотрены информационные процессы во Вселенной, истоки понятия времени. Обоснована квантовая (дискретная) природа времени и информации, предложено измерять время в количестве генерированных квантов информации при совершении элементарных событий.

2. Информация (информационное поле) – это то, чем обладает вся Вселенная во все времена своей жизни, это неотъемлемая, содержательная сторона материи и энергии. Там, где нет информации, материя мертва, а энергия – это хаос.

3. С другой стороны, информация (информационное поле) – это скрепа и одновременно механизм, формирующий код развития для всех уровней Вселенной в её многообразии и подобии её частей. Нет информации – нет эволюции, упорядоченного, поступательного развития от простого к сложному.

Будем полагать, что информация является определяющим фактором в формировании облика Вселенной, её рождении и последующем развитии на всех своих иерархических уровнях.

Информация, помимо основного своего содержания («сообщение»), имеет ряд других представлений, которые расширяют сферу её понимания. В частности, в генетике это сведения, являющиеся объектом переработки и передачи информации; в математике, кибернетике это количественная мера устранения неопределенности (энтропии), мера организации системы.

Академик М. А. Марков в апреле 1982 года на Президиуме АН СССР докладывал: «...Информационное поле Вселенной слоисто и структурно напоминает “матрёшку”, причём каждый слой связан иерархически с более высокими слоями, вплоть до Абсолюта, и является кроме банка информации ещё и регулятором начала в судьбах людей и человечества» [6].

К. Шенноном [7] было введено представление о количестве информации, содержащейся в том или ином сообщении. Это представление связывается с понятием энтропии, т. к. получение любой информации неизбежно связано с определёнными затратами энергии и времени.

4. Существует квант времени и квант информации, которые могут быть поставлены в соответствие друг к другу.

Предлагаемая модель допланковского периода времени заключается в предположении, что это время формирования программы (генетического кода) рождения и дальнейшего развития нашей Вселенной в целом и отдельных её элементов в частности.

В этот период в рамках информационного поля формируются законы, управляющие процессами рождения и развития Вселенной, проявление которых мы наблюдаем, изучаем и используем.

Предполагается, что в допланковский период каждый квант материи (корпускула) наполняется информацией, в рамках которой и функционирует в последующие периоды времени эволюции Вселенной.

Поэтому «квантовый хаос» в пределах допланковского периода времени с информационной и физической точки зрения трансформируется в разряд упорядоченной системы с заданными законами развития.

Задача решается в два этапа. На первом этапе определяется величина кванта времени для нашей Вселенной, т. е. минимального отрезка времени, соответствующего минимальному значению количества информации, а также объём информации, содержащийся в допланковском периоде времени.

Действительно, если время – это последовательность моментов времени, то можно найти, сколько таких моментов времени, например, в секунде или в допланковском периоде времени, или в любом другом отрезке времени.

На втором этапе определяется количество информации, созданной за весь период жизни Вселенной – от момента Большого взрыва до нашего времени – и приближённо, в рамках принятой модели, оцениваются кванты длины, объёма и массы.

Действительно, если мы принимаем, что масса – это количество квантов материи, а масса покоя – это количество квантов, совершающих движение частицы на месте, то можно найти минимальное деление, на которое может изменяться масса.

Принимается, что вся созданная информация представляет собой информационное поле нашей Вселенной.

В рамках вышеизложенного мы предполагаем, что наша Вселенная гносеологически развивается не по методу «проб и ошибок», а по определённой программе (генетическому коду), который был заложен изначально.

Анатолий Черепашук, директор Астрономического института им. Штернберга, член-корреспондент РАН, говорит, что «четырнадцать миллиардов лет назад, в момент рождения, вся Вселенная была заключена в точке радиусом 10^{-33} см, что неизмеримо меньше радиуса протона 10^{-13} см. В этом объёме уже была заложена вся информация о будущем Вселенной» [8].

Знаменитый физик Макс Планк говорил: «Всё существует благодаря Сознающему Разуму, который является Матрицей материи» [9].

Тогда необходимо принять, что Большой взрыв – это не случайный акт. Ни один физик и математик в рамках теории вероятности не сможет доказать, что Вселенная и жизнь возникли случайным образом.

В настоящее время имеется множество публикаций, в которых разделяется точка зрения неслучайного происхождения нашей Вселенной.

А это предполагает, в свою очередь, существование Высшего разума, Творца, Всевышнего. Утверждается, что все наша Вселенная – это живой, мыслящий организм, в котором каждая частица материи живёт по предписанным ей законам развития. В этом мы видим аналогию с зачатием, рождением и развитием человека, у которого есть материальная оболочка и разум, который и управляет ей, способен творчески мыслить и неразрывно связан с Высшим разумом. Древние учёные и философы говорили: наше Мироздание – это макромир; человек – это микромир. Таким образом, мы можем считать, что Мироздание – это большая Вселенная, а человек – это малая Вселенная, и они подобны друг другу и взаимосвязаны.

Поэтому когда мыходим на улицу и смотрим на ночное небо, возможно, мы видим себя изнутри. Действительно, как в каждой капле воды отражается океан, так в человеке – Вселенная.

Современные научные исследования показали, что сфера Сознания и Мышления имеет единую основу в виде Информационного Поля [10].



Академик В. И. Вернадский говорил, что некая «субстанция» является источником и регулятором жизни во Вселенной и содержит в себе информацию о её прошлом, настоящем и будущем [11].

В рамках первого этапа для определения минимального отрезка времени (кванта времени) воспользуемся формулой Луи де Бройля [12]:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}, \quad (1)$$

где λ – длина волны частицы; h – постоянная Планка; m – масса частицы; v – скорость частицы.

В нашем случае скорость частицы v принимается равной скорости света c , т. е. $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Принципиально скорость v может быть и больше, и меньше скорости света в зависимости от решаемой задачи.

Формула (1) по Луи де Бройлю предполагает, что любые материальные тела (частицы) обладают волновыми свойствами, они излучают и поглощают энергию в виде квантов. Носителями этой энергии являются волны.

С другой стороны, волны являются носителями информации, которая, таким образом, также носит квантовый характер.

Длина волны λ определяется соотношением

$$\lambda = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

где v – частота колебаний частицы, которая определяется зависимостью

$$v = 1/t, \quad (3)$$

здесь t – отрезок времени.

Как уже отмечалось, в соответствии с представлениями квантовой теории такие характеристики частицы, как энергия, масса, частота, длина волны и время, являются квантовыми величинами, т. е. они имеют меру.

Подставим соотношения (2) и (3) в формулу (1), получим значение величины отрезка времени t :

$$t = \frac{h}{m \cdot c^2}. \quad (4)$$

Формально эта формула вытекает из уравнений Планка и Эйнштейна, если принять скорость v равной скорости света.

Так как время t носит квантовый характер, то его определим зависимостью

$$t = n \cdot \nabla t, \quad (5)$$

где n – количество квантов времени, принимает целочисленные значения; ∇t – квант времени.

Таким образом, квант времени ∇t должен целое число раз укладываться в любой исследуемый отрезок времени t . Поставим одному кванту времени ∇t в соответствие один квант информации (бит), тогда число n будет определять количество информации в любом отрезке времени t и вычисляться по соотношению, вытекающему из формулы (5):

$$n = \frac{t}{\nabla t}.$$

При этом кванту времени соответствует наибольшая частота, как это вытекает из соотношения Планка $E = h \cdot v$ или из формулы (3), и наибольшая масса, как это видно из соотношения Эйнштейна $E = m \cdot c^2$ или из формулы (4).

Определим величину кванта времени ∇t .

Подставим зависимость (5) в формулу (4), получим

$$n \cdot \nabla t = \frac{h}{m \cdot c^2}.$$

Так как минимум левой части полученной формулы определяется при значении $n = 1$, а правой – при $m = m_0$, где m_0 – максимальная масса Вселенной, то один квант времени ∇t можно определить, если положить $n = 1$ и $m = m_0$, тогда получим

$$\nabla t = \frac{h}{m_0 \cdot c^2}. \quad (6)$$

Подставим соотношение (6) в формулу (5), будем иметь

$$n = t \cdot \frac{m_0 \cdot c^2}{h}. \quad (7)$$

Из формулы (7) вытекает, что каждому отрезку времени t соответствует количество информации n .

Как известно, в интервале времени $0 \leq t_{\text{п}} < 10^{-43}$ с (допланковский период), вблизи точки космологической сингулярности температура T и плотность ρ описываются зависимостями [13]

$$T(\text{K}) \approx \frac{10^{10}}{t^{0,5}(\text{с})}; \quad \rho \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^3} \right) \approx \frac{5 \cdot 10^5}{t^2(\text{с})}.$$

Эти формулы являются приближённым отражением истинной связи температуры и плотности от времени и, соответственно, от заложенной в них информации, определяющей развитие Вселенной на всех этапах эволюции.

Данные соотношения указывают на то, что при времени $t \rightarrow 0$ плотность ρ и температура T стремятся к бесконечности: $\rho \rightarrow \infty$, $T \rightarrow \infty$.

Принимаем, что вся масса Вселенной была в начальный момент времени сосредоточена вблизи точки космологической сингулярности в чрезвычайно малом «планковском» объёме $V \sim 10^{-99}$ см³.

По современным представлениям [14] эта масса Вселенной определяется значением

$$m_0 \approx 10^{53} \text{ кг.}$$

Будем считать, что величина этой массы является максимальной во Вселенной. Подставим её значение в формулу (6) и получим минимально возможный отрезок времени ∇t , который примем в качестве кванта времени для нашей Вселенной:

$$\nabla t = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{53} \cdot 9 \cdot 10^{16}} \approx 0,74 \cdot 10^{-103} \text{ с.}$$

Подсчитаем количество битов n информации, заключённой в допланковском отрезке времени $t_{\text{п}}$ по соотношению

$$n = \frac{t_{\text{п}}}{\nabla t}.$$

Подставим значения величин, входящих в формулу (7): $t_{\text{п}} = 10^{-43}$ с и $\nabla t = 0,74 \cdot 10^{-103}$ с, получим

$$n = \frac{10^{-43}}{0,74 \cdot 10^{-103}} = 1,36 \cdot 10^{60} \text{ бит.}$$

Будем предполагать, что именно этот объём информации, сформированный в допланковский период времени, и определил генетический код рождения, начало развития и дальнейшего формирования нашей Вселенной.

В рамках второго этапа предварительно определим объём информационного поля Вселенной на данный момент времени.



Если исчислять время жизни нашей Вселенной от момента Большого взрыва $t_{\text{вс}} \approx 14$ млрд лет, или $t_{\text{вс}} = 4,32 \cdot 10^{17}$ с, то количество информации N , содержащейся в ней, определяется значением

$$N = \frac{t_{\text{вс}}}{\nabla t} = \frac{4,32 \cdot 10^{17}}{0,74 \cdot 10^{-103}} = 5,8 \cdot 10^{120} \text{ бит.}$$

То есть можно сказать, что информационное поле нашей Вселенной на данный период времени составляет

$$N \approx 5,8 \cdot 10^{120} \text{ бит.}$$

Физик Мелвин Вопсон из Портсмутского университета (Великобритания) количественно оценил объём информации во всей наблюдаемой Вселенной [15]. По его расчётом, она оказалась равной $6 \cdot 10^{80}$ бит. Это, кстати, было ниже, чем предыдущие оценки других учёных.

Мелвин Вопсон основывался в своих расчётах на теории информации Клода Шеннона [7]. Эта теория связывает энтропию (величину неопределённости в системе) с информацией. Правда, Вопсон пояснил, что прошлые расчёты пытались учесть всю Вселенную, тогда как он ограничил свои вычисления только наблюдаемой её частью.

Предыдущие оценки, учитывающие всю Вселенную, дали величину, равную порядка 10^{120} бит. Эти исследования были проведены П. Дэвисом [16].

Он рассчитал информационное содержание Вселенной, применив формулу энтропии чёрной дыры ко всей Вселенной, и получил зависимость

$$I \approx \frac{2\pi \cdot G \cdot M_u^2}{h \cdot c} = 10^{120} \text{ бит,}$$

где G – гравитационная постоянная; M_u – масса Вселенной, заключённая в пределах её горизонта; h – постоянная Планка; c – скорость света.

Как видим, наше значение в рамках порядка величин практически совпадает с представленным в научной работе Дэвиса [16] значением.

Однако наши решения получены исходя из иных предпосылок. Это даёт основание полагать, что значение величины объёма информационного поля, полученное для всей Вселенной за весь период жизни по настоящее время с использованием разных представлений, является правдоподобным.

Физик Мелвин Вопсон также отмечает, что информация может храниться в разных формах, в том числе и на поверхности самой пространственно-временной ткани.

Вычислим кванты длины, объёма и массы.

Квант длины определим из зависимости: $l_{\text{кв}} = c \cdot \nabla t$. Подставим сюда значения величин для c и ∇t , получим

$$l_{\text{кв}} = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,74 \cdot 10^{-103} \approx 2,22 \cdot 10^{-95} \text{ м.}$$

Соответственно, квант объёма

$$V_{\text{кв}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{l_{\text{кв}}}{2}\right)^3$$

определится значением

$$V_{\text{кв}} \approx 5,5 \cdot 10^{-285} \text{ м}^3.$$

Принято, что средняя плотность ρ вещества во Вселенной [3] равна

$$\rho \approx 10^{-26} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда масса кванта вещества $m_{\text{кв}}$ (корпускулы) определится соотношением

$$m_{\text{кв}} = \rho \cdot V_{\text{кв}} \approx 10^{-26} \cdot 5,5 \cdot 10^{-285} \approx 5,5 \cdot 10^{-311} \text{ кг.}$$

Таким образом, мельчайшая частица вещества (корпускула) Вселенной обладает массой

$$m_{\text{кв}} \approx 5,5 \cdot 10^{-311} \text{ кг.}$$

Если это действительно так, то учёным всей планеты потребуется не одна сотня лет для исследований всех иерархических уровней нашей Вселенной – от известных «элементарных частиц» и ниже.

Из этих мельчайших частиц вещества (корпускул), как из кирпичиков, в рамках «генетического» кода Вселенной выстроена вся Вселенная на всех своих взаимоувязанных иерархических уровнях, начиная от известных науке на сегодняшний день элементарных частиц до звёздных систем различного класса.

Так как уровень деления материи на «элементарные частицы» вещества в определённой мере наукой исследован, то полученное значение кванта материи можно считать элементом деления на новом, следующем уровне, размеры которого существенно меньше размеров из известных «элементарных частиц». Такое элементарное образование было в своё время названо Демокритом амер, а совокупность амеров по этим представлениям образует эфир, заполняющий всю Вселенную и ответственный за все виды взаимодействий. Как отмечается в работе [17], эфир – это среда, заполняющая всё мировое пространство, и она является строительным материалом для всех видов веществ. Автор работы [17] также подчёркивает, что «все элементарные частицы способны трансформироваться друг в друга, что свидетельствует об их общем строительном материале. Этот материал в естествознании назывался эфиром».

При этом можно предположить с точки зрения современных представлений, что этот эфир является газом [17], обладающим всеми свойствами реального газа (давлением, плотностью, температурой и др.).

Определим количество квантов вещества (корпускул) n_{k} , составляющих всю массу Вселенной:

$$n_{\text{k}} = \frac{m}{m_{\text{кв}}} \approx \frac{10^{53}}{5,5 \cdot 10^{-311}} \approx 0,2 \cdot 10^{364}.$$

Оценим количество корпускул n_{k1} в одном кубическом метре Вселенной. Объём Вселенной принимается равным $V = V_{\text{B}} = 3,5 \cdot 10^{80} \text{ м}^3$ [14]. Тогда

$$n_{\text{k1}} = \frac{n_{\text{k}}}{V} \approx \frac{0,2 \cdot 10^{364}}{3,5 \cdot 10^{80}} \approx 6 \cdot 10^{282}.$$

Это невообразимое число корпускул в одном кубическом метре Вселенной может дать основание считать гипотезу «сплошности», которая предполагает, что всё исследуемое пространство сплошным образом заполнено материей без образования пустот и разрывов, справедливой при решении задач силового взаимодействия космических тел с материей Вселенной («эфиром») при их движении по орбитам и позволит реализовать математический и физический аппарат механики жидкости и газа.

Определим максимальную силу притяжения для двух корпускул материи. Воспользуемся формулой закона всемирного тяготения:

$$F_{\text{k}} = G \cdot \frac{m_{\text{кв}}^2}{r^2},$$

где $m_{\text{кв}} = 5,5 \cdot 10^{-311} \text{ кг}$; $r = l_{\text{кв}} = 2,22 \cdot 10^{-95} \text{ м}$; $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравитационная постоянная.

Подставим эти соотношения в последнюю зависимость, получим

$$F_{\text{k}} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 30,25 \cdot \frac{10^{-622}}{5 \cdot 10^{-190}} \approx 40 \cdot 10^{-432} \text{ н.}$$

С другой стороны, для одной из самых малых частиц нашей Вселенной, например нейтрино [14], с массой каждой $m_{\text{н}} \approx 0,3 \cdot 10^{-17} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \approx 0,48 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$ и расстоянием между частицами $2r \approx 2 \cdot 10^{-24} \text{ м}$ эта сила будет иметь значение



$$F_h \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{0,25 \cdot 10^{-72}}{4 \cdot 10^{-48}} \approx 0,4 \cdot 10^{-35} \text{ н.}$$

В представлениях предлагаемой модели значения сил F_k и F_h совершенно не сопоставимы.

Покажем, что гравитационное и информационное поля взаимосвязаны между собой.

Воспользуемся формулой Луи де Бройля (1), справедливой для частицы любой массы, как макроскопической, так и микроскопической, и, как и ранее, положим в ней скорость v равной скорости света c :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c}.$$

Выразим из этой формулы массу частицы через частоту колебаний, принимая

$$\lambda = \frac{c}{v}.$$

Получим

$$m = \frac{h}{c^2} \cdot v. \quad (8)$$

Подставим зависимость (8) в формулу закона всемирного тяготения:

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (9)$$

где F – сила взаимного притяжения частиц массой m_1 и m_2 ; r – расстояние между частицами массой m_1 и m_2 .

Каждой частице с массой m_1 и m_2 соответствуют свои частоты v_1 и v_2 .

Подставим значения масс m_1 и m_2 , определённых по формуле (8), в зависимость (9), получим

$$F = G \cdot \frac{h^2}{c^4} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{r^2}. \quad (10)$$

Обозначим постоянную величину $G \cdot \frac{h^2}{c^4}$ через K_x и определим её значение:

$$K_x = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})^2}{(3 \cdot 10^8)^4} = 3,62 \cdot 10^{-111}.$$

Окончательно с учётом последнего соотношения зависимость (10) примет вид

$$F = K_x \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{r^2} = 3,62 \cdot 10^{-111} \cdot \frac{v_1 \cdot v_2}{r^2}. \quad (11)$$

Так как частота v является информационной квантовой характеристикой частицы массой m , то правая часть формулы (10) определяет собой значение информационного поля взаимодействия частиц, левая часть определяет величину силы гравитационного квантового поля взаимодействующих частиц.

Таким образом, полученное соотношение (11) устанавливает соответствующую взаимосвязь между гравитационным и информационным полями.

Определим отношение \bar{V}_1 объёма всей Вселенной V_b к объёму частицы нейтрино $V_h = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 8 \cdot 10^{-72} \text{ м}^3$:

$$\bar{V}_1 = \frac{V_b}{V_h} \approx \frac{3,5 \cdot 10^{80}}{10^{-71}} \approx 3,5 \cdot 10^{151}.$$

Отношение \bar{V}_2 объёма Вселенной V_b к кванту объёма V_{kb} вещества равно

$$\bar{V}_2 = \frac{V_b}{V_{kb}} \approx \frac{3,5 \cdot 10^{80}}{5,5 \cdot 10^{-285}} \approx 1,6 \cdot 10^{365}.$$

Согласно квантовой теории поля [3], пространственно-временной мир дискретен в малых масштабах. Микроскопические пространственные расстояния ничем не отличаются от макроскопических, а течение времени в ультракоротких интервалах такое же, как в интервалах произвольно большой длительности.

Исходя из этого последние два соотношения дают фантастическое основание считать, что в каждом нейтрино в относительных масштабах содержится такая же Вселенная, как наша и даже ещё большая.

В. И. Ленин в своей работе «Материализм и эмпириокритицизм» писал: «Электрон так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна, но она бесконечно существует, и вот это-то единственно категорическое, единственно безусловное признание её существования вне сознания и ощущения человека ...» [18].

Поэт Валерий Брюсов по этому поводу в стихотворении «Мир электрона» писал: «Быть может эти электроны – миры, где пять материков, искусства, знанья, войны, троны и память сорока веков!..» [19].

В заключение статьи отметим следующее: астрофизик Фред Хайл определил вероятность самосборки живой клетки из подготовленных и сложенных в «кучку» необходимых атомов величиной $\sim 10^{-100\ 000\ 000\ 000} = 10^{-10^{11}}$ [20]. Как долго можно ожидать подобного события? Для оценки события поставим в соответствие одному вычисленному нами кванту времени $\Delta t \sim 10^{-100}$ с условно один квант вероятности события. Тогда значение величины вероятности самосборки $10^{-10^{11}}$ даст вероятное время ожидания события $t_{ож} \sim \frac{10^{10^{-2}}}{10^{-10^{11}}} \sim 10^{10^9} = 10^{1\ 000\ 000\ 000}$ с.

Для справки: время жизни нашей Вселенной от рождения до сегодняшнего дня определяется величиной $t_{вс} \approx 10^{17}$ с. Сравнение двух последних цифр говорит только об одном – самозарождение жизни невозможно.

Выводы. В работе предложена модель, объясняющая в рамках предложенных представлений происходившие во Вселенной в допланковский период процессы.

Определена величина кванта времени для нашей Вселенной и представлена его связь с квантом информации.

Введено предположение о формировании в допланковский период генетического кода жизни Вселенной: её рождение и дальнейшее развитие.

Показано, что гравитационное и информационное поля взаимосвязаны между собой.

Проведено гипотетическое сравнение, в рамках относительных масштабов, нашей Вселенной и Вселенной в частице нейтрино. Показано, что частица нейтрино также неисчерпаема, как и наша Вселенная.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. И. Ааронова – Бома эффект – Длинные линии / гл. ред. А. А. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 704 с.
2. Большой взрыв // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Большой_взрыв (дата обращения: 24.04.2020). – Текст: электронный.
3. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. II. Добротность – магнитооптика / гл. ред. А. А. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1990. – 703 с.
4. Кабалдин, Ю. Г. Время как информация / Ю. Г. Кабалдин, О. В. Кретинин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Машиностроение и автоматизация. – 2011. – № 1 (144). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vremya-kak-informatsiya> (дата обращения: 24.04.2020). – Текст: электронный.
5. Кабалдин, Ю. Г. Возникновение и эволюция Вселенной / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Серый, А. А. Просолович // Наноструктурные и информационные процессы в биологии и во Вселенной: труды КнАГТУ. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 10-75.
6. Тёмная энергия как информационное поле и атрибут Вселенной // 2015–2024, ООО «Дзен Платформа». – URL: https://dzen.ru/a/Yh3If32HpBWN_ZgG (дата обращения: 12.09.2024). – Текст: электронный.
7. Shannon, C. E. Comunication in the presence of noise. Proc/JRE, 37. 1949. P. 10-21.



8. Лесков, С. Найдено место для Бога / С. Лесков // Российская академия наук, 2024. – URL: <https://www.ras.ru/digest/shownews.aspx?id=19b2dad3-2409-4746-b125-fbae29cc92a3> (дата обращения: 10.09.2024). – Текст: электронный.
9. Божественная Матрица: мы наблюдатели или Творцы? Часть 3 // 2015–2024, ООО «Дзен Платформа». – URL: <https://dzen.ru/a/X9Dj3XjKDHYRawP> (дата обращения: 12.09.2024). – Текст: электронный.
10. Восконъян, В. Г. Информационное поле живой материи // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 2. – С. 66-67. – URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=29651> (дата обращения: 06.12.2023). – Текст: электронный.
11. Бабушкин, В. Е. Сознание и вера / В. Е. Бабушкин // Литрес, 2024. – URL: <https://www.litres.ru/book/viktor-vgenovich-babushkin/soznanie-i-vera-40815972/chitat-onlayn/?page=2> (дата обращения: 12.06.2024). – Текст: электронный.
12. Джанколи, Д. Физика. В 2 т. Т. II / Д. Джанколи; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 607 с.
13. Ишханов, Б. С. Вселенная. Свидетельства Большого взрыва / Б. С. Ишханов // Микромир и Вселенная. – URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/m_un/mun29.htm (дата обращения: 20.04.2020). – Текст: электронный.
14. Сарычева, Л. И. Модель Большого взрыва / Л. И. Сарычева // Физика высоких энергий и элементарные частицы. – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/elp/elp07.htm> (дата обращения: 24.04.2020). – Текст: электронный.
15. Melvin M. Vopson, RESEARCH ARTICLE| OCTOBER 19 2021, «Estimation of the information contained in the visible matter of the universe», AIP Advances 11, 105317 (2021), Article history, <https://doi.org/10.1063/5.0064475>.
16. P. C. W. Davies, «Why is the physical world so comprehensible?», in Complexity, Entropy and the Physics of Information, edited by W. H. Zurek (Addison-Wesley, Redwood City, CA, 1990), p. 61. Google Scholar.
17. Ацюковский, В. А. Общая эфиродинамика. Моделирование структур вещества и полей на основе представлений о газоподобном эфире / В. А. Ацюковский. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 584 с.
18. Ленин, В. И. Полное собрание сочинений. Т. 18. Материализм и эмпириокритицизм / В. И. Ленин. – М.: Политиздат, 1968. – 547 с.
19. Брюсов, В. Мир электрона / В. Брюсов // 2024, РуСтих. – URL: <https://rustih.ru/valerij-bryusov-mir-elektrona/> (дата обращения: 10.09.2024). – Текст: электронный.
20. Рязанов, С. Дарвинизм против антидарвинизма: где лженаука? / С. Рязанов // Аргументы недели. – URL: <https://argumenti.ru/interview/2024/10/920875> (дата обращения: 10.09.2024). – Текст: электронный.

Дзюба В. А., Чепизубов И. Г., Дун Гоцай
V. A. Dzyuba, I. G. Chepizubov, Dun Gotsay

ЭФФЕКТИВНОЕ АРМИРОВАНИЕ МНОГОЭТАЖНЫХ РАМ С УЧЁТОМ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК

EFFICIENT REINFORCEMENT OF MULTISTORY FRAMES CONSIDERING WIND LOADS

Дзюба Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

Viktor A. Dzyuba – PhD in Engineering, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: dzyuba456@mail.ru.

Чепизубов Игорь Геннадьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, советник Российской академии архитектуры и строительных наук (Россия, Москва). E-mail: 8054585@mail.ru.

Igor G. Chepizubov – PhD in Engineering, Leading Researcher at the Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Natural Sciences, Adviser to the Academy of Natural Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences (Russia, Moscow). E-mail: 8054585@mail.ru.

Дун Гоцай – магистрант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27. E-mail: donguocai@qq.com.

Dun Gotsay – Master's Degree Student, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin St., 27. E-mail: donguocai@qq.com.

Аннотация. Приведены результаты исследований влияния ветровых нагрузок на армирование ригелей монолитных рам различной этажности. Установлен характер армирования ригелей для 9-этажной и 25-этажной рамы при совместном действии вертикальных и ветровых нагрузок. Выяснено, что при большой этажности ригели нижних этажей следует армировать дополнительной рабочей арматурой в зоне опорных сечений как со стороны верхних волокон, так и со стороны нижних волокон. В середине пролёта, где моменты от ветровой нагрузки близки к нулю, армирование нижних пролётных волокон остаётся традиционным.

Summary. The results of studies of the effect of wind loads on the reinforcement of crossbars of monolithic frames of various floors are presented. The nature of reinforcement of crossbars for 9-storey and 25-storey frames under the combined action of vertical and wind loads has been established. It was found out that with a large number of floors, the crossbars of the lower floors should be reinforced with additional working fittings in the area of the support sections from both the upper fibers and the lower fibers. In the middle of the span, where the moments from the wind load are close to zero, reinforcement of the lower span fibers remains traditional.

Ключевые слова: монолитная рама, ветровая нагрузка, сочетание усилий, огибающая эпюра, армирование, изгибающий момент.

Key words: monolithic frame, wind load, combination forces, envelope plot, reinforcement, bending moment.

УДК 624.94.012.45

Введение. Каркасные конструктивные схемы являются основой современного городского строительства. Возможность иметь большие неперегораживаемые помещения, гибкую планировку определяет заинтересованность заказчика именно в таких зданиях. Несущая система в этом случае является рамной, т. к. представлена многоэтажными и в большинстве случаев монолитными рамами. Прочность несущей системы может обеспечиваться и по рамно-связевой схеме за счёт вклю-

чения в работу дополнительных вертикальных несущих конструкций – ядер и диафрагм жёсткости [1–3]. Исследование поведения монолитных рам под нагрузкой представляет значительный научный и практический интерес, позволяя получать эффективные проектные решения несущих систем зданий [4; 5].

Постановка задачи исследования. Многоэтажные монолитные рамы испытывают действие постоянных нагрузок и различных комбинаций вертикальных временных нагрузок. Особое значение приобретает воздействие знакопеременной ветровой нагрузки, которая должна учитываться в сочетании с вертикальными нагрузками. Этажность здания играет существенную роль в напряжённо-деформированном состоянии элементов рам, т. к. при большом количестве этажей усилия от горизонтальной нагрузки начинают превалировать над усилиями от вертикальных нагрузок, значительно меняя характер армирования. Поэтому в данной работе исследовано поведение под нагрузкой двух многоэтажных рам: 9-этажной и 25-этажной.

Выполнение исследований. Программа исследований включала в себя расчёт усилий, анализ особенностей армирования ригелей рам различной этажности при совместном действии всех нагрузок (см. рис. 1).

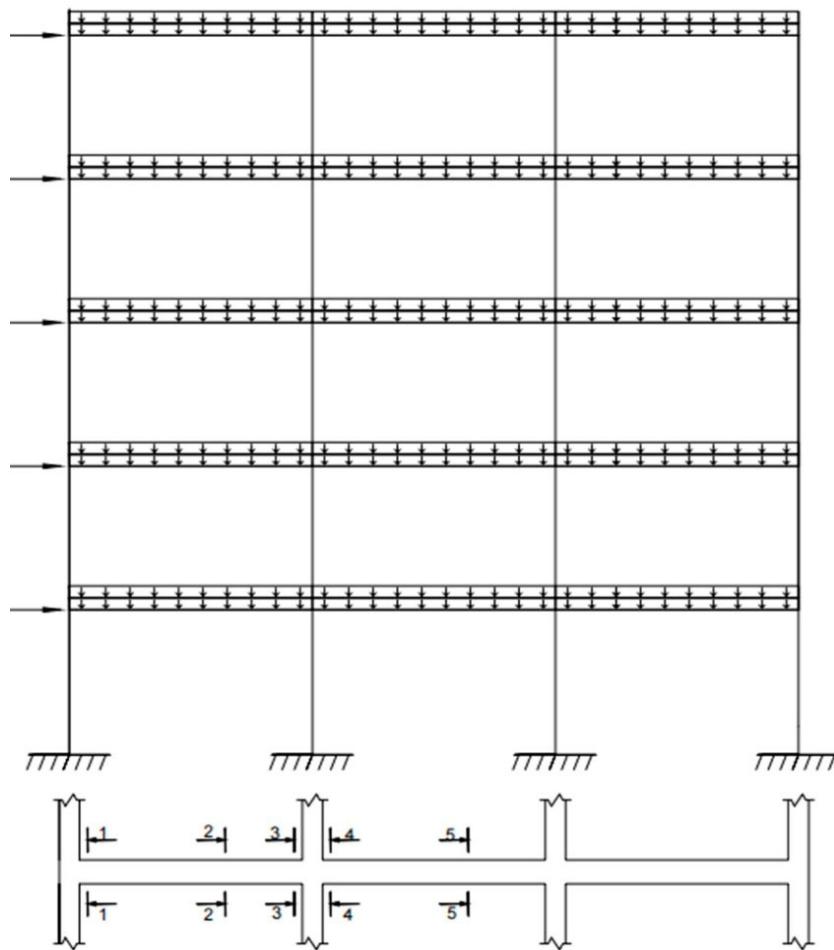


Рис. 1. Нагрузки, действующие на поперечную раму, и расчётные сечения ригеля

Определение изгибающих моментов и поперечных сил в элементах рам производилось приближёнными способами. При вычислении усилий от вертикальных нагрузок использована программа «Rigel» [6], позволяющая находить усилия в сечениях ригеля при различных комбинациях нагрузений и строить огибающие эпюры M и Q . Алгоритм данной программы реализует известные положения [3]. Так, опорные моменты вычисляются по формулам $M = \alpha \cdot g \cdot l_b^2$ и

$M = \beta \cdot \upsilon \cdot l_b^2$, где g и υ – соответственно постоянная и времененная нагрузки; α , β и l_b – соответственно коэффициенты, зависящие от соотношения погонных жёсткостей колонн и ригелей, и расчётный пролёт. Изгибающий момент в любом пролётном сечении x равен (например, при известных для второго пролёта опорных моментах M_{23} и M_{32})

$$M_x = M_{23} + \frac{M_{32} - M_{23}}{l_b} \cdot x + \frac{g \cdot x \cdot (l_b - x)}{2}.$$

Огибающая эпюра моментов от действия постоянной нагрузки и различных схем вертикальных временных нагрузок приведена на рис. 2.

Расчёт ветровой нагрузки выполнялся в соответствии с основными положениями свода правил «Нагрузки и воздействия» [7]. Основную ветровую нагрузку, действующую на здание, определяли как сумму средней составляющей и пульсационной составляющей. Для 25-этажного здания эквивалентная высота z_e определялась из условия $h > 2d$, а для 9-этажного здания – из условия $d < h \leq 2d$ [7]. Величина ветрового давления соответствовала городу Хабаровску и принималась по нормам проектирования [7].

При вычислении пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки w_g на эквивалентной высоте z_e учитывали коэффициент пульсации давления ветра $\zeta(z_e)$ в зависимости от эквивалентной высоты z_e и коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра ν . Для 25-этажного здания пульсационная составляющая определялась с учётом коэффициента динамичности ξ , т. к. первая частота собственных колебаний была меньше предельного значения частоты собственных колебаний [7]. Для 9-этажного здания первая частота собственных колебаний превышала предельное значение частоты собственных колебаний, поэтому коэффициент динамичности ξ при вычислении пульсационной составляющей для этого здания не учитывался [8]. По найденным значениям средней составляющей и пульсационной составляющей определяли основную ветровую нагрузку.

Усилия в элементах рамы от ветровой нагрузки также определяли приближённым методом, изложенным в работе [3], в следующем порядке: распределённую ветровую нагрузку приводили к узловой по соответствующим грузовым площадям, далее определяли ярусные поперечные силы и поперечные силы в колоннах яруса, распределяя ярусную поперечную силу между колоннами яруса в соответствии с соотношением изгибных жёсткостей. Затем находили моменты в колоннах, полагая нулевую точку моментов расположенной в середине высоты этажа, и изгибающие моменты в ригелях из условия равновесия узлов.

Для анализа армирования выполняли расчёт второго яруса рам. Рассматривались три опорных сечения и два пролётных. Для опорных сечений вычислялись моменты по граням колонн (см. рис. 1). На рис. 2 и 3 приведены расчётные эпюры изгибающих моментов для второго этажа 9- и 25-этажных рам. На рис. 2 и 3, *a* и *b* обозначены эпюры моментов при действии ветровой нагрузки справа налево и слева направо. На рис. 2 и 3, *в* показаны ординаты огибающей эпюры от вертикальных нагрузок. При проектировании каркасов необходимо учитывать сочетания усилий от действия постоянных, вертикальных временных и ветровых нагрузок. На рис. 2 и 3, *г* приведены такие сочетания для рам разной этажности.

Анализ суммарной эпюры сочетаний моментов от горизонтальных и вертикальных нагрузок (см. рис. 2, *г*) для 9-этажной рамы позволяет сделать вывод, что в этом случае сохраняется обычное традиционное армирование ригеля рамы с рабочей арматурой в нижних волокнах пролётных сечений и верхних волокнах опорных сечений (см. рис. 4, *а*). При этом за счёт знакопеременной ветровой нагрузки опорные моменты в верхних волокнах несколько увеличиваются, а моменты в нижних волокнах остаются прежними.

Особенность сочетания усилий в высотном здании заключается в том, что моменты от горизонтальной нагрузки доминируют над моментами от вертикальной нагрузки. Рассмотрим суммарную эпюру сочетаний моментов для 25-этажной рамы при совместном действии знакопеременной ветровой и вертикальной постоянной и временной нагрузок.

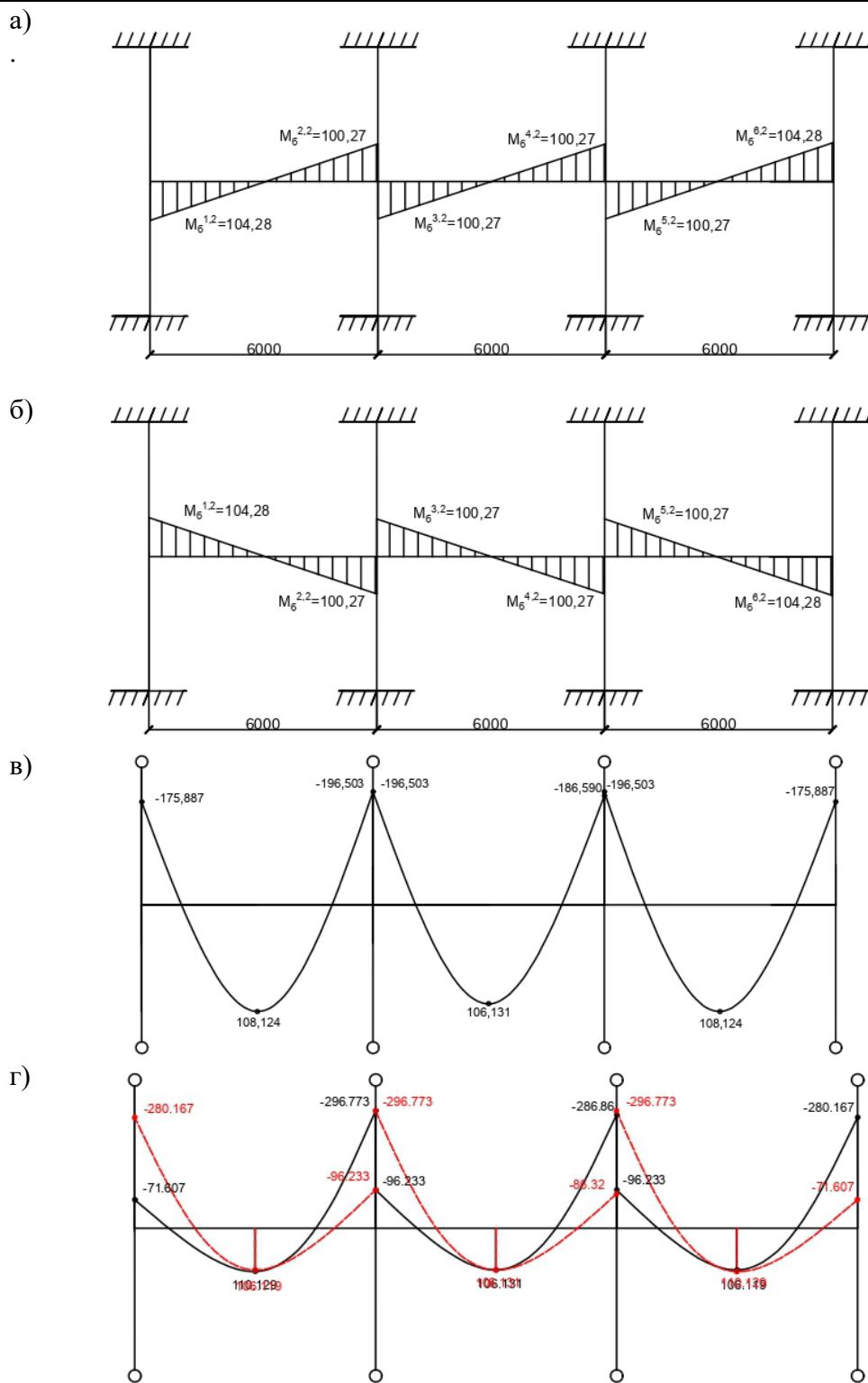


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов от знакопеременной ветровой нагрузки (а, б), огибающая эпюра моментов от вертикальной нагрузки (в) и суммарная эпюра сочетаний моментов от горизонтальных и вертикальных нагрузок (г) для 9-этажной рамы

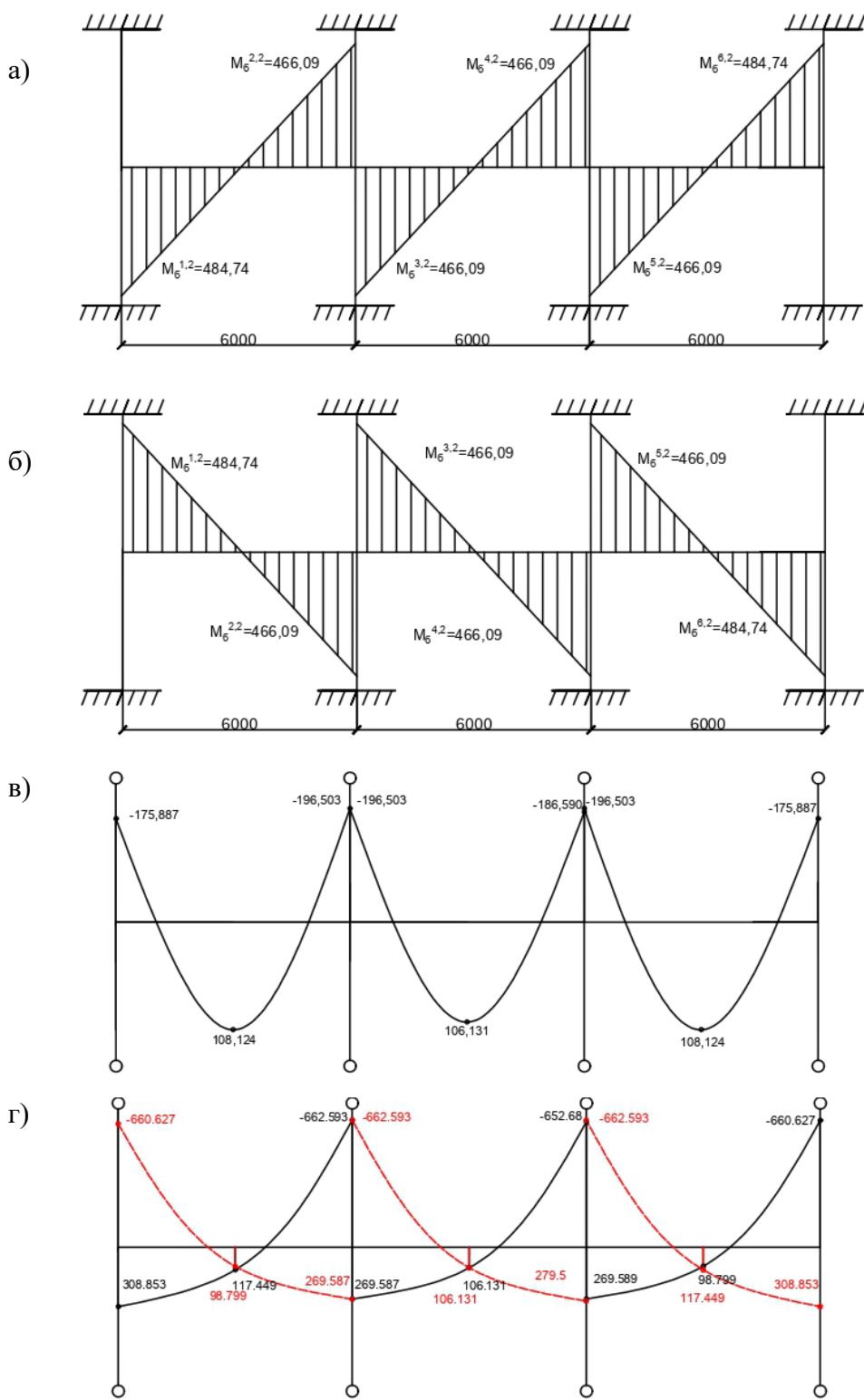


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов от знакопеременной ветровой нагрузки (а, б), огибающая эпюра моментов от вертикальной нагрузки (в) и суммарная эпюра сочетаний моментов от горизонтальных и вертикальных нагрузок (г) для 25-этажной рамы

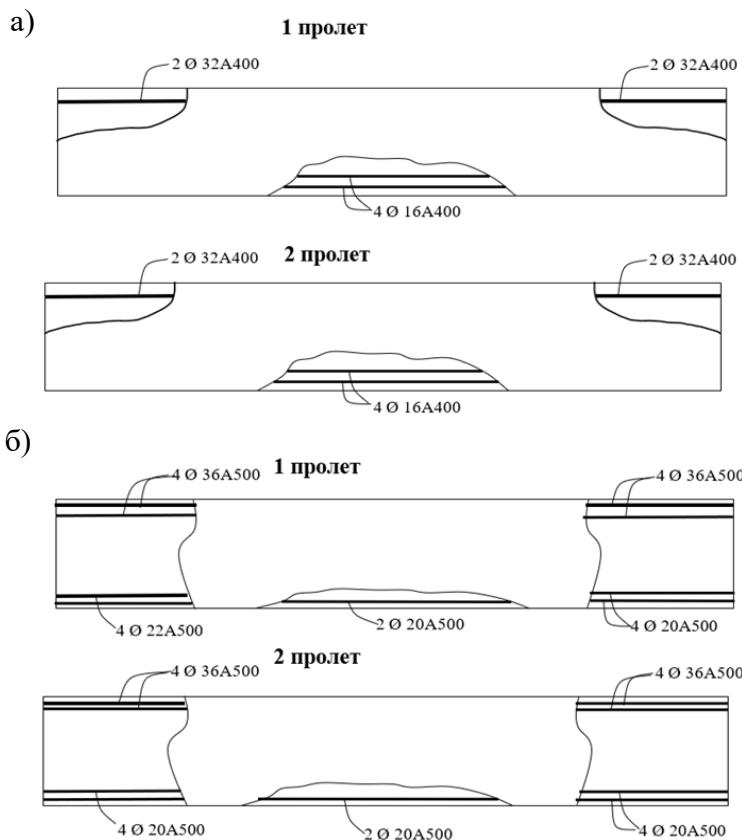


Рис. 4. Армирование двух пролётов ригеля второго яруса для монолитной рамы 9-этажного здания (а) и 25-этажного здания (б)

Моменты в расчётных сечениях ригеля исследуемого второго яруса от действия ветровой нагрузки более чем в два раза превышают моменты от вертикальной нагрузки и существенно влияют на армирование. В итоге для 25-этажной рамы имеем мощное армирование верхних волокон опорных сечений. Кроме этого, появляется потребность установить рабочую арматуру в нижних волокнах опорных сечений, растянутых от действия ветровой нагрузки. Нижние волокна опорных сечений будут испытывать существенное растяжение в сравнении с нижними волокнами пролётной части ригеля. В середине пролёта в нижних волокнах момент от ветровой нагрузки минимален, поэтому здесь сохраняется обычное армирование растянутой зоны (см. рис. 4, б).

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование и расчёт многоэтажных гражданских зданий и их элементов / П. Ф. Дроздов, М. И. Додонов, Л. Л. Паньшин, Р. Л. Саруханян. – М.: Стройиздат, 1986. – 351 с.
2. Кодыш, Э. Н. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом / Э. Н. Кодыш, Н. Н. Трекин, И. К. Никитин. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. – 352 с.
3. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
4. Карпенко, Н. И. Общие модели механики железобетона / Н. И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
5. Дзюба, В. А. Параметры диаграмм «момент-кривизна» железобетонных элементов с арматурой А500 на стадии близкой к разрушению / В. А. Дзюба, К. А. Арсентьева, Е. В. Журавлева // Учёные записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2024. – № 1 (73). – С. 68-74.
6. Дзюба, В. А. Расчёт сборных железобетонных конструкций многоэтажного каркасного здания / В. А. Дзюба. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – 123 с.
7. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия: свод правил: издание официальное / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, АО «НИЦ Строительство». – М.: Стандартинформ, 2018. – 72 с.
8. Проектирование несущих конструкций многоэтажного каркасного здания / С. В. Горбатов [и др.]. – М.: НИУ МГСУ, 2015. – 104 с.

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.
G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВ ЭНЕРГИИ И МАССЫ ФОТОНА С ПОЗИЦИЙ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

INTERPRETATION OF PHOTON ENERGY AND MASS QUANTA IN TERMS OF UNIVERSAL GRAVITATION LAW

Колыхалов Геннадий Антонович – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Gennady A. Kolykhalov – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. В работе представлены результаты вычислений квантов энергии и массы движущего фотона. Уточнена формула для подсчёта кванта времени. Показано, что вычисленный квант времени существенно меньше Планковского времени. Предложена модель, объясняющая с определённых позиций эффекты, происходившие в Планковский отрезок времени. Определена сила гравитационного взаимодействия между частицами (фотонами) с квантовой массой на квантовом расстоянии между ними. Установлена количественная связь между фундаментальными постоянными процессов разной природы (механическими и электрическими). Показано, что длина волны фотона с квантовыми значениями энергии и массы движения соизмерима с характерным размером Вселенной, её радиусом горизонта, что эквивалентно положительно-му ответу на вопрос о равенстве нулю массы покоя фотона.

Summary. The results of calculations of energy and mass quanta of a moving photon are presented in the paper. The formula for the calculation of the time quantum is specified. It is shown that the calculated time quantum is essentially smaller than the Planck time. A model explaining from certain positions the effects occurring in the Planck time interval is proposed. The force of gravitational interaction between particles (photons) with quantum mass at a quantum distance between them is determined. The quantitative connection between fundamental constants of processes of different nature (mechanical and electrical) has been established. It is shown that the wavelength of a photon with quantum values of energy and mass of motion is commensurate with the characteristic size of the Universe, its horizon radius, which is equivalent to a positive answer to the question about the equality to zero of the photon rest mass.

Ключевые слова: квант, фотон, хронон, размерность, энергия, масса, время, гравитация, сила, волна, взаимодействие, Вселенная.

Key words: quantum, photon, chronon, dimensionality, energy, mass, time, gravity, force, wave, interaction, universe.

УДК 539.122:52-423

В рамках исследования процессов, протекающих во Вселенной на всех её иерархических уровнях, включая и уровень элементарных частиц [1], к которым принадлежит и фотон, относящийся к классу так называемых бозонов, носителей фундаментальных сил природы [2], важная роль отводится теоретическим и экспериментальным исследованиям по определению кванта энергии и соответствующего ему кванта массы движущего фотона.

В соответствии с гипотезой, выдвинутой Луи де Бройлем, любая микрочастица, в их числе и фотон, обладает свойствами как волны, так и частицы, иначе нарушится принцип дуализма в квантовой механике. Эта гипотеза была экспериментально подтверждена советским учёным-физиком В. Фабрикантом [3].

В настоящее время ведутся дискуссии по поводу того, имеет фотон массу покоя или нет.

Сторонники отсутствия массы покоя у фотона утверждают, что если бы масса покоя была не нулевой, то в квантовой механике возникла бы проблема из-за потери в этом случае калибротивной инвариантности и не было бы гарантировано сохранения заряда [4]. При этом считается, что фотон может существовать, двигаясь только со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Однако существуют и противоположные мнения [5].

Рассмотрим гипотезу, что фотон не обладает массой покоя, всегда находится в движении, его массу движения будем определять по формуле закона всемирного тяготения.

В связи с этим предположим, что во Вселенной в среде фотонов существуют фотоны с минимальным значением энергии (квант энергии) и эквивалентной ей минимальной массой (квант массы).

По результатам, полученным со спутника Charge Composition Explorer (1984 г.), было установлено [4], что верхний предел энергии E равен 6×10^{-16} эВ, что соответствует эквивалентной массе $m = 1,07 \times 10^{-51}$ кг.

В 1998 г. Roderic Lakes, используя маятник Кавендиша, уточнил этот результат в лабораторном эксперименте по определению аномалии сил. Новое значение предела для энергии E оказалось равным 7×10^{-17} эВ, что эквивалентно массе $m = 1,246 \times 10^{-52}$ кг. Изучение галактических магнитных полей дало ещё более низкий предел для энергии E , он равен 3×10^{-27} эВ, что соответствует массе $m = 0,534 \times 10^{-52}$ кг. В работе [4] отмечается, что этот метод пока не считается вполне надёжным.

В рамках дальнейшей оценки нижнего предела энергии физик, академик Д. Д. Рютов [6] предлагает провести измерения плазмы на окраинах Солнечной системы, потом – межгалактической плазмы и, наконец, в масштабах всей Вселенной. Возможно, тогда и будет экспериментально установлен нижний предел энергии фотона и, соответственно, его массы.

Для определения силы взаимного притяжения двух одинаковых по массе фотонов воспользуемся законом всемирного тяготения, записанным в виде

$$\vec{F} = G \cdot \frac{m^2}{r^2} \cdot \vec{r}, \quad (1)$$

где \vec{F} – сила гравитационного взаимодействия между двумя фотонами; G – гравитационная постоянная; m – масса фотона; r – расстояние между взаимодействующими фотонами; \vec{r} – единичный вектор.

Выразим из приведённого соотношения (1), записанного в скалярной форме, гравитационную постоянную G и её размерность:

$$G = \frac{F \cdot r^2}{m^2} = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} = \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \cdot \frac{\text{с}}{\text{с}} \right]. \quad (2)$$

В этом случае, исходя из размерности формулы (2), представим G в виде [7]

$$G = v^3 \cdot \frac{t}{m}, \quad (3)$$

где $v = \frac{r}{t}$ – скорость, здесь r – расстояние между фотонами; t – время.

Учитывая, что фотоны движутся со скоростью v , равной скорости света c , т. е. $v = c = 3 \cdot 10^8$ м/с, из формулы (3) выражаем массу фотона:

$$m = \frac{c^3}{G} \cdot t. \quad (4)$$

Отсюда видно, что минимальное значение массы фотона m , т. е. квант массы $m = m_{\text{кв}}$, определяется минимальным значением отрезка времени t , т. е. квантом времени $t = \Delta t$.

В настоящее время за квант времени в основном принимают Планковский период с длительностью $0 < t_{\text{пл}} < 5,4 \cdot 10^{-44}$ с. Этот этап рассматривается в теории Большого взрыва как квантовый хаос, и законченной физической теории этого этапа пока не существует.

Однако можно предположить, что в этот период времени в области сингулярной точки шли как в физическом, известном как Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий), так и в информационном плане процессы, которые и создали все условия для рождения Вселенной и последующего её развития по заданной программе.

Планковское время является фундаментальной константой нашей Вселенной, т. к. построено на базе фундаментальных характеристик Вселенной, представленных значениями постоянной Планка, гравитационной постоянной и скоростью света.

При этом можно принять, что именно период Планковского этапа времени $0 < t_{\text{пл}} < 5,4 \cdot 10^{-44}$ с является тем «инкубационным» отрезком времени, где были созданы все условия для рождения «разумной» Вселенной.

Более того, можно положить, что именно числовое значение Планковского времени $t_{\text{пл}} = 5,4 \cdot 10^{-44}$ с есть дата рождения нашей Вселенной. При этом, однако, вопрос о кванте времени остается открытым.

Если предположить, что существует гораздо меньший отрезок времени, чем Планковский период, который можно принять за квант времени в нашей Вселенной, то, возможно, в будущем это даст учёным ключ к разгадке процессов, поэтапно протекавших в Планковский период времени и определивших дальнейшую судьбу нашей Вселенной.

Оценим квант времени Δt . В работе [8] рассматривается гипотетический квант времени – неделимая единица времени, называемая хрононом. Пьером Кардиролой в 1980 году была предложена конкретная модель хронона, описываемая формулой

$$\theta_0 = \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{m_0 \cdot c^3}, \quad (5)$$

где θ_0 – квант времени; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная; e – элементарный электрический заряд; m_0 – масса электрона.

Применённая к массе электрона, она даёт значение для кванта времени:

$$\theta_0 \approx 6,97 \cdot 10^{-24} \text{ с.}$$

Однако если эту формулу применить к максимальной массе, в нашем случае массе Вселенной, равной $m_0 \approx 10^{53}$ кг [9], то это даст минимальное значение времени, т. е. квант времени:

$$\Delta t \approx \frac{1}{6 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{10^{53} \cdot (3 \cdot 10^8)^3} \approx 5,6 \cdot 10^{-107} \text{ с.}$$

Уточним в формуле (5) значение коэффициента k , равного $k = \frac{1}{6 \cdot \pi}$.

Примем $\theta_0 = \Delta t$. Под массой m_0 будем понимать массу любого количества вещества, будь то масса электрона, Вселенной или любая другая.

В рамках теории размерности [7] получим для определения коэффициента k выражение в фундаментальных единицах:

$$k = h \cdot c \cdot \frac{\epsilon_0}{e^2}. \quad (6)$$

Подставим в формулу (6) значения фундаментальных единиц, получим

$$k = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12}}{2,56 \cdot 10^{-38}} = 68,76 \approx 70.$$



В этом случае формула (5) приобретает вид

$$\theta_0 = \Delta t \approx 70 \cdot \frac{e^2}{\epsilon_0 \cdot m_0 \cdot c^3}. \quad (7)$$

Соответственно, зависимость (7) даёт значение для кванта времени:

$$\theta_0 = \Delta t \approx 70 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{53} (3 \cdot 10^8)^3} \approx 0,75 \cdot 10^{-103} \approx 10^{-103} \text{ с.} \quad (8)$$

Что касается зависимости (6), то она устанавливает количественную связь между фундаментальными постоянными процессов разной природы (механическими и электрическими):

$$h \cdot c = 68,76 \cdot \frac{e^2}{\epsilon_0} \approx 70 \cdot \frac{e^2}{\epsilon_0}.$$

В рамках модели Большого взрыва можно сделать предположение, что Планковское время – это рубежная, временная граница перехода сплошной среды (плазмы) с экстремальными характеристиками давления, плотности и температуры из так называемого хаотического состояния вблизи сингулярной точки в упорядоченное её фрагментирование с образованием дискретных субстанций (частиц) на всех иерархических уровнях – от элементарных частиц до Мегагалактик – во всём последующем время формирования нашей Вселенной.

Подставим значения скорости света c , кванта времени Δt , определённое по формуле (8), и гравитационной постоянной $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ в формулу (4), будем иметь для кванта массы фотона значение

$$m = m_{\text{кв}} = \frac{27 \cdot 10^{24} \cdot 10^{-103}}{6,67 \cdot 10^{-11}} = 4 \cdot 10^{-68} \text{ кг.} \quad (9)$$

В статье В. П. Севрюка [10] со ссылкой на работу [11] указывается, что А. Логунов и М. Мествишили ввели понятие гравитона с отличной от нуля массой покоя и оценили его значение величиной, равной $64 \cdot 10^{-70} \text{ кг} = 0,64 \cdot 10^{-68} \text{ кг}$. То есть полученный нами квант массы движущего фотона (9) близок по значению к минимальной массе, массе гравитона.

Квант энергии фотона будет равен

$$E = m \cdot c^2 = 4 \cdot 10^{-68} \cdot 10^{17} \text{ Дж} = 2,53 \cdot 10^{-32} \text{ эВ.} \quad (10)$$

Значения вычисленных квантов массы по формуле (9) и энергии по формуле (10) фотона на пять порядков ниже, чем значения, полученные при изучении галактических магнитных полей и равные $E = 3 \cdot 10^{-27} \text{ эВ}$ и $m = 5,34 \cdot 10^{-63} \text{ кг}$ соответственно.

Для сравнения: по информации, взятой с портала «Научная Россия» [12], учёные из Великобритании, Бразилии и Франции впервые установили верхний предел для массы m_h частицы самого лёгкого вида нейтрино, которая составляет $m_h = 1,5 \cdot 10^{-37} \text{ кг}$, что примерно в шесть миллионов раз меньше массы электрона. Что тогда говорить о кванте массы, полученной для фотона $m_{\text{кв}} = 4 \cdot 10^{-68} \text{ кг}$? Это, по-видимому, самая мельчайшая частица в нашей Вселенной.

Минимальное расстояние между фотонами, т. е. квант длины, определится соотношением

$$r = \Delta l = c \cdot \Delta t = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-103} = 3 \cdot 10^{-95} \text{ м.}$$

Если считать, что закон всемирного тяготения действует и на таких расстояниях, то тогда сила гравитационного взаимодействия между двумя одинаковыми фотонами определится значением

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(4 \cdot 10^{-68})^2}{9 \cdot 10^{-190}} = 1,2 \cdot 10^{44} \text{ Н.}$$

Следует иметь в виду, что надёжное значение квантовой величины времени и квантовых значений энергии и массы фотона определяется точностью оценки величины видимой массы Вселенной, а она, по-видимому, меняется со временем.

Гипотетически можно предположить, что электроны и элементы ядра атома и другие элементарные частицы построены из фотонов с минимальными (квантовыми) значениями энергии и массы.

Определим длину волны кванта фотона λ , для чего воспользуемся зависимостью

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot c}.$$

Подставим сюда значения постоянной Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с, массы $m = m_{\text{кв}} = 4 \cdot 10^{-68}$ кг, скорости света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, получим

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4 \cdot 10^{-68} \cdot 3 \cdot 10^8} = 0,55 \cdot 10^{26} \text{ м.} \quad (11)$$

Эту длину волны называют комптоновской длиной волны.

Во Вселенной существует предельное расстояние, называемое радиусом горизонта R_h , в рамках которого мы можем получать информацию.

Наличие горизонта обусловлено конечностью максимальной скорости распространения сигналов, т. е. скоростью света c и возрастом Вселенной T . Радиус горизонта определяется формулой

$$R_h = c \cdot T$$

и составляет

$$R_h = c \cdot T = 3 \cdot 10^8 \cdot 4,32 \cdot 10^{17} \approx 1,3 \cdot 10^{26} \text{ м.} \quad (12)$$

Из формул (11) и (12) видно, что длина волны кванта фотона λ соизмерима с характерным линейным размером Вселенной R_h .

В работе [13] подчёркивается, что поскольку специфические эффекты в электродинамике с ненулевой массой фотона могли бы проявляться лишь на расстояниях, больших или порядка комптоновской длины λ , то из самого факта присутствия предельного информационного радиуса R_h следует, что неравенство $\lambda > c \cdot T$ было бы эквивалентно положительному ответу на вопрос о равенстве нулю массы покоя фотона, поскольку ненулевая масса, удовлетворяющая этому неравенству, практически никак бы себя не проявляла.

Выводы. В работе представлены результаты вычислений квантов энергии и массы движущего фотона.

Уточнена формула для подсчёта кванта времени.

Показано, что вычисленный квант времени существенно меньше Планковского времени.

Сделано предположение, что Планковское время – это рубежная временная граница перехода сплошной среды вещества (плазмы) вблизи точки сингулярности во фрагментированное состояние с образованием дискретных субстанций (частиц) на всех иерархических уровнях – от элементарных частиц до Метагалактик – во всё последующее время жизни нашей планеты.

Определена сила гравитационного взаимодействия между частицами (фотонами) с квантовой массой на квантовом расстоянии между ними.

Показано, что длина волны фотона с квантовыми значениями энергии и массы движения соизмерима с характерным размером Вселенной, её радиусом горизонта, что эквивалентно положительному ответу на вопрос о равенстве нулю массы покоя фотона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия. В 5 т. Т. И. Ааронова-Бома эффект-Длинные линии / гл. ред. А. А. Прохоров. ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Болдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 704 с.



2. Бозоны // Ядерная физика в Интернете. – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/enc/e018.htm> (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
3. Опыт Бибермана, Сушкина, Фабриканта о дифракции одиночных электронов // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фабрикант,_Валентин_Александрович#Опыт_Бибермана,_Сушкина,_Фабриканта_о_дифракции_одиночных_электронов (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
4. Чему равна масса фотона? / перевод Е. Корниенко // Механизмы существования и сознания. – URL: https://cyber-ek.ru/science/photon_mass.html (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
5. Иванов, И. Время жизни фотона / И. Иванов // Элементы. – URL: https://elementy.ru/problems/637/Vremya_zhizni_fotona (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
6. Выорков, В. Как взвесить фотон / В. Выорков // ИФТТ РАН. – URL: http://www.issp.ac.ru/journal/perst/Control/Inform/perst/2008/8_19/n.php?file=perst.htm&label=C_08_19_3 (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
7. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1967. – 428 с.
8. Хронон // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Хронон> (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
9. Метагалактика // Википедия, свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Метагалактика> (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
10. Севрюк, В. П. Математическая теория единого поля материи и большого взрыва / В. П. Севрюк // Бюллетень научных сообщений. – 2013. – № 18. – С. 42-53.
11. Логунов, А. Основы релятивистской теории гравитации / А. Логунов, М. Мествишивили. – М.: МГУ, 1985. – 204 с.
12. Астрофизики высчитали массу самого лёгкого нейтрино // Научная Россия. – URL: <https://scientificrussia.ru/articles/astrofiziki-vyschitali-massu-samogo-legkogo-nejtrino> (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.
13. Чибисов, Г. В. Астрофизические верхние пределы на массу покоя фотона / Г. В. Чибисов // Успехи физических наук. – 1976. – Т. 119. – № 3. – С. 551-555. – URL: <chrome-extension://efaidnbmnnibpsajpcglclefindmkaj/https://www.mathnet.ru/links/83957d7b99ca69311c8a0d0eaf173f3e/ufn9845.pdf> (дата обращения: 28.10.2024). – Текст: электронный.

Content

Научное издание

CONTROL

A. S. Gudim, D. O. Savelyev, V. V. Plokhotnyuk

INTELLIGENT SYSTEM FOR COMPENSATION OF NONLINEARITIES
OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS 4

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

I. E. Lyaskovsky, S. A. Gordin

MODELING OF GENERATION CONTROL PROCESS
IN ISOLATED THERMAL POWER SYSTEMS 12

D. V. Chernyshova, A. I. Evstigneev, E. A. Dmitriev, V. I. Odinokov

EVALUATION OF RESULTS OF NUMERICAL MODELING
OF CRACK RESISTANCE OF CYLINDRICAL
AND SPHERICAL CERAMIC SHELL FORMS 17

N. S. Kolyeva, M. V. Panova, D. L. Fedorov, K. A. Perestenko, E. D. Yarochkina

DEVELOPMENT OF PLIS SOFTWARE FOR THE CONTROL
WALL OF AN INDUSTRIAL COMPANY 24

S. I. Noskov, A. P. Medvedev

ESTIMATION OF PARAMETERS OF HOMOGENEOUS NESTED
PIECEWISE LINEAR REGRESSION OF THE SECOND TYPE 29

M. P. Bazilevskiy

AN ALGORITHM FOR ESTIMATING UNKNOWN PARAMETERS
OF ONE TYPE OF MULTILAYER NON-ELEMENTARY
LINEAR REGRESSIONS 35

A. N. Petrova, D. O. Frolov, T. L. Dmitrieva

ANALYSIS OF SMOOTHING METHODS TO INCREASE
THE ACCURACY OF INFORMATION SEARCH
IN BIG DATA SYSTEMS 45

V. A. Goncharenko, A. D. Khomonenko, R. Abu Khasan

GENETIC ALGORITHM FOR SELECTING THE RAID ARRAY OPTIMAL
CONFIGURATION OF THE ENTERPRISE DATA STORAGE SYSTEM 50

MACHINERY

A. V. Shilyaev, P. V. Bakhmatov

STUDY OF PERMANENT JOINTS PRODUCED BY TACTICAL
ARGON-ARC WELDING USING COMPUTATIONAL DATA 61

P. A. Sablin, K. D. Kosachev

THE SEARCH FOR THE OPTIMAL USE OF DIGITAL TWINS
IN THE MACHINING OF MACHINE PARTS BASED
ON THE ANALYSIS LITERARY SOURCES 67

MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGY

I. O. Panshin, E. Kh. Ri, E. D. Kim, V. S. Popova

INFLUENCE OF TITANIUM ON STRUCTURE FORMATION
AND MICROHARDNESS OF HIGH-ENTPY ALLOY OF THE Al-Co-Cr-Fe-V-M (M=Ti)
SYSTEM SYNTHESIZED BY SHS METALLURGY 74

Sh. A. Karimov, Sh. M. Shakirov, E. Sh. Dzhemilov, I. V. Belova

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT PROPAGATION
IN ELECTRIC CONTACT SINTERING 80

E. A. Startsev, P. V. Bakhmatov

ANALYSIS OF PHASE TRANSITIONS AND MASS CHANGES
OF WELDING FLUXES AND SLAGS AT HIGH TEMPERATURES 85

MATHEMATICS AND MECHANICS

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

THE GENETICS OF THE «BIG BANG» 93

V. A. Dzyuba, I. G. Chepizubov, Dun Gotsay

EFFICIENT REINFORCEMENT OF MULTISTORY
FRAMES CONSIDERING WIND LOADS 103

G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko

INTERPRETATION OF PHOTON ENERGY AND MASS QUANTA
IN TERMS OF UNIVERSAL GRAVITATION LAW 109

Учёные записки КнАГТУ
2025 № 1 (81)
Науки о природе
и технике

Выпускающий редактор
Е. П. Иванкова

Подписано в печать 26.03.2025
Дата выхода в свет 28.03.2025

Формат А4.
Бумага офисная 80 г/м².
Усл. печ. л. 13,63.
Уч.-изд. л. 17,18.
Тираж 200. Заказ 31299

Отпечатано:
в типографии КнАГУ
681013,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 27;
в типографии «Агора»
681024,
г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, д. 39.

