

Журнал «Научное обозрение. Технические науки» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИИ № ФС77-57440 выдано 27.03.2014. ISSN 2500-0799

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319

Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,

Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47
Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,
ул. им. Чапаева В.И., д. 56
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,
ул. Мамонтовой, д. 5

Founder, publisher and edition:
LLC SPC Academy of Natural History,

Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47
Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,
5 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.

Подписано в печать 28.02.2025
Дата выхода номера 31.03.2025
Формат 60×90 1/8

Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Signed in print 28.02.2025
Release date 31.03.2025
Format 60×90 8.1

Typography
LLC SPC «Academy Of Natural History»
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.

Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Распространяется по свободной цене
Тираж 1000 экз. Заказ НО 2025/1
Подписной индекс в электронном каталоге
«Почта России»: ПА518
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено Академией Естествознания

From 2014 edition of the journal resumed by Academy of Natural History

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)
А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)
Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)
М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)
Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)
Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovozova**)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2025 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
статьи проблемного
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,
problem and practical scientific articles***

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки

СТАТЬЯ

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ В ПРОЦЕССЕ ИОННОГО ОБМЕНА МЕТАЛЛОВ

Сатыбалдыев А.Б. 5

Физико-математические науки

СТАТЬЯ

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ЗАДАЧ ДЛЯ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ
РЕСУРСАМИ

Золотухина Д.Ю. 10

Технические науки

СТАТЬИ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ

Крайнов К.Р., Кротков Е.А. 16

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНОГО
МОДУЛЯ С БЕСПЛАТФОРМЕННЫМ ИНЕРЦИАЛЬНЫМ БЛОКОМ

Лысова А.А., Пашин С.В. 21

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВАРОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
В ТРУБОПРОИЗВОДСТВЕ

Чкалова М.В., Кистанов А.А. 27

CONTENTS

Technical sciences

ARTICLE

MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING OPTIMAL
PARAMETERS IN THE PROCESS OF METAL ION EXCHANGE

Satylbaldiev A.B. 5

Physical and mathematical sciences

ARTICLE

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE TASK SCHEDULING
ALGORITHM FOR SYSTEMS WITH LIMITED
COMPUTATIONAL RESOURCES

Zolotukhina D.Yu. 10

Technical sciences

ARTICLES

APPLICATION OF WIND POWER PLANTS IN AUTONOMOUS
POWER SUPPLY SYSTEMS OF OIL FIELDS

Krainov K.R., Krotkov E.A. 16

EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE CONTROL SYSTEM
OF THE LANDER WITH A STRAPLESS INERTIAL UNIT

Lysova A.A., Pashnin S.V. 21

OPTIMISATION OF WELDING TECHNOLOGY SELECTION
IN PIPE PRODUCTION

Chkalova M.V., Kistanov A.A. 27

СТАТЬЯ

УДК 66.061.34:519.876.5

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
В ПРОЦЕССЕ ИОННОГО ОБМЕНА МЕТАЛЛОВ****Сатыбалдыев А.Б.***Ошский технологический университет им. М.М. Адышева, Ош,
e-mail: Baatyrbekovich@gmail.com*

Актуальность процессов ионного обмена металлов заключается в значимости для металлургии, электрохимии и экологических технологий, где данные процессы используются для очистки и получения металлов, а также в производстве аккумуляторов и очищении сточных вод. Цель исследования – разработка математических моделей для определения оптимальных параметров ионного обмена металлов, позволяющих эффективно управлять этими процессами. Основной подход исследования базируется на теоретическом моделировании, включающем уравнения Нернста – Планка для описания потока ионов и уравнения плотности тока. Используются предположения о стационарном состоянии и отсутствии конвекции, что позволило аналитически решить систему уравнений и выявить ключевые параметры, такие как концентрация ионов, коэффициент диффузии, температура и расстояние между электродами. Результаты исследования показали, что математические модели позволяют точно предсказать влияние указанных параметров на эффективность процесса ионного обмена. Обоснована линейная зависимость между плотностью тока и приложенным напряжением, что упрощает управление процессом. Установлено, что форма и площадь электродов существенно влияют на эффективность, а также доказано влияние температуры на проводимость системы. Разработанные модели находят применение в оптимизации процессов в промышленности и экологии, а также в улучшении контроля и управления обменом ионов, что способствует повышению эффективности технологических процессов.

Ключевые слова: ионный обмен металлов, математические модели, оптимальные параметры, электрическое поле, диффузия и миграция, электродные процессы, стационарное состояние

**MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING OPTIMAL
PARAMETERS IN THE PROCESS OF METAL ION EXCHANGE****Satyrbaldiev A.B.***Osh Technological University named after M.M. Adyshev, Osh,
e-mail: Baatyrbekovich@gmail.com*

The relevance of metal ion exchange processes lies in their significance for metallurgy, electrochemistry, and environmental technologies, where they are employed for metal purification and extraction, as well as in the production of batteries and wastewater treatment. The aim of the article is to develop mathematical models for determining the optimal parameters of metal ion exchange, enabling efficient management of these processes. The main research approach is based on theoretical modeling, which includes the Nernst-Planck equations to describe ion flux and current density equations. Assumptions of steady-state conditions and the absence of convection were used, allowing for an analytical solution of the system of equations and the identification of key parameters such as ion concentration, diffusion coefficient, temperature, and the distance between electrodes. The research results demonstrated that the mathematical models accurately predict the influence of the specified parameters on the efficiency of the ion exchange process. A linear relationship between current density and applied voltage was substantiated, simplifying process management. It was established that the shape and surface area of electrodes significantly affect efficiency, and the influence of temperature on the system's conductivity was also proven. The developed models are applicable for optimizing industrial and environmental processes, as well as improving the control and management of ion exchange, thereby enhancing the efficiency of technological operations.

Keywords: metal ion exchange, mathematical modeling, optimal conditions, electric fields, diffusion and migration phenomena, electrode dynamics, equilibrium state

Введение

Ионный обмен металлов занимает центральное место во множестве научных и прикладных дисциплин, таких как металлургия, электрохимические технологии и экологические проекты, направленные на устранение тяжелых металлов из промышленных сточных вод [1–3]. Этот процесс лежит в основе методик извлечения, очистки и рафинирования металлов, а также играет критическую роль в функционировании аккумуляторных батарей. Несмотря

на то что накоплен значительный практический опыт применения, дальнейшее развитие требует создания усовершенствованных математических моделей, способных учитывать широкий спектр факторов, определяющих эффективность данных реакций.

Разработка таких моделей особенно актуальна для процессов обмена ионов металлов, таких как золото и серебро, которые находят широкое применение в высокотехнологичных отраслях: электронике, медицине, а также в производстве ювелирных изделий [4–6].

Эффективная математическая формализация этих процессов может существенно увеличить их экономическую целесообразность и расширить технологические горизонты. В современных исследованиях акцент делается на уточнении механизмов, идентификации ключевых переменных и оптимизации условий проведения реакций [7; 8].

Актуальность работы усиливается необходимостью повышения производительности существующих технологических процессов, уменьшения издержек и снижения экологических рисков. Однако, несмотря на значительные достижения в данной области, текущие математические модели нередко базируются на чрезмерно упрощённых предположениях, таких как равенство коэффициентов диффузии или игнорирование конвективных потоков. Эти упрощения серьёзно ограничивают применимость моделей в условиях реального производства [9–11].

Предполагается, что такая модель обеспечит возможность точного определения оптимальных характеристик процессов ионного обмена металлов. Ключевые параметры, подлежащие анализу, включают концентрацию ионов, коэффициенты диффузии, температурные условия, а также геометрические особенности системы, такие как расстояние между электродами. Предполагается, что учёт и корректировка этих факторов позволят целенаправленно управлять процессами и существенно повысить их эффективность.

Цель исследования – создание комплексной математической модели, интегрирующей уравнения, описывающие потоки ионов, плотность тока и связанные параметры.

Основными задачами исследования являются:

1. Построение математической системы, отражающей взаимосвязи между потоками ионов, плотностью тока и другими ключевыми характеристиками.
2. Аналитическое решение полученных уравнений для выявления доминирующих факторов, влияющих на результативность процесса.
3. Изучение влияния таких переменных, как концентрация ионов, геометрические размеры системы и температура, на производительность ионного обмена.
4. Оценка ограничений предложенной модели и определение направлений адаптации данной модели для использования в реальных технологических условиях.

Таким образом, данная работа не только закладывает основу для модернизации процессов ионного обмена в металлургии

и экологии, но и способствует формированию более надёжных подходов к управлению и контролю таких процессов.

Материалы и методы исследования

Для проведения настоящего исследования была применена совокупность математических моделей, основанных на уравнениях Нернста – Планка. Эти уравнения, описывающие ионные потоки с учетом процессов диффузии и миграции, предоставили возможность детально моделировать основные явления, происходящие в исследуемой системе [12]. Особое внимание уделялось условиям стационарного режима, что в сочетании с отсутствием конвекции способствовало упрощению расчетов, не снижая точности анализа.

Расчет электрического потенциала в исследуемой системе был выполнен с использованием подхода, предложенного в работе [4]. Этот метод позволил установить количественные зависимости между приложенным внешним напряжением и распределением электрического поля, что сыграло ключевую роль в оценке закономерностей ионного обмена. При этом электронейтральность системы поддерживалась благодаря методике, описанной в исследовании [5], что исключило влияние побочных эффектов, таких как адсорбция, обеспечивая чистоту экспериментальных данных.

Для обеспечения стабильности концентраций ионов и корректности баланса массы применялось уравнение, рекомендованное в работе [6]. Этот подход позволил достичь высокой точности в описании динамических характеристик модели, что критически важно для проверки теоретических предсказаний.

Дополнительно в исследовании было рассмотрено влияние геометрических характеристик электродов, таких как форма и площадь поверхности, а также температурных условий. Основываясь на данных из работ [7; 8], провели анализ, выявляющий, как различные параметры электродов сказываются на эффективности ионного обмена. Более того, изучение температурных эффектов и варьирования концентрации ионов проводилось в соответствии с методологией, представленной в исследованиях [9; 10]. Сопоставление полученных данных с теоретическими моделями подтвердило обоснованность выбранных подходов и применяемых методов.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование позволило разработать ряд математических моделей, детально опи-

сывающих механизмы ионного обмена металлов. В основу легла система уравнений, которая включает выражения для потоков ионов (уравнение Нернста – Планка), соотношение для плотности тока и условие электронейтральности, а также взаимосвязь напряжения с электрическим полем. Чтобы упростить задачу и получить аналитическое решение, было принято несколько допущений, среди которых выделяются представление системы как эквивалентного бинарного электролита и рассмотрение стационарного режима. Анализ итоговых уравнений позволил выделить главные параметры, определяющие ход исследуемого процесса.

Полное описание процесса ионного обмена металлов представлено математической моделью, включающей следующую систему уравнений.

Уравнение Нернста – Планка

Диффузия, миграция и конвекция составляют поток ионов J_i . При отсутствии учета конвекции уравнение Нернста – Планка записывается следующим образом:

$$J_i = -D_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} C_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где J_i – плотность потока ионов (моль/(м²·с)), D_i – коэффициент диффузии ионов (м²/с), C_i – концентрация ионов (моль/м³), x – расстояние (м), z_i – заряд иона, F – постоянная Фарадея (96,485 Кл/моль), R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К)), T – абсолютная температура (К), φ – электрический потенциал (В).

Уравнение плотности тока

Общий ток i пропорционален сумме потоков всех ионов:

$$i = F \sum_i z_i J_i. \quad (2)$$

Подставляя уравнение потока ионов в уравнение плотности тока, получаем общую математическую модель.

Полная формула плотности тока

Подставляем полученное уравнение для J_i в уравнение для i :

$$i = F \sum_i z_i \left(-D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Если раскрыть скобки в этом уравнении, получится следующее:

$$i = -F \sum_i z_i D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - F \sum_i z_i \left(\frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Введя обозначения в уравнение, получим следующее:

– диффузионный компонент[^]

$$i_{\text{диффузия}} = -F \sum_i z_i D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (5)$$

– миграционный компонент[^]

$$i_{\text{миграция}} = -F^2 \sum_i z_i^2 \frac{D_i C_i}{RT} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (6)$$

Таким образом, общая плотность тока будет следующей:

$$i = i_{\text{диффузия}} + i_{\text{миграция}} \quad (7)$$

Условие электронейтральности

В ионном растворе общий заряд должен быть электронейтральным:

$$\sum_i z_i C_i = 0 \quad (8)$$

Уравнение баланса массы (стационарное состояние)

$$\frac{dJ_i}{dx} = 0 \Rightarrow J_i = \text{константа} \quad (9)$$

Связь напряжения и электрического поля

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad U = \varphi(0) - \varphi(L) \quad (10)$$

Авторская цель – аналитически решить эту систему уравнений и найти функции $C_i(x)$ и $\varphi(x)$.

Для аналитического решения системы уравнений примем следующие упрощающие предположения:

1. Эквивалентный бинарный электролит:
 - Ионы: катион (z_+) и анион (z_-).
 - Заряды равны по абсолютной величине:

$$|z_+| = |z_-| = z.$$

- Коэффициенты диффузии равны:

$$D_+ = D_- = D.$$

2. Электронейтральность:

$$zC_+ - zC_- = 0 \Rightarrow C_+ = C_- = C.$$

3. Стационарное состояние и отсутствие конвекции:

- Постоянные потоки ионов:

$$dJ_i / dx = 0.$$

- Конвективные потоки отсутствуют.

4. Суммарный массовый поток равен нулю:

$$J_+ + J_- = 0.$$

Решение уравнений

1. Уравнения потока ионов
Для катиона ($z_+ = +z$):

$$J_+ = -D \frac{dC}{dx} - \frac{zF}{RT} DC \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (11)$$

Для аниона ($z_- = -z$):

$$J_- = -D \frac{dC}{dx} + \frac{zF}{RT} DC \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (12)$$

2. Общее уравнение плотности тока

$$\begin{aligned} i &= F(z_+ J_+ + z_- J_-) = \\ &= F(z J_+ - z J_-) = Fz(J_+ - J_-) \end{aligned} \quad (13)$$

3. Суммарный массовый поток равен нулю

$$J_+ + J_- = 0 \Rightarrow J_- = -J_+ \quad (14)$$

4. Выражение для плотности тока

Подставляем $J_- = -J_+$ в уравнение плотности тока:

$$i = Fz(J_+ - (-J_+)) = Fz(2J_+) = 2FzJ_+ \quad (15)$$

Отсюда находится J_+ :

$$J_+ = \frac{i}{2Fz} \quad (16)$$

5. Подстановка потока катиона в уравнение

Подставляем J_+ в уравнение для J_+

$$\frac{i}{2Fz} = -D \frac{dC}{dx} - \frac{zF}{RT} DC \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (17)$$

Учитывая, что суммарный массовый поток равен нулю и концентрация постоянна ($dC/dx = 0$), уравнение упрощается:

$$\frac{i}{2Fz} = -\frac{zF}{RT} DC_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (18)$$

6. Выражение для градиента потенциала

Решаем относительно $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{iRT}{2(Fz)^2 DC_0} \quad (19)$$

Градиент потенциала является константой и не зависит от координаты x .

7. Распределение электрического потенциала

Интегрируем по x :

$$\varphi(x) = -\frac{iRT}{2(Fz)^2 DC_0} x + \varphi_0, \quad (20)$$

где φ_0 – потенциал при $x = 0$.

8. Определение напряжения

Напряжение между электродами U :

$$U = \varphi(0) - \varphi(L) = \frac{iRTL}{2(Fz)^2 DC_0} \quad (21)$$

9. Связь между током и напряжением
Получаем линейную зависимость:

$$U = Ri, \quad (22)$$

где сопротивление R :

$$R = \frac{RTL}{2(Fz)^2 DC_0} \quad (23)$$

Результаты

- Концентрация: $C(x) = C_0$ – постоянная величина.

- Электрический потенциал в рассматриваемой системе может изменяться пропорционально координате x :

$$\varphi(x) = -\frac{iRT}{2(Fz)^2 DC_0} x + \varphi_0 \quad (24)$$

- Напряжение: между током и напряжением существует линейная зависимость:

$$U = \frac{iRTL}{2(Fz)^2 DC_0} \quad (25)$$

Проведённый детальный анализ уравнений, описывающих процессы ионного обмена металлов, позволил выделить ключевые закономерности, существенно углубляющие понимание сложного явления. В рамках данного исследования были сформулированы и обоснованы математические модели, способные с высокой точностью описывать основные аспекты ионного обмена. Анализ показал, что на эффективность процесса существенно влияют такие параметры, как концентрация ионов, диффузионные свойства среды, геометрические характеристики электродов, включая форму и площадь, а также расстояние между ними. Исследование продемонстрировало, что плотность электрического тока находится в линейной зависимости от приложенного напряжения. Этот факт подтверждает справедливость теоретических положений закона Ома и одновременно упрощает задачи оптимизации системы.

На основе полученных данных были сделаны следующие выводы.

1. Геометрия и площадь электродов. Увеличение площади поверхности электродов способствует снижению сопротивления системы, что, в свою очередь, приводит к повышению эффективности ионного

обмена. Равномерное распределение электрического поля в значительной мере зависит от формы и конфигурации электродов. Оптимизация этих параметров открывает новые возможности для повышения производительности промышленных установок.

2. *Влияние температуры.* Повышение температуры электролита приводит к увеличению проводимости, что связано с возрастанием коэффициента диффузии. Однако при достижении определённых критических температур может наблюдаться дестабилизация физико-химических свойств среды, что негативно сказывается на общей эффективности системы. Это подчеркивает необходимость точного контроля температурных условий в технологических процессах.

3. *Концентрация ионов и расстояние между электродами.* Высокая концентрация ионов в электролите положительно влияет на проводимость, в то время как увеличение расстояния между электродами приводит к росту сопротивления, ухудшая эффективность обмена. Эти параметры являются определяющими для разработки более энергоэффективных решений без необходимости сложных модификаций оборудования.

Сформулированные модели подтвердили свою высокую прогностическую ценность при описании стационарных процессов и отсутствия конвективных эффектов. Используя уравнение Нернста – Планка и его производные, удалось получить аналитические зависимости, обеспечивающие детализированное описание поведения системы при различных условиях. Выводы исследования согласуются с результатами предыдущих работ, где значимость геометрических факторов в электролизе была подтверждена эмпирически.

Тем не менее предложенная модель имеет ограничения: не учитывает влияние конвективных потоков и предполагает равенство коэффициентов диффузии для всех ионов, что снижает применимость к более сложным системам. Для решения этих вопросов необходимы дальнейшие исследования, направленные на создание более универсальных моделей, способных учитывать нестационарные и неоднородные условия.

Результаты данной работы предоставляют широкие перспективы для улучшения существующих систем ионного обмена. Они предлагают научно обоснованный подход к выбору параметров, обеспечивая максимальную производительность с минимальными затратами. Внедрение таких моделей на практике может существенно повысить эффективность промышленных процессов, связанных с ионным обменом.

Заключение

Таким образом, разработанные математические модели предоставляют надёжный инструмент для оптимизации и управления процессами ионного обмена металлов. В то же время для более точного описания реальных условий необходимо учитывать динамические изменения, такие как неравномерная концентрация и наличие конвекции. Дальнейшие исследования должны быть направлены на расширение и улучшение существующих моделей, включая применение численных методов для анализа более сложных и динамических систем, что позволит повысить точность и универсальность применения в промышленных и экологических технологиях.

Список литературы

1. Семенов А.Ф., Либерман Е.Ю., Колесников В.А. Обзор современных методов очистки сточных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов // *Успехи в химии и химической технологии.* 2020. № 4 (227). С. 83-85. URL: <https://www.muctr.ru/upload/iblock/d58/d586b1db4ee2913e2d64525f6453c30e.pdf> (дата обращения: 15.11.2024).
2. Пимнева Л.А., Пинигина И.А., Решетова А.А. Извлечение ионов меди, марганца и железа из природных и сточных вод // *Успехи современного естествознания.* 2021. № 2. С. 107–113. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37582> (дата обращения: 15.11.2024). DOI: 10.17513/use.37582.
3. Гасаналиев А.М. Пути практического использования ионных расплавов // *Нанотехнологии: наука и производство.* 2023. № 5. С. 23–26.
4. Montes A., Abeywickrama J., Hoth N., Grimmer M., Drenbenstedt C. Modeling of ion exchange processes to optimize metal removal from complex mine water matrices // *Water.* 2021. Vol. 13(21). P. 3109. DOI: 10.3390/w13213109.
5. Haverkort J. Modeling and experiments of binary electrolytes in the presence of diffusion, migration, and electroosmotic flow // *Physical Review Applied.* 2020. Vol. 14(4). DOI: 10.1103/physrevapplied.14.044047.
6. Ghorbani A., Ghassemi A., Andersen P., Foudazi R. A prediction model of mass transfer through an electro dialysis cell // *Desalination and Water Treatment.* 2016. Vol. 57. P. 22290–22303. DOI: 10.1080/19443994.2015.1123195.
7. Bu S., Huang J., Boyer T., Miller C. An evaluation of solution algorithms and numerical approximation methods for modeling an ion exchange process // *Journal of Computational Physics.* 2010. Vol. 229, № 13. P. 4996–5010. DOI: 10.1016/j.jcp.2010.03.021.
8. Hsu J., Jiang J. Expression for the transport of ions through a spherical ion-exchange membrane // *Journal of Membrane Science.* 1999. Vol. 158. P. 257–267. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00034-4.
9. Janssen M. Curvature affects electrolyte relaxation: Studies of spherical and cylindrical electrodes // *Physical Review.* 2019. Vol. 100, № 4-1. P. 042602. DOI: 10.1103/PhysRevE.100.042602.
10. Ding L. Shear dispersion of multispecies electrolyte solutions in the channel domain // *Journal of Fluid Mechanics.* 2023. Vol. 970. DOI: 10.1017/jfm.2023.626.
11. Tikhonov N., Zagorodni A. Simulation of dual temperature ion-exchange separation process taking into account complex formation in solution // *Separation Science and Technology.* 1998. Vol. 33. P. 633–653. DOI: 10.1080/01496399808544780.
12. Натареев С.В., Ларина А.И. Ионообменная очистка воды в аппарате с прямоточным движением ионита и раствора // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* 2024. № 3 (79). С. 82-86. DOI: 10.6060/snt.20247903.00013.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ДЛЯ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ

Золотухина Д.Ю.

*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж,
e-mail: dar.zolott@gmail.com*

Цель работы заключается в разработке и оценке алгоритма адаптивного планирования задач для систем с ограниченными вычислительными ресурсами. Алгоритм реализован на языке Java и учитывает приоритет, дедлайн и доступные ресурсы для распределения задач. В ходе работы были смоделированы сценарии с различной степенью нагрузки, а для оценки производительности алгоритма фиксировались метрики завершения задач в срок, использования ресурсов и обработки проблемных задач. Результаты показали, что алгоритм способен эффективно адаптироваться к изменениям нагрузки и ограничений, поддерживая высокий уровень завершения задач в срок и минимизируя перегрузку ресурсов. Сравнение с популярными технологиями, такими как Round-Robin, Earliest Deadline First и Priority Scheduling, продемонстрировало уникальные преимущества предложенного подхода, заключающиеся в учёте адаптации к ресурсам и комплексной обработке задач. Выводы исследования подтверждают, что разработанный алгоритм обеспечивает баланс между производительностью и эффективным использованием ресурсов в системах с ограничениями. Он может быть использован в различных областях, включая облачные вычисления, робототехнику и системы реального времени. Дальнейшая оптимизация алгоритма предполагает разработку механизмов для обработки проблемных задач и интеграцию с распределёнными системами.

Ключевые слова: адаптивное планирование задач, ограниченные вычислительные ресурсы, распределение задач, высоконагруженные системы, управление ресурсами

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE TASK SCHEDULING ALGORITHM FOR SYSTEMS WITH LIMITED COMPUTATIONAL RESOURCES

Zolotukhina D.Yu.

Voronezh State University, Voronezh, e-mail: dar.zolott@gmail.com

The purpose of this study is the development and evaluation of an adaptive task scheduling algorithm for systems with limited computational resources. The algorithm, implemented in Java, considers priority, deadlines, and available resources for task allocation. Scenarios with varying levels of load were simulated, and the algorithm's performance was assessed using metrics such as task completion within deadlines, resource utilization, and handling problematic tasks. The results demonstrated that the algorithm effectively adapts to changes in load and resource constraints, maintaining a high rate of task completion within deadlines and minimizing resource overload. A comparison with popular scheduling technologies such as Round-Robin, Earliest Deadline First, and Priority Scheduling revealed the unique advantages of the proposed approach, including resource adaptation and comprehensive task handling. The findings confirm that the developed algorithm achieves a balance between performance and efficient resource utilization in constrained systems. It can be applied in various domains, including cloud computing, robotics, and real-time systems. Further optimization of the algorithm is envisioned to include mechanisms for handling problematic tasks and integration with distributed systems.

Keywords: adaptive task scheduling, limited computational resources, task allocation, high-load systems, resource management

Введение

Управление задачами в системах с ограниченными вычислительными ресурсами представляет собой сложную и актуальную проблему для современных высоконагруженных приложений. Такие системы, как распределённые вычислительные платформы, системы реального времени и облачные инфраструктуры, требуют эффективно распределения ресурсов для обеспечения высокой производительности и минимизации задержек. Одним из ключевых аспектов является адаптивное планирование задач, позволяющее учитывать ограничения по памяти, процессорным ресурсам, дедлайнам и приоритетам.

Примеры применения таких подходов включают системы реального времени, такие как обработка видео- или аудиопотоков, где критически важно выполнять задачи с минимальными задержками. Облачные вычисления являются ещё одной областью, где распределение ресурсов между виртуальными машинами или контейнерами требует сложного планирования для оптимизации использования ограниченной памяти и процессорного времени [1]. В интернет-сервисах, обрабатывающих большое количество запросов пользователей, например в системах рекомендаций или аналитики, эффективное управление задачами позволяет избежать перегрузок и улучшить отклик системы. Так-

же адаптивное планирование находит применение в робототехнике, где необходимо учитывать энергопотребление, пропускную способность вычислительных модулей и приоритет выполнения критических операций.

Целью данного исследования является разработка и оценка эффективности алгоритма адаптивного планирования задач, способного учитывать дедлайны, приоритеты задач и текущее состояние ресурсов. Предложенный алгоритм предназначен для использования в высоконагруженных системах, где важна гибкость и способность к динамической адаптации в условиях изменения требований и доступных ресурсов.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования был разработан алгоритм адаптивного планирования задач, предназначенный для систем с ограниченными вычислительными ресурсами. Алгоритм реализован на языке Java версии OpenJDK 17, что обеспечило использование современных возможностей

для работы с многопоточностью и управления ресурсами. Имитация ограниченной среды была выполнена путем искусственного ограничения доступных вычислительных ресурсов, включая процессорное время и оперативную память.

Тестовая программа была модульным приложением, состоящим из компонентов для генерации задач, управления их выполнением и сбора данных о производительности алгоритма. Задачи представляли собой программные сущности, моделирующие типовые нагрузки. Каждая задача характеризовалась следующими параметрами: приоритет (высокий, средний, низкий), время выполнения, объем памяти и дедлайн. Задачи генерировались случайным образом, что обеспечивало разнообразие условий тестирования. Например, критические задачи имели жесткие дедлайны и малое время выполнения, в то время как фоновые задачи допускали длительные задержки и низкий приоритет выполнения.

Пример реализации класса задачи:

```
public class Task {
    private int priority; // Приоритет задачи: высокий, средний, низкий
    private long executionTime; // Время выполнения задачи в миллисекундах
    private int memoryUsage; // Потребление памяти в килобайтах
    private long deadline; // Дедлайн выполнения задачи

    // Конструктор
    // Геттеры и сеттеры
}
```

Генерация задач выполнялась с использованием библиотеки Random и представляла собой последовательный процесс формирования очередей задач различных типов. Все задачи сохранялись в приоритетных очередях, реализованных с помощью структуры данных PriorityQueue. Это позволило алгоритму динамически адаптировать стратегию выполнения в зависимости от текущей нагрузки.

Алгоритм планирования задач был разработан для динамического распределения ограниченных ресурсов с учетом следующих правил:

1. Инициализация: все задачи при создании добавляются в приоритетную очередь, отсортированную по дедлайнам и приоритетам. В начале работы алгоритм анализирует доступные ресурсы (оперативная память и процессорное время) и определяет текущие ограничения.

2. Выбор задачи для выполнения: задача извлекается из очереди в порядке приоритета – сначала задачи с высоким приоритетом, затем средним и наконец низким. Если доступных ресурсов недостаточно для выпол-

нения задачи (например, не хватает памяти или процессорных ресурсов), алгоритм переходит к следующей задаче. Если задача превышает дедлайн, она перемещается в отдельный список «проблемных задач» для дальнейшего анализа.

3. Выполнение задачи: после успешного выбора задачи происходит выделение ресурсов для её выполнения. В процессе выполнения контролируются текущие ресурсы. Если ресурсы исчерпаны, выполнение низкоприоритетных задач приостанавливается.

4. Адаптация параметров: каждые 10 секунд анализируются текущие метрики (уровень загрузки CPU, объем используемой памяти, количество задач в очереди). Если выявляется критический недостаток ресурсов, алгоритм увеличивает доступность памяти за счет ограничения количества активных задач низкого приоритета. Если ресурсы используются менее чем на 70%, алгоритм увеличивает число одновременно выполняемых задач, включая задачи низкого приоритета.

5. Обработка неудачных сценариев: если задача не может быть выполнена даже при

адаптации параметров, она перемещается в список «проблемных задач». Эти задачи могут быть выполнены вручную или перераспределены в другой момент времени.

6. Завершение работы: алгоритм завершает выполнение всех оставшихся задач, когда очередь становится пустой или при достижении заданного времени выполнения эксперимента.

Для имитации ограниченной вычислительной среды использовались настройки JVM, включавшие ограничение максимального объема оперативной памяти (-Xmx2G) и минимального (-Xms2G), а также настройка числа потоков, доступных для выполнения задач. Эти параметры обеспечивали воспроизводимость условий тестирования и моделировали реальные ограничения, характерные для высоконагруженных систем, включая ограниченное количество вычислительных ресурсов, высокую интенсивность входящих запросов, необходимость соблюдения жёстких временных ограничений и обеспечение устойчивости при пиковой нагрузке [2].

Программа была протестирована в трех сценариях: низкая нагрузка (50 задач, доступная память 1 GB), средняя нагруз-

ка (500 задач, доступная память 500 MB) и высокая нагрузка (5000 задач, доступная память 200 MB). Каждый сценарий предусматривал различные комбинации типов задач с учетом их дедлайнов, приоритетов и времени выполнения. Для минимизации влияния случайных факторов каждый эксперимент повторялся десять раз, а результаты усреднялись.

Блок-схема работы алгоритма изображена на рисунке 1.

Метрики измерения включали:

- процент завершённых задач в дедлайн;
- среднее время выполнения задачи;
- пиковое и среднее использование оперативной памяти;
- уровень использования процессора;
- количество задач, перемещённых в список проблемных.

Мониторинг производительности осуществлялся с использованием встроенных средств Java, таких как System.nanoTime() для измерения времени выполнения задач и Runtime.getRuntime() для анализа потребления памяти. Также использовались сторонние инструменты, включая VisualVM [3] и Java Flight Recorder [4], для детального анализа характеристик работы программы.

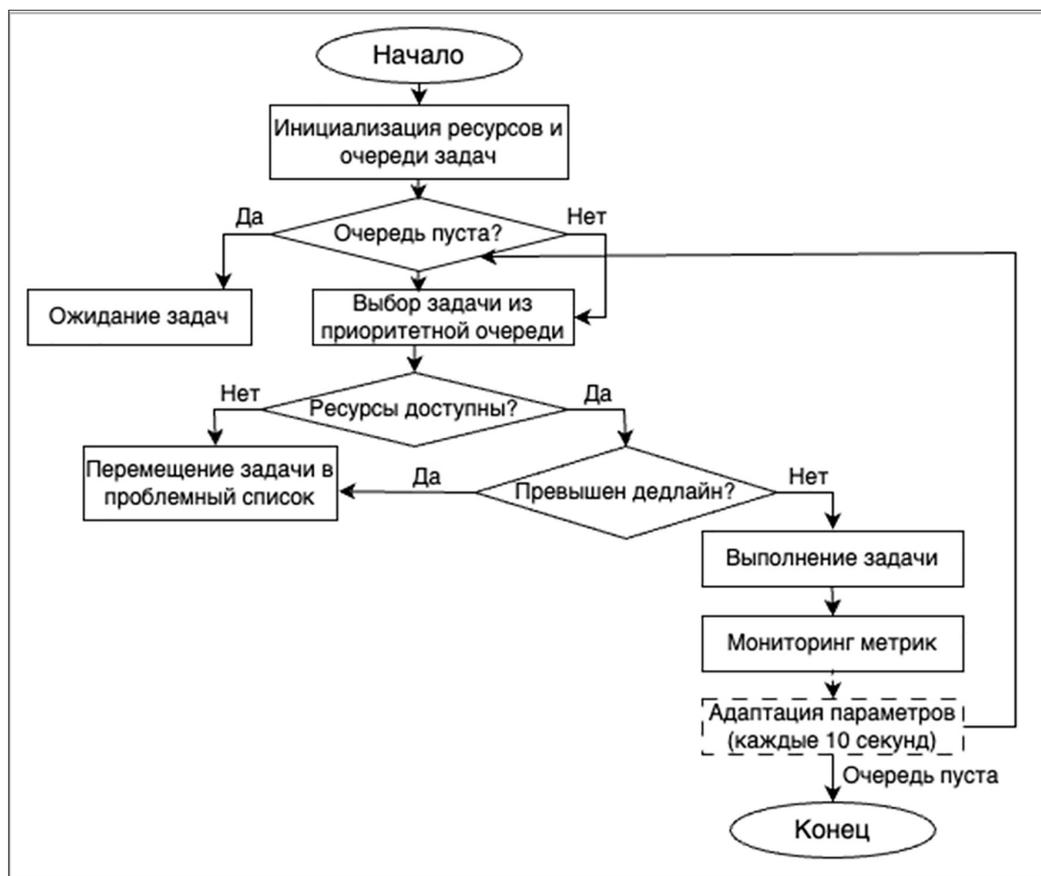


Рис. 1. Схема работы алгоритма

Таким образом, разработанный алгоритм включал гибкие адаптационные механизмы и учитывал специфику задач с ограниченными ресурсами, что позволило обеспечить их выполнение с минимальными затратами и максимальной эффективностью.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования представлены в таблице, которая включает основные метрики эффективности работы разработанного алгоритма в условиях низкой, средней и высокой нагрузки. Анализ данных таблицы позволяет выявить ключевые закономерности и особенности работы алгоритма в различных условиях.

В условиях низкой нагрузки алгоритм продемонстрировал максимальную эффективность, когда 100% задач были заверше-

ны в рамках заданного дедлайна, а среднее время выполнения одной задачи составило 12 мс. Пиковое использование памяти в этих условиях составило 850 МВ, при среднем значении 640 МВ. Уровень загрузки процессора оказался минимальным – 45%, что подтверждает оптимальное распределение ресурсов.

Во время средней нагрузки эффективность алгоритма несколько снизилась: 98% задач были выполнены в рамках дедлайна, а среднее время выполнения одной задачи возросло до 35 мс. Пиковое использование памяти уменьшилось до 460 МВ, что связано с увеличением числа задач и перераспределением ресурсов. Уровень загрузки CPU достиг 70%, а число задач, перемещённых в список проблемных, составило 9. Это указывает на устойчивую работу алгоритма в условиях увеличенной нагрузки.

Результаты работы алгоритма в условиях различных нагрузок

Тип нагрузки	% завершённых задач в дедлайн	Среднее время выполнения задачи (мс)	Пиковое использование памяти (МВ)	Среднее использование памяти (МВ)	Уровень загрузки CPU (%)	Число проблемных задач
Низкая	100	12	850	640	45	0
Средняя	98	35	460	320	70	9
Высокая	95	95	180	140	85	210

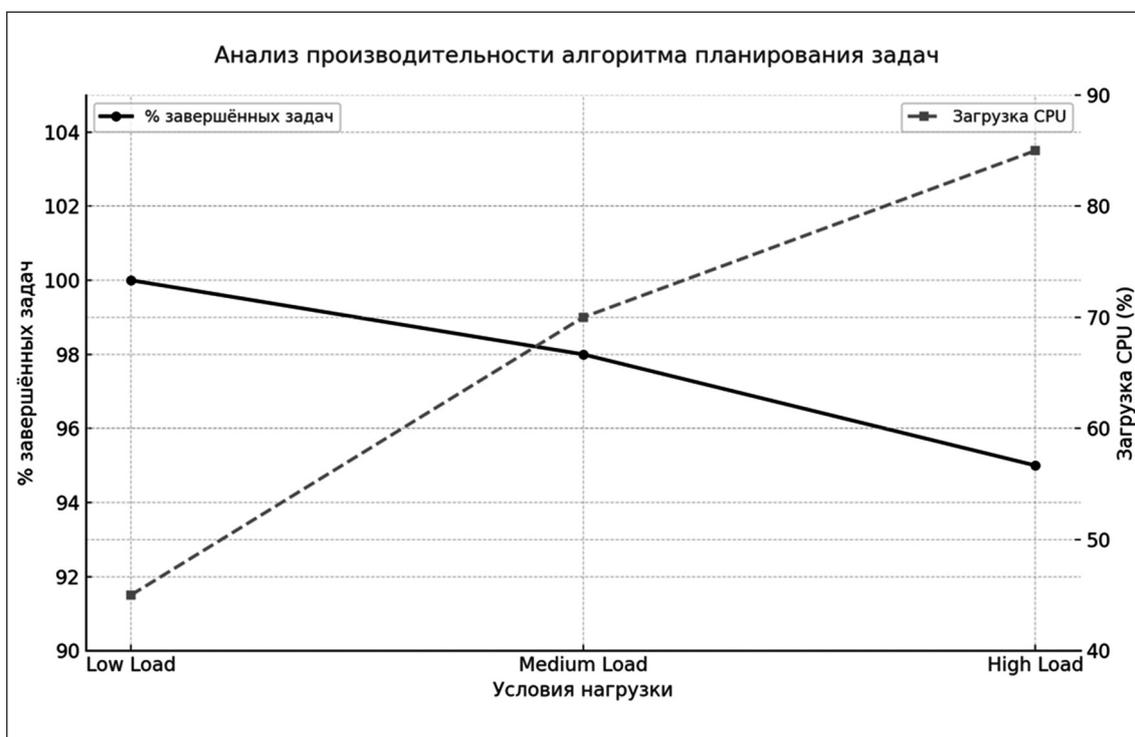


Рис. 2. График производительности алгоритма

При высокой нагрузке алгоритм сохранил приемлемую производительность, хотя доля задач, выполненных в рамках дедлайна, снизилась до 95%. Среднее время выполнения одной задачи увеличилось до 95 мс, что обусловлено перераспределением ресурсов в пользу задач с более высоким приоритетом. Пиковое использование памяти снизилось до 180 МВ, а среднее – до 140 МВ, что указывает на активное использование адаптивных механизмов алгоритма. Однако количество проблемных задач значительно возросло и составило 210, что связано с тем, что ресурсы системы становятся предельно ограниченными и алгоритм вынужден перемещать задачи с высоким потреблением ресурсов в список проблемных. Анализ уровня загрузки CPU показал его закономерное увеличение от 45% при низкой нагрузке до 85% при высокой, что свидетельствует о том, что алгоритм эффективно использует доступные вычислительные ресурсы, минимизируя их простаивание.

На рисунке 2 представлена зависимость процента задач, завершённых в дедлайн, от уровня загрузки CPU при различных сценариях нагрузки. График демонстрирует способность алгоритма к адаптации. На этапе низкой нагрузки алгоритм демонстрирует баланс между высокой эффективностью выполнения задач и минимальным использованием ресурсов. Средняя нагрузка иллюстрирует переходный этап, когда алгоритм перераспределяет ресурсы для поддержания высокого процента завершённых задач (98%) при возросшей загрузке CPU (70%). Высокая нагрузка подчёркивает ограничения системы: алгоритм сохраняет удовлетворительные показатели выполнения задач (95%), но достигает пикового использования ресурсов (85% загрузки CPU), что сопровождается ростом количества задач в списке проблемных.

Сравнение с популярными технологиями управления задачами, такими как Round-Robin, Earliest Deadline First (EDF) и Priority Scheduling, подчёркивает уникальность предложенного алгоритма. Round-Robin обеспечивает равномерное распределение процессорного времени, но не учитывает дедлайны и приоритеты, что делает его непригодным для систем с ограниченными ресурсами [5]. Earliest Deadline First (EDF) фокусируется на дедлайнах, однако игнорирует приоритеты и текущее состояние ресурсов, что ограничивает его применимость в сложных сценариях [6]. Priority Scheduling, в свою очередь, ориентируется только на приоритеты задач, не обращая внимания на дедлайны и адаптацию к ресурсам [7]. В отличие от них предложенный

алгоритм комплексно учитывает дедлайны, приоритеты и текущее состояние ресурсов, что делает его гибким инструментом для управления задачами в высоконагруженных системах с ограничениями.

Заключение

Проведённое исследование продемонстрировало, что разработанный алгоритм адаптивного планирования задач обладает уникальными свойствами, которые делают его эффективным инструментом для управления задачами в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Алгоритм показал высокую гибкость и адаптивность, позволяя учитывать текущие ограничения памяти и процессорного времени, а также приоритеты и дедлайны задач. Такой подход обеспечивает баланс между производительностью и эффективным использованием ресурсов, что особенно важно для высоконагруженных систем.

Анализ работы алгоритма показал его способность поддерживать высокий уровень завершения задач в рамках дедлайна даже при увеличении нагрузки. Это стало возможным благодаря интеграции адаптивных механизмов, которые позволяют динамически изменять параметры выполнения задач в зависимости от текущей ситуации. В условиях низкой нагрузки алгоритм обеспечивает оптимальное распределение ресурсов, минимизируя задержки и снижая нагрузку на процессор. При увеличении нагрузки алгоритм демонстрирует устойчивость, перераспределяя ресурсы и поддерживая выполнение приоритетных задач в рамках дедлайнов.

Основное преимущество алгоритма заключается в его комплексном подходе, который сочетает учёт дедлайнов, приоритетов задач и адаптацию к текущему состоянию системы. Это делает его значительно более гибким и универсальным по сравнению с существующими технологиями, такими как Round-Robin, Earliest Deadline First и Priority Scheduling, которые либо не учитывают дедлайны, либо не адаптируются к текущим ограничениям ресурсов. Разработанный алгоритм также справляется с обработкой задач, которые в других подходах могли бы оставаться невыполненными.

Вместе с тем исследование выявило и ограничения алгоритма, связанные с увеличением числа проблемных задач при высокой нагрузке. Это подчёркивает необходимость дальнейшего улучшения алгоритма, включая разработку механизмов для более эффективной обработки задач, перемещённых в список проблемных. Будущие исследования могут быть направлены на интеграцию алгоритма с облачными решениями

для масштабирования ресурсов, что позволит снизить влияние ограничений вычислительных мощностей.

Таким образом, разработанный алгоритм демонстрирует значительный потенциал для применения в высоконагруженных системах, таких как облачные вычисления, системы реального времени и распределённые платформы. Его использование может существенно повысить эффективность управления задачами и улучшить общую производительность систем с ограниченными ресурсами.

Список литературы

1. Рубашенков А.М., Бобров А.В. Облачные вычисления // *Academy*. 2018. № 6(33). С. 33-36.
2. Филисов Д.А. Архитектура высоконагруженных приложений // *Universum: технические науки*. 2023. №10-1 (115). С. 49-53. DOI: 10.32743/UniTech.2023.115.10.16138.
3. Java VisualVM documentation. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/technotes/guides/visualvm> (дата обращения: 20.11.2024).
4. About Java Flight Recorder. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.oracle.com/javacomponents/jmc-5-4/jfr-runtime-guide/about.htm> (дата обращения: 20.11.2024).
5. Шуляк А.В. Сравнительный анализ алгоритмов балансировки нагрузки в среде облачных вычислений // *Научный журнал*. 2021. № 6 (61). С. 6-11.
6. Verma C., Stoffová V., Illés Z. Rate-monotonic vs early deadline first scheduling: A review // *Proceeding of Education Technology-Computer science in building better future*. 2018. P. 188-193.
7. Alistarh D., Kopinsky J., Li J.Z., Nadiradze G. The power of choice in priority scheduling // *Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 2017. P. 283-292. DOI: 10.1145/3087801.3087810.

СТАТЬИ

УДК 620.91

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ****Крайнов К.Р., Кротков Е.А.***ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,
e-mail: kraynov-2002@inbox.ru, krotkov.e.a@gmail.com*

Статья посвящена актуальной проблеме энергообеспечения изолированных предприятий нефтедобычи, которые не имеют доступа к централизованным электрическим сетям. Целью работы является анализ целесообразности применения ветроэнергетических установок средней мощности как альтернативного источника энергии для таких объектов. Рассмотрены основные характеристики ветрогенераторов средней мощности, их преимущества и особенности, включая относительно невысокую стоимость, простоту транспортировки и монтажа, а также возможность эффективной эксплуатации в условиях удаленных месторождений. На примере автономной системы электроснабжения нефтедобывающего предприятия показаны принципы интеграции ветрогенераторов в существующую энергетическую инфраструктуру. Особое внимание уделено синтезу ветроэнергетических установок с традиционными источниками энергии, такими как газотурбинные установки, что позволяет повысить надежность энергоснабжения и оптимизировать топливное потребление. Выявлено, что использование ветроэнергетических установок средней мощности в сочетании с традиционной генерацией позволяет не только снизить затраты на топливо и эксплуатацию, но и минимизировать вредное воздействие на окружающую среду. Сделан вывод о значительных экономических и экологических выгодах внедрения ветроэнергетических установок, что делает их перспективным решением для энергообеспечения изолированных объектов нефтедобычи.

Ключевые слова: энергетика, возобновляемые источники энергии, энергообеспечение, электроснабжение нефтегазовых месторождений, ветроэнергетические установки средней мощности, электростанции собственных нужд, резервирование мощности

**APPLICATION OF WIND POWER PLANTS IN AUTONOMOUS
POWER SUPPLY SYSTEMS OF OIL FIELDS****Krainov K.R., Krotkov E.A.***Samara State Technical University, Samara,
e-mail: kraynov-2002@inbox.ru, krotkov.e.a@gmail.com*

The article is devoted to the urgent problem of energy supply to isolated oil producing enterprises that do not have access to centralized electric networks. The purpose of the work is to analyze the feasibility of using medium-capacity wind farms as an alternative energy source for such facilities. The main characteristics of medium-power wind turbines, their advantages and features, including relatively low cost, ease of transportation and installation, as well as the possibility of efficient operation in remote fields, are considered. Using the example of an autonomous power supply system of an oil-producing enterprise, the principles of integrating wind turbines into the existing energy infrastructure are shown. Special attention is paid to the synthesis of wind turbines with traditional energy sources, such as gas turbine installations, which makes it possible to increase the reliability of energy supply and optimize fuel consumption. As a result, it turned out that the use of medium-power wind turbines in combination with traditional generation allows not only to reduce fuel and operating costs, but also to minimize the harmful effects on the environment. The conclusion is made about the significant economic and environmental advantages of the introduction of wind farms, which makes them a promising solution for the energy supply of isolated oil production facilities.

Keywords: energy, renewable energy sources, energy supply, electricity supply of oil and gas fields, wind power plants of medium capacity, power plants for own needs, power redundancy

Введение

Развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в современной России становится все заметнее. Каждый год правительство РФ утверждает строительство новых крупных электростанций на базе ВИЭ [1]. Активнее всех в данном секторе энергетики развивается ветроэнергетика [2, 3]. Строительство новых сетевых ветроэлектростанций (ВЭС) планируется все в большем числе регионов России. Также стремительно совершенствуется конструкция ветроустано-

вок (ВЭУ). Промышленные компании КНР освоили выпуск ветроустановки единичной мощностью 18 МВт [4]. В России компания «Силовые машины» планирует к 2027 году начать серийный выпуск установок мощностью 5,3 МВт, в то время как подразделение РОСАТОМа «ВЕТРООГК» производит ветроустановки и эксплуатирует крупные ВЭС в российских регионах [5]. Все это говорит о ветроэнергетике как о стремительно развивающейся отрасли российской энергетики [6, 7]. Однако данные проекты

не получили бы такого развития без значительной финансовой поддержки со стороны государства, ведь, как известно, крупные ВЭС являются дорогостоящими и на строительство нового ветропарка, например общей установленной мощностью порядка 200 МВт, выделяют десятки миллиардов рублей [8]. Такие финансовые затраты не позволяют реализовывать подобные проекты негосударственным компаниям, поскольку они просто не окупятся. В данной работе будут рассмотрены ветроустановки установленной мощностью 200–500 кВт [9], которые широко выпускаются промышленными компаниями разных стран.

Цель исследования – анализ возможности применения ветроустановок установленной мощностью 200–500 кВт в автономных системах электроснабжения, изолированных от энергосистемы.

Материалы и методы исследования

Производство ветроустановок средней мощности развивается в России не так стремительно, как в странах Европы, поскольку там экологическая ситуация регламентируется гораздо жестче [10]. Крупными произ-

водителями ветроустановок средней мощности в Европе являются компании Wind Energy Solutions (Нидерланды) и Vergnet (Франция). Их ветроустановки обладают рядом интересных свойств. В качестве примера рассмотрим ветроустановку модели GEV MP компании Vergnet установленной мощностью 275 кВт (рис. 1) [9], которая имеет высоту башни 60 м, вес всей ветроустановки составляет около 20 т. Данная модель ветроустановки требует наличия фундамента объемом около 15 м³ и отличается простотой сборки: компоненты ветроустановки могут быть собраны на месте установки с использованием только вилочного погрузчика, при этом автомобильный подъемный кран не требуется; затем ветроустановка поднимается в рабочее положение с помощью встроенной гидравлической лебедки. Применение в конструкции ВЭУ двухлопастного ротора упростило проведение регламентных работ по техническому обслуживанию генератора и лопастей, в частности для этого потребуются усилия лишь двух человек, которые с помощью лебедки легко и безопасно опустят ветроустановку на землю примерно за 1 час.



Рис. 1. Ветроустановка модели GEV MP [9]

Важным преимуществом модели GEV MP является также возможность быстрой доставки – вся конструкция помещается в пяти стандартных 13-метровых контейнерах, которые можно доставить при помощи грузовой автомашины [9]. Стоит отметить наиболее значимые особенности, помимо удобства транспортировки, монтажа и обслуживания.

Во-первых, в данной модели ветроустановки используется асинхронный генератор промышленной частоты 50 Гц, поэтому в комплекте отсутствует дорогостоящий инвертор. Включение ветроустановки с асинхронным генератором в автономную систему электроснабжения с наличием основной генерации, построенной на базе газопоршневых двигателей, не будет вызывать недопустимых электромеханических переходных процессов.

Во-вторых, наличие в комплекте ветроустановки конденсаторной батареи позволяет обеспечить значение коэффициента мощности асинхронного генератора, равного 1, т.е. ВЭУ не будет выдавать (потреблять) реактивную мощность в электрическую сеть.

В-третьих, ветроустановка модели GEV MP имеет относительно небольшую стоимость, что обусловлено компактной конструкцией и отсутствием инвертора.

Очевидно, что использование ветроустановки модели GEV MP на удаленных энергообъектах может оказаться выгодным решением. Ветроустановки средней мощности уже применяются в системах электроснабжения удаленных объектов России, например на Дальнем Востоке, где присутствует стабильный сильный ветер [11]. Оценим возможности применения подобных ветроустановок в авто-

номной системе электроснабжения нефтепромысла.

Результаты исследования и их обсуждение

Освоение крупного месторождения нефти, как правило, происходит поэтапно. В связи с этим в электрической сети нефтепромысла предусмотрен поочередный ввод новых электрических нагрузок.

Предположим, что существует электрическая сеть напряжением 6 кВ автономной системы электроснабжения нефтепромысла с наличием электростанции собственных нужд (ЭСН), работающей на попутном газе. В электрической сети имеются 12 потребителей в виде кустовых площадок (КП); 4 из которых на напряжение 10 кВ, остальные – на 8–6 кВ. Каждая кустовая площадка потребляет 4 МВт активной мощности и 2,2 МВт реактивной мощности. Таким образом, общее потребление активной мощности на месторождении нефти составит 48 МВт. Каждая ЭСН состоит из 6 машин установленной мощностью 6 МВт, т.е. установленная мощность всех генераторов составит 72 МВт (рис. 2). Резерв генерации обеспечивает критерий резервирования «N-2», т.е. одна генерирующая машина находится в «холодном» резерве (полностью отключена), а на остальных генераторах обеспечивается «вращающийся» резерв в объеме еще одной машины. Таким способом формируется электрическая сеть, в которой обеспечивается полное покрытие необходимой нагрузки и выполняется критерий резервирования. Предположим, что в сети месторождения прогнозируется увеличение нагрузки потребителей на 18 МВт, т.е. общее потребление составит 66 МВт.

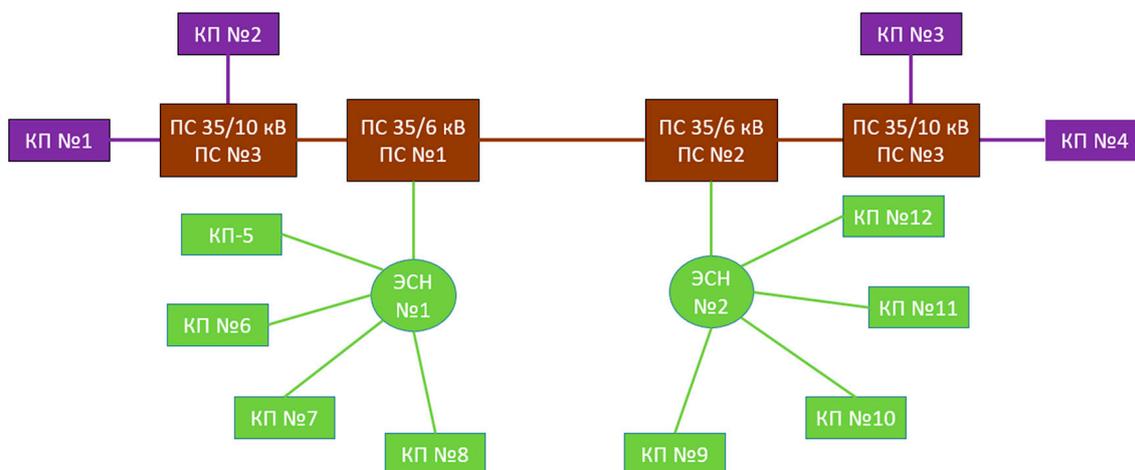


Рис. 2. Структурная схема автономного электроснабжения потребителей нефтедобычи
Источник: составлено авторами

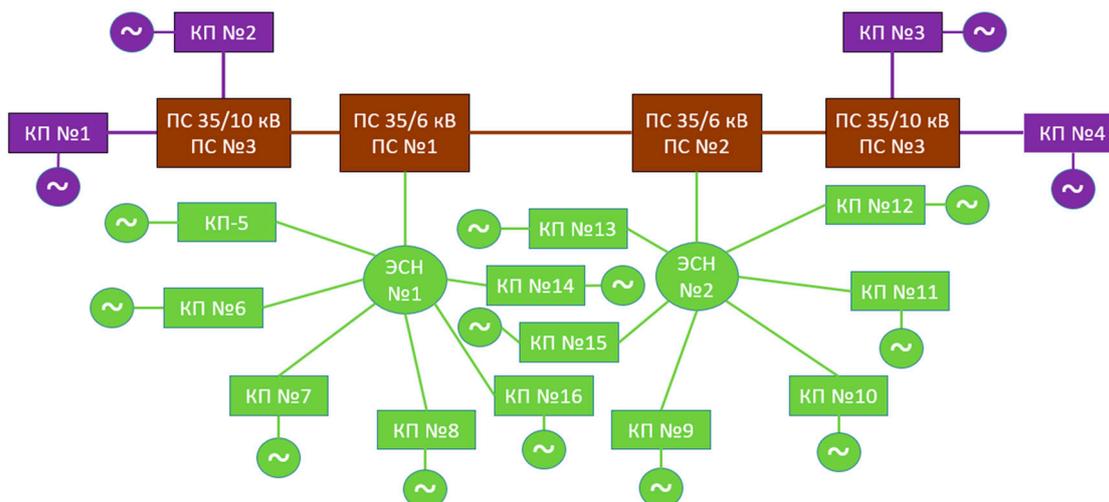


Рис. 3. Структурная схема перспективной автономной системы электроснабжения потребителей нефтедобычи с использованием ВЭУ
Источник: составлено авторами

При такой ситуации мощности установленных генераторов ЭСН будет недостаточно для обеспечения критерия резервирования, ведь с его учетом максимально возможная генерация на станциях составляет 60 МВт – не хватает еще 6 МВт. Вариант выхода из сложившейся ситуации является традиционным – расширение действующей электростанции: ввод еще одного генератора мощностью 6 МВт на одну из ЭСН.

Рассмотрим альтернативный вариант. Предположим, что недостающие 6 МВт генерации можно получить при помощи ветроустановок средней мощности.

Для определения их числа нельзя отталкиваться от их установленной мощности, поскольку такую мощность они выдают в сеть при самых благоприятных условиях – стабильном сильном ветре. Например, ветроустановка модели GEV MP с установленной мощностью 275 кВт выдает 275 кВт при скорости ветра 12–25 м/с. Измеренные метеостанцией скорости ветра в регионе, как правило, замеряются флюгером, который расположен на высоте 10 м над землей, а значит, его показания неактуальны. Необходимо пересчитать скорость ветра на высоту башни ВЭУ. Существуют различные методики того, как это можно сделать, но одной из наиболее популярных и ранних является методика В.Ю. Милевского [12, 13]:

$$V_h = K_p \cdot V_0 \cdot \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^m, \text{ м/с}$$

где V_0 – скорость ветра, измеренная вблизи земной поверхности на высоте h_0 (высота флюгера – 10 м);

h_1 – высота башни, м;
 m – показатель степени для слоя атмосферы;

K_p – коэффициент, учитывающий рельеф местности:

$$K_p = K_A / K_{MC}$$

где K_A – фактический класс открытости местности в баллах масштаба открытости;

K_{MC} – класс открытости опорной метеостанции.

После пересчета скорости ветра на высоту башни определим число ВЭУ исходя из той активной мощности, которую они будут генерировать при рассчитанной скорости ветра.

Исходя из среднего коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) для ВЭУ, который равен, как правило, 32–33%, примем, что с учетом скорости ветра рассматриваемая модель ВЭУ будет выдавать на высоте башни (50–60 м) около 90 кВт активной мощности, а значит, для реализации 6 МВт потребуются $6000/90=66,67$ – 67 ветроустановок. Немало, однако, учитывая простоту сборки и доставки, вполне допустимо.

Основная выгода от использования ВЭУ на нефтепромысле заключается именно в территориальном распределении этой генерации по объектам нефтепромысла.

Ветроустановки будут подключаться в электрическую сеть 0,4 кВ в непосредственной близости от потребителей электроэнергии, тем самым как минимизируя потери активной мощности в системе электроснабжения, так и снижая общую электрическую нагрузку ВЛ 6–10 кВ.

Подключение ветроустановки осуществляется отпайкой к ВЛ 0,4 кВ, питающей потребителя (рис. 3). Важно понимать, что практически все модели ветроустановок на выводах ветрогенератора имеют 0,4–0,69 кВ, а значит, придется повышать напряжение до уровня приемной сети. Потребуется трансформаторная подстанция (ТП) для каждой ВЭУ, и, поскольку ВЭУ разнесены по всей территории месторождения, объединить их для подключения нескольких ВЭУ к одной ТП не получится, поэтому придется прокладывать слишком длинный кабель до подстанции, а на напряжении 0,4 кВ потери мощности в нем будут слишком большими [14]. Тем не менее, это все еще может оказаться выгоднее увеличения мощности ЭСН.

Очевидно, что рост нагрузки потребителей нефтепромысла способствует нагрузке ЭСН до максимального режима и может привести к необходимости реконструкции электрической сети: увеличению сечения ВЛ 6–10 кВ. В случае применения распределенной генерации, возможно, этого удастся избежать или, как минимум, снизить объемы реконструкции, поскольку сетевые элементы в данном случае будут менее загружены.

Заключение

Возобновляемые источники энергии на сегодняшний день остаются дорогостоящими техническими устройствами, и их применение в системах электроснабжения в большинстве случаев нецелесообразно. Однако в автономных системах электроснабжения применение ВЭУ средней мощности в синергии с традиционными источниками энергии представляет собой энергоэффективное решение. Относительно невысокая стоимость таких ветроустановок делает их доступными для большего числа промышленных потребителей. Удобство монтажа и эксплуатации позволяет сократить время на установку и минимизировать затраты на обслуживание. Простота транспортировки существенно облегчает логистику в труднодоступной местности.

В целом, можно сказать, что ветроустановки средней мощности являются перспективным инструментом для развития устойчивой электроэнергетики, обеспечивая экономические и экологические выгоды. Также важно понимать, что установленный срок службы ветроустановки

в 20 лет может быть продлен после замены изношенных деталей.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2024 № 3074-р «О внесении изменений в распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 1634-р». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1310022704> (дата обращения: 18.01.2025).
2. Никифоров О. Ветровая энергетика России переживает второе рождение // Независимая газета. 2023. 10 апреля. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ng.ru/ng_energiya/2023-04-10/9_8702_energetics.html?ysclid=m3qv43a43j804815448 (дата обращения: 18.01.2025).
3. Первый зеленый гигаватт. Росатом вышел в лидеры по объемам запуска ветряных электростанций // Газета Коммерсантъ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6350608> (дата обращения: 18.01.2025).
4. ТЭК России. Главный технологический прорыв Китая // ЦДУ ТЭК. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2024/7/1288/?ysclid=m3qv9h8e1649179169 (дата обращения: 18.01.2025).
5. Силовые машины планируют в 2027 году начать выпуск ветроустановок // ТАСС. [Электронный ресурс]. URL: https://tass.ru/ekonomika/21952539?utm_source=rfinance (дата обращения: 18.01.2025).
6. Алексина Е.В. Основные аспекты ветроэнергетики // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 12-2. С. 8-12.
7. Безруких П.П. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // Вестник аграрной науки Дона. 2015. № 1(29). С. 5-17.
8. Стоимость строительства ветряной электростанции // ESFC Investment Group. [Электронный ресурс]. URL: <https://esfccompany.com/articles/vetroenergetika/stoimost-stroitelstva-vetryanoy-elektrostantsii/> (дата обращения: 18.01.2025).
9. Ветроустановка модели GEV MP [Электронный ресурс]. URL: https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaisancedesenergies.org/files/pdf-actualites/dc-11-00-01-fr_gev_mp-c_275_kw.pdf (дата обращения: 18.01.2025).
10. Парижское соглашение от 12 декабря 2015 года. [Электронный ресурс]. URL: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (дата обращения: 18.01.2025).
11. РАО ЭС Востока. Открываем ветряки на острове Беринга // Газета EastRussia. 2013. 08 декабря. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eastrussia.ru/material/otkryvaem_vetryaki_na_ostrove_beringa/?ysclid=m3s8sa24zi774854012 (дата обращения: 18.01.2025).
12. Елистратов В.В., Кузнецов М.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ч.1. Определение ветроэнергетических ресурсов региона: Метод. указания. СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. 2003. 55 с. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/13059/36231.pdf> (дата обращения: 18.01.2025).
13. Рылов А.Б. Ветроэнергетический потенциал на различных высотах приземного слоя атмосферы на Юго-Востоке европейской территории России // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2014. Т. 14. Вып. 1. С. 30-37. DOI: 10.18500/1819-7663-2014-14-1-30-37.
14. Серебряков Р.А., Доржиев С.С., Базарова Е.Г. Современное состояние, проблемы и перспективы развития ветроэнергетики // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 10-1. С. 95-102.

УДК 629.7.05

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДОЧНОГО МОДУЛЯ С БЕСПЛАТФОРМЕННЫМ ИНЕРЦИАЛЬНЫМ БЛОКОМ

Лысова А.А., Пашнин С.В.

*ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
Челябинск, e-mail: lysovaaa@susu.ru, pashninsv@susu.ru*

Целью исследования является оценка точности системы управления посадочным модулем с бесплатформенным инерциальным блоком. Рассматривается модель движения посадочного модуля под воздействием гравитации и аэродинамических сил во время посадки в атмосферной зоне без учета работы системы стабилизации. Посадочный модуль представляет собой летательный аппарат, система управления которого содержит бесплатформенную инерциальную навигационную систему, на выходе которой имеются необходимые для формирования управления параметры. Управление является аэродинамическим, оно осуществляется путем изменения пространственного угла атаки и угла крена, на которые накладываются ограничения по максимальному значению и скорости изменения. Описывается процедура формирования аэродинамического управления, приводятся результаты моделирования управляемого движения и оценивается влияние шага формирования управления на его точность. В статье описывается расчет навигации с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы и результаты моделирования ее работы. Проведена оценка влияния на точность системы инструментальных погрешностей акселерометров и датчиков угловой скорости, а также ошибок задания начальной ориентации, а также влияния формы траектории движения. Оценена точность системы управления в целом. Результаты данной работы могут быть использованы при формировании тестовых траекторий посадочного модуля на атмосферном участке при заданных начальных и конечных параметрах движения.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, погрешности в определении скорости, определении координат, определении угловой ориентации

EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE CONTROL SYSTEM OF THE LANDER WITH A STRAPLESS INERTIAL UNIT

Lysova A.A., Pashnin S.V.

*South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, e-mail: lysovaaa@susu.ru, pashninsv@susu.ru*

The purpose of the study is to evaluate the accuracy of the control system of the lander with a strapless inertial unit. A model of the lander's motion under the influence of gravity and aerodynamic forces during landing in an atmospheric area is considered without taking into account the operation of the stabilization system. The lander is an aircraft. The hypothetical aerodynamic and dimensional-mass characteristics of the aircraft are set. The control system of the aircraft contains a free-form inertial navigation system, the output of which has the necessary parameters for control formation. The control is aerodynamic, it is carried out by changing the spatial angle of attack and the angle of roll, which are subject to restrictions on the maximum value and speed of change. The motion of the aircraft during landing in an atmospheric area is considered without taking into account the operation of the stabilization system. The procedure for the formation of aerodynamic control is described, the results of modeling controlled motion are presented, and the influence of the control formation step on its accuracy is evaluated. The article describes the calculation of navigation using a strapless inertial navigation system and the results of modeling its operation. The evaluation of the influence on the accuracy of the system of instrumental errors of accelerometers and angular velocity sensors and errors in setting the initial orientation, as well as the influence of the shape of the trajectory, was performed. The accuracy of the control system as a whole is evaluated.

Keywords: strapless inertial navigation system, errors in determining speed, determining coordinates, determining angular orientation

Введение

Посадочный модуль (ПМ) в виде летательного аппарата (ЛА) совершает посадку на Землю. В точке входа в атмосферу известны параметры движения ПМ. Определение текущих параметров движения осуществляется по информации, поступающей с бесплатформенного инерциального блока (БИБ), посредством бортового вычисли-

тельного цифрового комплекса (БЦВК), то есть при помощи бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Считается, что на момент входа в атмосферу ошибки БИНС в определении координат и скоростей полностью скомпенсированы, а ошибки углового положения скомпенсированы полностью или с конечной точностью.

На основе программно-математической модели движения было сформировано два варианта управления, приводящие ЛА в заданную точку на поверхности Земли. В варианте 1 реализован известный алгоритм «прямого наведения» [1, с. 129], а для варианта 2 был разработан алгоритм управления, позволяющий уложиться в ограничение на величину угла наклона траектории [2]. Для обоих вариантов управления была проведена оценка его точности в зависимости от шага формирования.

Вдоль полученных траекторий движения ЛА сымитированы показания БИБ, по которым осуществляется расчет текущей навигации и ориентации посредством реализованного алгоритма БИНС. На полученных вариантах траектории движения ЛА произведена оценка влияния на точность БИНС инструментальных ошибок акселерометров и ДУС и погрешностей задания начальной угловой ориентации, а также влияния формы траектории движения. На основе данных о точности управления и точности БИНС была произведена оценка точности системы управления в целом.

В работе приняты следующие глобальные допущения: не учитывается суточное вращение Земли; не учитывается влияние ветра; поверхность Земли представляет собой сферу.

Цель исследования – оценка точности системы управления посадочного модуля с беспилотным инерциальным блоком.

Материалы и методы исследования

БИНС представляет собой БИБ и алгоритм БИНС, реализуемый в БЦВК. БИБ, в свою очередь, содержит акселерометры и датчики угловой скорости (ДУС) в количестве, необходимом для получения полной информации о поступательном и угловом движениях объекта. С помощью ДУС возможно получение (пересчет) информации об угловой ориентации объекта относительно инерциальной системы координат (ИСК) и пересчет приращения кажущейся скорости (по информации, поступающей с акселерометров) из связанной системы координат (ССК) в ИСК [3, с. 54, 56]. В целом получаем навигационную информацию в виде координат и скорости объекта управления в ИСК. Информация, поступающая с акселерометров и ДУС, является входной для алгоритма БИНС. В данной работе считаем, что БИБ состоит из трех акселерометров и трех ДУС, оси чувствительности ко-

торых ортогональны и расположены по связанным осям ЛА.

Точность БИНС в определении координат и скоростей вычисляется по следующим формулам (параметры движения, получаемые путем интегрирования уравнений движения, считаются траекторными (идеальными) и обозначаются с нижним индексом «ТР», а параметры движения, получаемые с алгоритма БИНС, обозначаются с нижним индексом «Б»):

$$\Delta V_{x_g} = V_{x_{gБ}} - V_{x_{gТР}};$$

$$\Delta V_{y_g} = V_{y_{gБ}} - V_{y_{gТР}};$$

$$\Delta V_{z_g} = V_{z_{gБ}} - V_{z_{gТР}};$$

$$\Delta V = \sqrt{(\Delta V_{x_g})^2 + (\Delta V_{y_g})^2 + (\Delta V_{z_g})^2}; \quad (1)$$

$$\Delta x_g = x_{gБ} - x_{gТР};$$

$$\Delta y_g = y_{gБ} - y_{gТР};$$

$$\Delta z_g = z_{gБ} - z_{gТР};$$

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x_g)^2 + (\Delta y_g)^2 + (\Delta z_g)^2},$$

где ΔV_{x_g} – ошибка БИНС в определении x -составляющей скорости в земной системе координат (ЗСК); ΔV_{y_g} – ошибка БИНС в определении y -составляющей скорости в ЗСК; ΔV_{z_g} – ошибка БИНС в определении z -составляющей скорости в ЗСК; ΔV – ошибка БИНС в определении скорости в ЗСК; Δx_g – ошибка БИНС в определении координаты x в ЗСК; Δy_g – ошибка БИНС в определении координаты y в ЗСК; Δz_g – ошибка БИНС в определении координаты z в ЗСК; Δr – ошибка БИНС в определении местоположения в ЗСК.

Таким образом, по формулам (1) производится оценка точности БИНС в определении скорости и геометрических координат.

Для расчета точности БИНС в определении углового положения на выходе алгоритма БИНС имеется матрица T перехода от ССК к ЗСК, вычисляемая путем решения матричного уравнения Пуассона [4, с. 55], которую обозначим T_B в соответствии с принятым выше. Траекторная матрица T_{TP} выражается следующим образом:

$$T_{TP} = D_{TP}^T \quad (2)$$

где D_{TP}^T – траекторная матрица D .

Введем произведение матриц

$$\Delta M = (T_{TP}^T) \cdot \left(\frac{1}{\det|T_B|} T_B \right) = D_{TP} \cdot \left(\frac{1}{\det|T_B|} T_B \right) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

результатом которого является матрица ΔM . Матрицу ΔM назовем матрицей углового расхождения, которая характеризует отличие матрицы T_B от матрицы T_{TP} . В формуле (3) для матрицы T_B применена операция нормировки путем деления каждого ее элемента на ее же определитель $\det|T_B|$, так как при численных расчетах в алгоритмах БИНС матрица направляю-

щих косинусов имеет свойство терять ортогональность, и невыполнение операции нормировки привело бы к дальнейшей некорректной оценке угловой погрешности БИНС.

Матрица углового расхождения может быть задана и при использовании матрицы, составленной с помощью параметров Родрига – Гамильтона [5]

$$L = \begin{pmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{13} \\ l_{21} & l_{22} & l_{23} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) & \lambda_0^2 + \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_2\lambda_3 + \lambda_0\lambda_1) & \lambda_0^2 + \lambda_3^2 - \lambda_2^2 - \lambda_1^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – параметры Родрига – Гамильтона, задающие пространственный разворот между угловыми ориентациями, заданными матрицами направляющих косинусов T_B и T_{TP} .

Имеем равенство матриц ΔM (3) и L (4). Две матрицы равны, если равны их соот-

ветствующие элементы: $m_{ij} = l_{ij}$. Таким образом, существует возможность составить необходимое число уравнений для нахождения $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Путем рассуждений была составлена следующая система для нахождения $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$:

$$\begin{cases} l_{23} - l_{32} = m_{23} - m_{32}, \\ l_{31} - l_{13} = m_{31} - m_{13}, \\ l_{12} - l_{21} = m_{12} - m_{21}, \\ l_{11} + l_{22} = m_{11} + m_{22} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -4\lambda_0\lambda_1 = m_{23} - m_{32}, \\ -4\lambda_0\lambda_2 = m_{31} - m_{13}, \\ -4\lambda_0\lambda_3 = m_{12} - m_{21}, \\ 2(\lambda_0^2 - \lambda_3^2) = m_{11} + m_{22}. \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \lambda_1 = \frac{m_{23} - m_{32}}{-4\lambda_0}, \\ \lambda_2 = \frac{m_{31} - m_{13}}{-4\lambda_0}, \\ \lambda_3 = \frac{m_{12} - m_{21}}{-4\lambda_0}, \\ 2(\lambda_0^2 - \lambda_3^2) = m_{11} + m_{22}. \end{cases} \quad (5)$$

Подставив выражение для λ_3 (третье уравнение системы (5)) в четвертое уравнение системы (5) и решив полученное уравнение, получим выражение для λ_0

$$\lambda_0 = \pm \frac{1}{2} \sqrt{m_{11} + m_{22} \pm \sqrt{(m_{11} + m_{22})^2 + (m_{12} - m_{21})^2}}, \quad (6)$$

где знаки для λ_0 будут определены чуть позже.

Зная параметры $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, можно вычислить параметры вектора конечного поворота Φ_x, Φ_y, Φ_z с нормой Φ , зная которые можно оценить погрешность БИНС в определении углового положения [6]. Параметры Φ_x, Φ_y, Φ_z вычисляются по следующим формулам:

$$\circ \Phi_x = \frac{\lambda_1 \Phi}{\sin \frac{\Phi}{2}},$$

$$\Phi_y = \frac{\lambda_2 \Phi}{\sin \frac{\Phi}{2}}, \quad (7)$$

$$\circ \Phi_z = \frac{\lambda_3 \Phi}{\sin \frac{\Phi}{2}},$$

$$\circ \Phi = 2 \arccos \lambda_0.$$

Так как используемый при моделировании алгоритма БИНС шаг интегрирования $\Delta t = 4$ мс мал, то от шага к шагу будет мала и норма вектора конечного поворота Φ , а значение \cos малой величины ≈ 1 , то есть $\lambda_0 \approx 1$, $\lambda_0 > 0$, также матрица ΔM будет близка к единичной, поэтому в формуле (7) выбираем знаки «+».

Найдя таким образом параметры Φ_x , Φ_y , Φ_z , по формуле (8) можно вычислить погрешность БИНС в определении углового положения:

$$\Delta\Phi = \sqrt{(\Phi_x)^2 + (\Phi_y)^2 + (\Phi_z)^2}. \quad (8)$$

Вычисление параметров навигации и ориентации, так же как и интегрирование уравнений движения, осуществляется методом Рунге–Кутты 4 порядка с шагом 4 мс. В качестве начальных значений координат вводятся координаты точки входа в атмосферу.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты моделирования работы БИНС представлены на графиках изменения погрешностей БИНС в определении скорости $\Delta V(t)$, определении координат $\Delta r(t)$, определении угловой ориентации $\Delta\Phi(t)$ для вариантов 1 (рис. 1–3, а) и 2 (рис. 1–3, б) траектории движения.

Данные погрешности являются методическими погрешностями алгоритма БИНС [7; 8].

Значения представленных погрешностей БИНС (вариант 1) на конечный момент времени следующие: $\Delta V(t) = 0,12$ м/с, $\Delta r(t) = 7,5$ м, $\Delta\Phi(t) = 0,05'$. Значения методических погрешностей БИНС (вариант 2) на конечный момент времени для данного варианта траектории движения следующие: $\Delta V(t) = 0,05$ м/с, $\Delta r(t) = 1,3$ м, $\Delta\Phi(t) = 0,02'$.

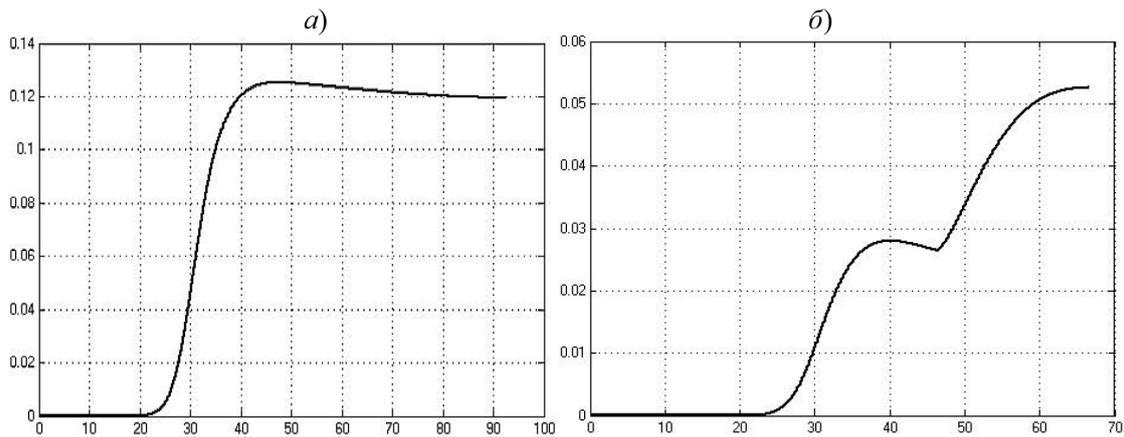


Рис. 1. Графики изменения ошибки $\Delta V(t)$

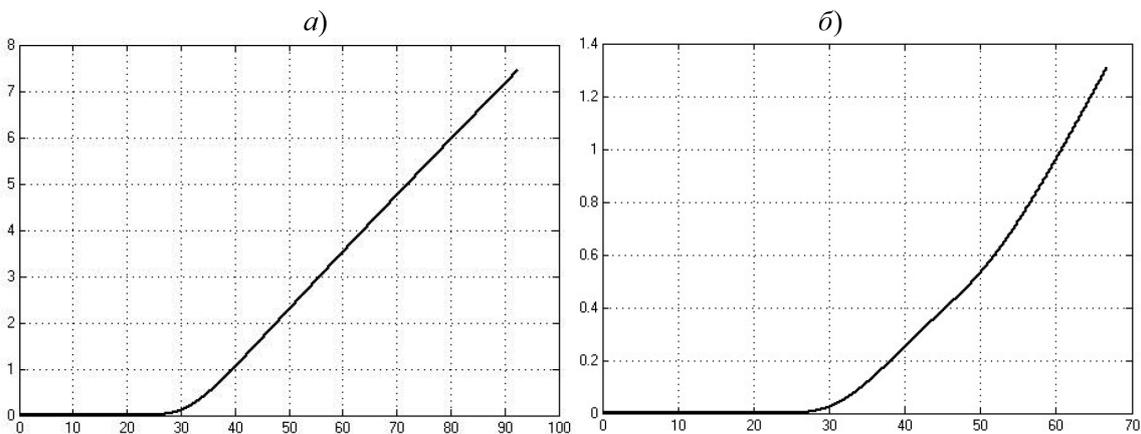


Рис. 2. Графики изменения ошибки $\Delta r(t)$

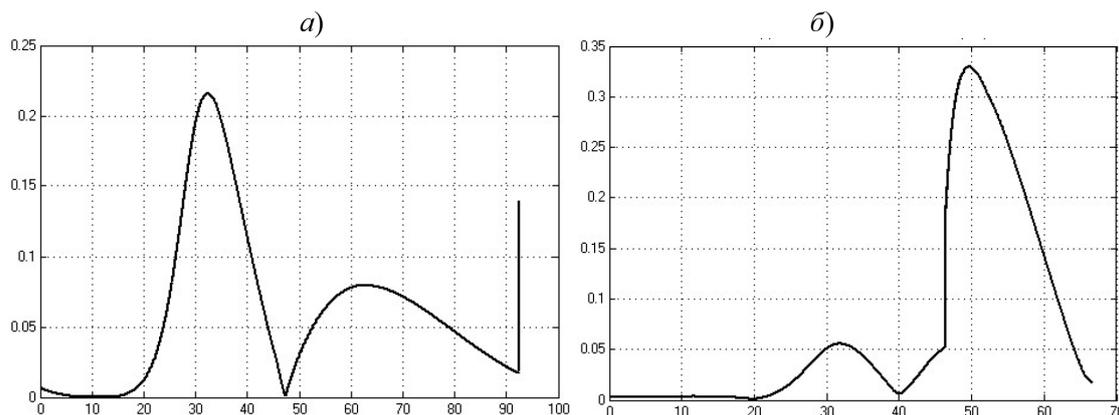


Рис. 3. Графики изменения ошибки $\Delta\Phi(t)$

Величины методических погрешностей небольшие и, как видно из рис. 1–3, мало зависят от начальных условий, поэтому в дальнейшем была проведена их компенсация, чтобы оценить влияние только инструментальных ошибок БИБ и ошибок задания начальной ориентации на точность БИНС.

Проведена оценка влияния ошибок БИБ и погрешности задания начальной ориентации на точность навигации на траектории движения варианта 1, дополнив существующую модель в Simulink Matlab возможностью задавать погрешности смещения нуля и погрешности масштабного коэффициента по каждому акселерометру и ДУС, а также возможностью вносить погрешности задания начальной ориентации.

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

- при наличии погрешности смещения нуля ΔA_i [8] у i -го акселерометра, максимальные погрешности БИНС возникают по соответствующим i -м составляющим (например, при наличии погрешности ΔA_x – максимальные погрешности в определении координаты x_g и составляющей скорости V_{x_g}); то же справедливо и при наличии δK_{a_i} ;

- наибольшее влияние из инструментальных погрешностей ДУС оказывают инструментальные погрешности ДУС Γ_y и Γ_z , при этом самое сильное влияние оказывает δK_{ω_z} ;

- наибольшее влияние на погрешности БИНС оказывают погрешности задания начальной ориентации $\Delta\psi_k$, $\Delta\vartheta_k$, $\Delta\gamma_k$ (углы рыскания, тангажа и крена) [9] при этом самое сильное влияние оказывает погрешность задания $\Delta\vartheta_k$;

- j -я составляющая погрешностей БИНС от действия k -го фактора со знаком «+» равна j -й составляющей от действия фактора со знаком «-», но с противополо-

жным знаком (например, $\Delta x_g (\Delta A_x) = -\Delta x_g (-\Delta A_x)$); это справедливо для всех составляющих погрешностей БИНС за исключением ΔV , Δr и $\Delta\Phi$;

- погрешности БИНС (3σ) на конечный момент времени при действии всех факторов в определении координат Δr не превышают 234 м, в определении скорости ΔV не превышают 4,1 м/с, в определении угловой ориентации $\Delta\Phi$ не превышают 6,1°.

По изменениям погрешностей БИНС во времени можно отметить следующее:

- резкий рост погрешностей в определении координат и составляющих скорости происходит с момента времени $t \approx 30$ с, что соответствует максимальным перегрузкам по связанным осям;

- погрешность определения ориентации в начальный момент времени равна

$$\Delta\Phi(t_0) = \sqrt{(\Delta\vartheta_k)^2 + (\Delta\psi_k)^2 + (\Delta\gamma_k)^2} \approx 6,56'.$$

Для оценки погрешностей БИНС на траектории движения варианта 2 был применен тот же подход, что и при оценке погрешностей БИНС на варианте 1 траектории движения с единственным отличием в том, что будем задавать факторы, влияющие на точность БИНС, только со знаком «+», так как было выявлено, что j -я составляющая погрешностей БИНС от действия k -го фактора со знаком «+» равна j -й составляющей от действия фактора со знаком «-», но с противоположным знаком.

Анализируя полученные данные, можно сделать такие же выводы, как и по результатам варианта 1 траектории движения. Однако погрешности БИНС на конечный момент времени при действии всех факторов в определении координат Δr не превышают 128 м, в определении скорости ΔV не превышают 3,9 м/с, в определении угловой ориентации $\Delta\Phi$ не превышают 4,9°.

По изменениям погрешностей БИНС во времени аналогично варианту 1 траектории движения можно отметить следующее:

– резкий рост погрешностей в определении координат и составляющих скорости происходит с момента времени $t \approx 30$ с, что соответствует максимальной продольной перегрузке;

– погрешность определения ориентации в начальный момент времени равна

$$\Delta\Phi(t_0) = \sqrt{(\Delta\vartheta_k)^2 + (\Delta\psi_k)^2 + (\Delta\gamma_k)^2} \approx 6,56'.$$

Сравнивая между собой погрешности БИНС, полученные на двух вариантах траектории движения при действии всех факторов, можно отметить, что на варианте 2 погрешность БИНС определения местоположения Δr на конечный момент времени почти в 2 раза меньше, чем на варианте 1, что может быть связано с меньшим временем движения. Ошибки определения скорости ΔV и угловой ориентации $\Delta\Phi$ в обоих случаях приблизительно равны. С точки зрения использования БИНС предпочтительнее использование варианта 2 управления, дающего вариант 2 траектории движения, так как в этом случае время движения до точки цели меньше и меньше погрешность определения местоположения, чем на траектории движения варианта 1.

Результаты показывают, что точность СУ в основном определяется точностью БИНС. Однако управление было сформировано с учетом точных знаний атмосферы, аэродинамических коэффициентов и без учета запаздывания формирования навигации, поэтому влияние этих факторов на точность формирования управления требует дополнительного исследования.

Заключение

В данной работе была проведена оценка точности системы управления посадочного модуля с бесплатформенным инерциальным блоком двух вариантов управления, приводящих ЛА в заданную точку на поверхности Земли. Показано, что предпочтительнее использование варианта 2 управления, так как в этом случае время движения до точки цели меньше и меньше погрешность определения местоположения ЛА.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке требований к БИБ и БЦВК, а также при формировании

тестовых траекторий посадочного модуля на атмосферном участке при заданных начальных и конечных параметрах движения

Для дальнейших исследований возможно уточнение математической модели посредством учета влияния суточного вращения и реальной формы поверхности Земли, учета влияния ветра, учета динамики вращения вокруг центра масс. При формировании управления возможен учет ограничений на величины максимально допустимой перегрузки и аэродинамического нагрева, а также учет запаздывания формирования навигационной навигации. При оценке точности БИНС возможно расширение моделей погрешностей акселерометров и ДУС и использование многошаговых алгоритмов БИНС.

Список литературы

1. Толпегин О.А., Кашин В.М., Новиков В.Г. Математические модели систем наведения ракет. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2016. 154 с.
2. Теляков Р.Ф. Разработка алгоритма оптимального управления спуском летательного аппарата в заданную область прицеливания с заданным углом наклона траектории при наличии ошибок измерения параметров движения // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 2. С. 38–43. DOI: 10.13140/RG.2.2.14909.84966.
3. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы. Тула: ТулГУ, 2012. 199 с.
4. Черников С.А., Щеглова Н.Н. Высокоточные системы навигации. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2018. 65 с.
5. Исаев М.А., Исаев А.М., Кудинов Н.В., Мироненко Р.С. Алгоритм начальной инициализации кватерниона пространственной ориентации в параметрах Родрига – Гамильтона // Вестник Донского технического университета, 2018. Т. 18, № 2. С. 238–245. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-238-245.
6. Санько А.А., Шейников А.А. Определение угловой ориентации в БИНС: сравнение традиционных алгоритмов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 1. С. 77–88. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-77-88.
7. Кутовой В.М., Ситников П.В., Перепелкина С.Ю., Федотов А.А., Коротаяева О.Л. Оценивание точности алгоритмов бесплатформенной инерциальной системы ориентации модернизируемых и перспективных средств выведения // Ракетно-космическая техника. 2013. Т. 1, № 1 (2). С. 6. DOI: 32470539.
8. Матвеев В.В. Погрешности бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Приборостроение-2023: материалы 16-й Международной научно-технической конференции (Минск, 22–24 ноября 2023 г.). Минск: БНТУ, 2023. С. 8–10.
9. Матвеев В.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В., Каликанов А.В., Кирсанов М.Д., Стрельцов Д.С., Колесников А.Г. Реализация алгоритмов ориентации бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 12. С. 85–90. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-85-92.

УДК 621.774.2

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВАРОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ТРУБОПРОИЗВОДСТВЕ

Чкалова М.В., Кистанов А.А.

*ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
Оренбург, e-mail: Institut.riska@yandex.ru*

Современное развитие металлургической отрасли требует внедрения инновационных технологий сварки, направленных на повышение качества трубопроводной продукции. Цель исследования заключается в разработке метода расчета аддитивного коэффициента качества для объективной оценки и обоснованного выбора сварочных технологий, способствующего повышению технологической эффективности сварочных процессов и улучшению эксплуатационных характеристик трубопроводной продукции. В работе проведен сравнительный анализ пяти методов сварки: высокочастотной, дуговой под флюсом, контактной, лазерной и плазменной. Рассмотрены основные методы сварки (высокочастотная, дуговая, контактная, лазерная и плазменная) с акцентом на их преимущества, недостатки и особенности применения. Проведен сравнительный анализ технологий на основе расчета относительных и аддитивных коэффициентов качества. Наилучшие показатели прочности и твердости соответствуют лазерному виду сварки, что делает ее предпочтительной для задач с высокими нагрузками. Плазменная сварка выделяется высокой герметичностью, обеспечивая надежность соединений в сложных условиях. Дуговая сварка под флюсом и контактная сварка продемонстрировали лучшую пластичность, что делает их оптимальными для конструкций, подверженных деформациям. Рассчитанный аддитивный коэффициент качества позволяет объективно оценивать эффективность методов сварки и выбирать оптимальные технологии в зависимости от производственных задач. Представленные результаты исследования служат основой для совершенствования технологий сварки и улучшения эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: трубопроизводство, сварной шов, технологии соединения, сварка труб, аддитивный коэффициент качества

OPTIMISATION OF WELDING TECHNOLOGY SELECTION IN PIPE PRODUCTION

Chkalova M.V., Kistanov A.A.

Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: Institut.riska@yandex.ru

The modern development of the metallurgical industry requires the implementation of innovative welding technologies aimed at improving the quality of pipeline products. The aim of the study is to develop a method for calculating the additive quality coefficient for the objective evaluation and substantiated selection of welding technologies, thereby contributing to an increase in the technological efficiency of welding processes and the improvement of the operational characteristics of pipeline products. In this work, a comparative analysis of five welding methods was conducted: high-frequency, arc welding under flux, contact welding, laser welding, and plasma welding. The main welding methods have been examined—high-frequency, arc, contact, laser, and plasma welding—with an emphasis on their advantages, disadvantages, and application features. A comparative analysis of the technologies was carried out based on the calculation of relative and additive quality coefficients. The best indicators of strength and hardness correspond to the laser welding method, which makes it preferable for tasks with high loads. Plasma welding stands out for its high hermeticity, ensuring the reliability of joints under challenging conditions. Arc welding under flux and contact welding demonstrated better plasticity, which makes them optimal for structures subject to deformation. The calculated additive quality coefficient allows for the objective evaluation of the efficiency of welding methods and the selection of optimal technologies depending on production requirements. The presented results of the study serve as a basis for the improvement of welding technologies and the enhancement of operational characteristics.

Keywords: pipeline production, welded joint, joining technologies, pipe welding, additive quality coefficient

Введение

Современное технологическое развитие металлургической отрасли требует постоянного внедрения инноваций для повышения качества продукции. Динамичное развитие добывающих отраслей и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) формирует необходимость модернизации технологий производства труб различного диаметра [1; 2], что делает особенно актуальным анализ качества сварных швов.

Качество сварного соединения является ключевым фактором, определяющим надежность и долговечность трубопроводных систем, от которых зависит эксплуатационная безопасность в различных критически важных отраслях. В условиях роста эксплуатационных требований и ужесточения международных стандартов возникает потребность в использовании современных технологий сварки [3, с. 45; 4, с. 11; 5, с. 20], способных обеспечить высокую прочность и устойчивость соединений при минимизации затрат.

Инновационное развитие в области трубопроизводства направлено на поиск и внедрение наиболее эффективных подходов к созданию сварных соединений, что позволяет не только повысить конкурентоспособность продукции, но и обеспечить ее соответствие современным требованиям эксплуатации.

Цель исследования заключается в разработке метода расчета аддитивного коэффициента качества для объективной оценки и обоснованного выбора сварочных технологий, способствующего повышению технологической эффективности сварочных процессов и улучшению эксплуатационных характеристик трубопроводной продукции.

Задачи исследования:

1. Проанализировать нормативные параметры качества сварных соединений (прочность, твердость, пластичность, герметичность).

2. Исследовать особенности применения различных методов сварки (высокочастотная, дуговая под флюсом, контактная, лазерная и плазменная).

3. Разработать методику расчета относительных и аддитивных коэффициентов качества сварных соединений.

4. Провести сравнительный анализ эффективности сварочных технологий с использованием разработанной методики.

5. Сформулировать рекомендации по оптимизации выбора сварочных технологий в зависимости от производственных требований.

Материалы и методы исследования

В данном исследовании в качестве объектов анализа выступили пять технологий сварки: высокочастотная (ТЭСА 530), дуговая под флюсом (САФ 1200, ТЭСА 1420), контактная (СКА-4), лазерная (ЛС-300) и плазменная (ППС-30). Анализ проводился на основе нормативных документов [4–6] и данных из научных публикаций – база данных eLibrary. Важнейшими характеристиками качества сварного шва, которые служат надежностью и функциональности сварных соединений в различных конструкциях, являются прочность, твердость, пластичность и герметичность.

Таблица 1

Анализ базовых технологий создания сварных швов

Тип базовой технологии	Особенности применения	Преимущества	Недостатки	Основные виды оборудования
Высокочастотная	Для труб малого и среднего диаметра	Высокая скорость сварки, возможность энергосбережения, высокая производительность	Требует зачистки перед процессом	ТЭСА 530 (Трубо сварочный электрический станок автоматизированный, м. 530)
Дуговая под флюсом (САФ)	Для труб среднего и большого диаметра	Глубокое проплавление металла, высокая производительность	Ограничение по материалам (не подходит для тонкостенных труб)	САФ 1200, ТЭСА 1420 (Сварочный автомат флюсовый, м.1200, труборварочный электрический станок автоматизированный, м. 1420)
Контактная (давлением)	Для труб малого и среднего диаметра	Высокая прочность соединения, возможность энергосбережения	Минимальная прочность шва при увеличении толщины материала	СКА-4 (Сварочный контактный аппарат, м. 4)
Лазерная	Для тонкостенных труб малого и среднего диаметра	Высокая производительность, минимальная термическая деформация, высокая скорость сварки	Высокая энергоёмкость, сложность эксплуатации	ЛС-300 (Лазерный сварочный аппарат, м. 300)
Плазменная	Для труб среднего диаметра из композиционных материалов	Высокая производительность, высокая скорость сварки, высокая технологичность	Высокая стоимость оборудования, сложность эксплуатации	ППС-30 (Плазменно-сварочный станок)

Таблица 2

Анализ параметров качества различных сварочных технологий

Виды оборудования	Нормативные значения параметров качества			
	Прочность (мПа)	Твердость (ГПа)	Пластичность (%)	Герметичность (мПа)
ТЭСА 530 (Высокочастотная)	400	200	20	10
САФ 1200, ТЭСА 1420 (Дуговая под флюсом)	450	250	25	12
СКА-4 (Контактная сварка)	350	150	30	5
ЛС-300 (Лазерная сварка)	550	250	15	8
ППС-30 (Плазменная сварка)	500	200	25	10

Для обеспечения высокого качества сварного шва каждая его характеристика выполняет уникальную функцию. Прочность шва должна быть не ниже, чем у основного материала [6, п. 4.3], чтобы выдерживать внешние воздействия и нагрузки, что подтверждается испытаниями на разрыв, изгиб и ударные нагрузки. Твердость сварного шва, максимально близкая к твердости основного материала, является показателем качества теплового воздействия при сварке и позволяет выявить слабые зоны, оценить устойчивость к механическим повреждениям и износу. Пластичность обеспечивает способность шва выдерживать механические нагрузки и деформации, предотвращая трещины и разрушения при статических или динамических нагрузках. Герметичность критически важна для соединений в трубопроводных системах, где она гарантирует удержание транспортируемой среды без утечек [7, с. 102; 8, с. 68], обеспечивая безопасность, эффективность эксплуатации и защиту окружающей среды.

Для достижения надежности сварных соединений применяются различные технологии сварки [1, с. 115; 9, с. 95], анализ которых представлен в табл. 1.

Выбор технологии сварки зависит от условий эксплуатации, характеристик материала и требований к качеству соединений. Для конструкций, подвергающихся высоким механическим нагрузкам, предпочтительны такие методы, как дуговая или плазменная сварка, обеспечивающие прочность и надежность. Для тонкостенных материалов и изделий с высокой точностью применяют лазерную сварку с минимальной зоной термического воздействия. Современные подходы часто сочетают различные технологии, чтобы достичь оптимального результата в конкретных условиях.

Каждая из рассмотренных технологий создания сварных швов имеет свои преимущества и недостатки. Нормативные значения

параметров качества сварных соединений [4, с. 14; 5, с. 24; 6, с. 10], представленные в табл. 2, позволяют провести объективное сравнение технологий на основании расчета относительных и аддитивных коэффициентов.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассчитаем промежуточный относительный коэффициент качества для каждого параметра с использованием нормативных значений из табл. 2 по следующей формуле:

$$R = N / N_{max}$$

где N – фактическое значение параметра качества, а N_{max} – максимальное из возможных значение соответствующего параметра.

Аддитивный коэффициент качества определим как среднее арифметическое всех промежуточных относительных коэффициентов по каждому виду оборудования:

$$K = R_i / 4.$$

Результаты расчетов коэффициентов качества для различных типов сварочного оборудования сведены в табл. 3.

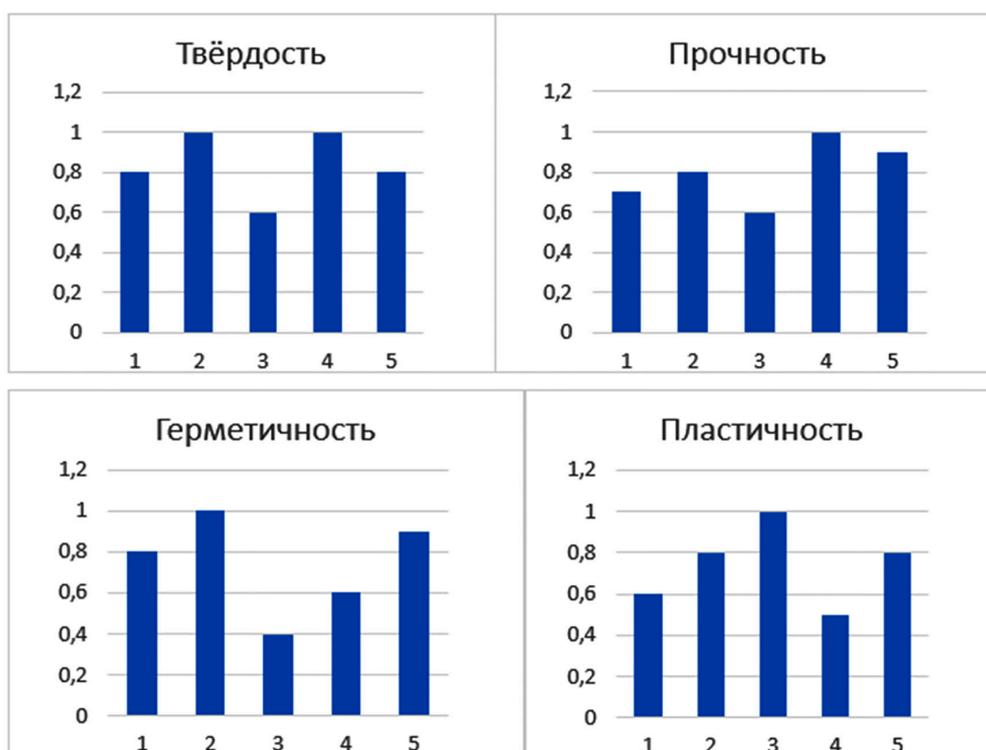
На основании представленных данных был проведен сравнительный анализ характеристик различных типов сварочных технологий по четырем нормативным параметрам, который представлен в виде диаграмм на рисунке.

Результаты показывают, что лазерная сварка демонстрирует наибольшую твердость и прочность, что делает ее оптимальной для задач с высокими нагрузками. Плазменная сварка выделяется высокой герметичностью, обеспечивая надежность соединения в условиях давления и агрессивных сред. Дуговая сварка под флюсом и контактная сварка обеспечивают лучшую пластичность, что делает их предпочтительными для конструкций, подвергающихся деформациям. Выбор метода зависит от требований к характеристикам соединений.

Таблица 3

Сравнительный анализ коэффициентов качества сварочных технологий

Способ получения сварного шва	Промежуточные относительные коэффициенты				Аддитивные коэффициенты
	Прочность	Твёрдость	Пластичность	Герметичность	
ТЭСА 530 (Высокочастотная)	0,727	0,8	0,667	0,833	0,757
САФ 1200, ТЭСА 1420 (Дуговая под флюсом)	0,818	1,0	0,833	1,0	0,913
СКА-4 (Контактная сварка)	0,636	0,6	1,0	0,417	0,663
ЛС-300 (Лазерная сварка)	1,0	1,0	0,5	0,667	0,792
ППС-30 (Плазменная сварка)	0,909	0,8	0,833	0,833	0,844



Сравнительный анализ характеристик различных методов сварки:

1 – высокочастотная (ТЭСА 540); 2 – дуговая сварка под флюсом (САФ 1200, ТЭСА 1420);
3 – контактная сварка (СКА-4); 4 – лазерная сварка (ЛС-300); 5 – плазменная сварка (ППС-30)

На основе проведенного анализа, включавшего в себя сравнительное исследование ряда передовых методов соединения металлов, а также с учетом полученных результатов данного исследования были четко выделены ключевые особенности, определяющие специфику применения различных технологий сварки в современных производственных процессах. Учитывая выявленные при этом преимущества и недостатки, сформулированы конкретные ре-

комендации, позволяющие производственным предприятиям осмысленно выбирать и оптимизировать наиболее подходящие методы сварки, исходя из конкретных требований и условий эксплуатации.

1. Лазерная сварка для высоких механических нагрузок и прочности.

При значительных механических воздействиях и строгих требованиях к прочности рекомендуется использовать лазерную сварку, которая обеспечивает высокую

прочность шва и минимальные термические деформации, гарантируя стабильность и долговечность конструкций.

2. Плазменная сварка для соединений с повышенной герметичностью.

Для критически важных соединений, где требуется абсолютная герметичность и устойчивость к агрессивным средам, оптимально применять плазменную сварку, формирующую прочный и герметичный шов, устойчивый к воздействию химически активных веществ и коррозии.

3. Дуговая сварка под флюсом и контактная сварка для деформируемых конструкций.

При высоких механических нагрузках, способных вызывать деформации, эффективны дуговая сварка под флюсом и контактная сварка, обеспечивающие наилучшую пластичность шва и устойчивость к динамическим нагрузкам, изгибам и вибрациям.

4. Высокочастотная сварка для труб малого диаметра.

Для труб с небольшим диаметром предпочтительна высокочастотная сварка, которая повышает производительность, снижает энергозатраты и обеспечивает точность соединений благодаря использованию тока высокой частоты.

5. Аддитивный коэффициент качества для объективной оценки сварочных технологий.

В целях объективного сопоставления эффективности различных методов сварки рекомендуется применять аддитивный коэффициент качества, учитывающий конкретные производственные требования и параметры конечной продукции.

Таким образом, каждый метод сварки обладает уникальным комплексом преимуществ, позволяющим эффективно решать конкретные производственные задачи. Представленные рекомендации могут служить основой для дальнейшего совершенствования технологий сварки, способствуя повышению прочности, долговечности и устойчивости конструкций, а также конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ пяти технологий сварки в трубопроизводстве помог выявить их преимущества и огра-

ничения, а также определить оптимальные области применения каждой из них. На основе рассчитанных относительных и аддитивных коэффициентов качества выполнена оценка эффективности методов, что позволило выделить наиболее результативные технологии – лазерную, плазменную и дуговую под флюсом – для различных производственных задач. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации выбора сварочных технологий, повышения эффективности производственных процессов и улучшения эксплуатационных характеристик трубопроводной продукции.

Разработанный метод расчета аддитивного коэффициента качества предоставляет возможность объективно оценивать применяемые технологии и обосновывать их выбор в зависимости от производственных требований. Предложенные рекомендации создают основу для повышения технологической эффективности сварочных процессов и улучшения эксплуатационных характеристик готовой продукции.

Список литературы

1. Иванов П.А. Современные технологии сварки трубопроводов. М.: Техносфера, 2015. 350 с.
2. Петров С.В., Сидоров В.Н. Руководство по электро-сварке. СПб.: Лань, 2019. 420 с.
3. Новиков А.Н. Современные методы сварки и контроля качества соединений. Екатеринбург: УГТУ, 2021. 300 с.
4. ГОСТ ISO 15614-1-2016. Спецификация и квалификация процессов сварки. Испытание процедуры сварки. Ч. 1. Сварка плавлением стали и никелевых сплавов [Электронный ресурс]. URL: <http://gost.gtsever.ru/Data/650/65046.pdf> (дата обращения: 15.01.2025).
5. ГОСТ Р 50.05.23-2020 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Неразрушающий контроль сварных соединений и наплавленных поверхностей. Нормы оценки качества [Электронный ресурс]. URL: https://normadocs.ru/gost_r_50.05.23-2020 (дата обращения: 16.01.2025).
6. ГОСТ ISO 3834-2021. Требования к качеству сварных соединений металлических материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181122> (дата обращения: 16.01.2025).
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614236 Российская Федерация. Программа расчета параметров динамической системы: № 2021610399: заявл. 11.01.2021: опубл. 22.03.2021 / М.В. Чкалова, В.Д. Павлидис, Е.В. Прочанкина, Е.В. Каменева. 15 с.
8. Чкалова М.В., Павлидис В.Д. Система показателей эффективности технологического оборудования в кормопроизводстве // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2 (42). С. 68–73. DOI: 10.51794/27132064-2021-2-68.
9. Сидоров А.К. Контроль сварных соединений: теория и практика. М.: Академкнига, 2017. 250 с.