

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

**ВЕСТНИК
Тамбовского
государственного
технического
университета**

***TRANSACTIONS
of the Tambov
State
Technical
University***

2019. Том 25. № 2.

**Четырехязычный
научно-теоретический
и прикладной журнал
широкого профиля**

***Four-Language
Scientific-Theoretical and
Applied Multidisciplinary
Journal***

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
Издательство ТГТУ**

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	180
Чернышова Т. И., Курносов Р. Ю., Каменская М. А. Оценка метрологической надежности аналого-цифрового преобразователя в структуре информационно-измерительной системы на этапе проектирования ..	180
Глистин В. Н., Панасюк Ю. Н. Применение динамических данных воздушного судна в угломерном канале информационно-измерительных систем.....	190
Рязанов И. Г., Чернышов Н. Г., Зырянов Ю. Т., Наумова А. Ю. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем с применением нейросетевых технологий	197
Саиф М. Н. М., Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Башкатова А. В., Мамонтов А. А. Управление объектами с взаимосвязанными величинами.....	206
Чашкина Т. В., Коробова И. Л., Майстренко Н. В. Применение ресурсной модели в вычислениях по автоматизации управления складом	219
Фролов С. С. Метод понижения погрешности измерения концентрации глюкозы неинвазивным спектрофотометром.....	225
Наимов У. Р. Оценивание координат беспилотного летательного аппарата на основе модели маневренного движения	236
Горбунов А. В., Непрокин А. В., Туголуков Е. Н., Егоров В. С. Современные системы дифференциальной диагностики вестибулярных нарушений	241
Алгазин Е. И. Анализ состояния линейных систем автоматики	250
Процессы и аппараты химических	
и других производств. Химия	256
Аррусси М., Менсах Ж., Аррусси А. Влияние содержания воды, pH, солености и температуры на стабильность и поверхностное натяжение российской нефти марки Urals (на английском языке).....	256
Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А., Смольская Д. О., Баранов Д. М. Определение оптимального диаметра труб в двухтрубном теплообменнике	271
Алексеева Н. В., Литницкий В. Ю., Куликов А. Я. Ультрафильтрационное разделение промывных вод производства пигментов алого, желтого и оранжевого	282

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	180
Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu., Kamenskaya M. A. Metrological Reliability Assessment of Analog-to-Digital Converter in the Structure of the Information-Measuring System at the Design Stage	180
Glistin V. N., Panasyuk Yu. N. Application of Dynamic Aircraft Data in the Goniometric Channel of Information-Measuring Systems	190
Ryazanov I. G., Chernyshov N. G., Zyryanov Yu. T., Naumova A. Yu. Finding an Optimal Periodicity of Technical Maintenance of Information-Measuring and Control Systems Using Neural Network Technologies.....	197
Saif M. H. M., Matveykin V. G., Dmitrievsky B. S., Bashkatova A. V., Mamontov A. A. Control of Objects with Interrelated Values.....	206
Chashkina T. V., Korobova I. L., Maistrenko N. V. Application of the Resource Model in Calculations for Computer-Aided Warehouse Management.....	219
Frolov S. S. A Method for Reducing Glucose Concentration Measurement Error with a Non-Invasive Spectrophotometer.....	225
Naimov U. R. Estimating Coordinates of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Maneuvering Movement Model	236
Gorbunov A. V., Neprokin A. V., Tugolukov E. N., Egorov V. S. Modern Differential Diagnostic Systems for Vestibular Disorders	241
Algazin E. I. Analysis of the State of Linear Automation Systems	250
Chemical and Related Engineering.	
Chemistry	256
Arroussi M., Mensah J., Arroussi A. The Effect of Water Content, pH, Salinity and Temperature on the Stability and Surface Tension of Russian Urals Crude Oil Emulsion (<i>in English</i>).....	256
Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A., Smolskaya D. O., Baranov D. M. Determination of Optimum Pipe Diameter in a Two-Pipe Heat Exchanger.....	271
Alekseeva N. V., Litnitsky V. Yu., Kulikov A. Ya. Ultrafiltration Separation of Washing Water for Production of Scarlet, Yellow and Orange Pigment.....	282

Стекольников Ю. А., Стекольников Н. Ю., Емцев В. В., Санников Э. М. Обоснование процессов электроосаждения железо-никель-фосфорных сплавов	289
Рухов А. В., Дегтярев А. А., Тришина А. В., Рухов А. В. Исследование механизма появления и состава высолов на поверхности цементно-стружечных плит	296
Математика. Физика	304
Фомин В. И. Об интерполяции решений линейных дифференциальных уравнений в случае кратных комплексных корней характеристического многочлена	304
Машиностроение. Металлообработка	320
Жумагалиева Г. Б., Осипов А. А., Першин В. Ф. Влияние режимных и геометрических параметров на кинетику процесса жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице.....	320
Материаловедение. Нанотехнологии	329
Буренина А. И., Королев А. П., Макачук М. В. Циклический отжиг высокоуглеродистой стали в среде углерода	329
Ерофеев А. В., Горохов Т. И., Данилов В. М. Влияние схемы старения циклическим замораживанием-оттаиванием пеноплекса на твердость по Бринеллю.....	334
Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук	341

Stekolnikov Yu. A., Stekolnikova N. Yu., Yemtsev V. V., Sannikov E. M. Rationale for Electrodeposition Iron-Nickel-Phosphorus Alloys	289
Rukhov A. V., Degtyarev A. A., Trishina A. V., Rukhov A. V. A Study of the Mechanism of Origin and Composition of Efflorescence on the Surface of Cement Bonded Particle Boards.....	296
Mathematics. Physics	304
Fomin V. I. Interpolation of Solutions of Linear Differential Equations in the Case of Multiple Complex Roots of the Characteristic Polynomial	304
Mechanical Engineering. Metal Treatment	320
Zhumagaliyeva G. B., Osipov A. A., Pershin V. F. The Effect of Mode and Geometric Parameters on Kinetics of Liquid Phase Shift Exfoliation Process Graphite at Rod Mill.....	320
Material Science. Nanotechnology	329
Burenina A. I., Korolev A. P., Makarchuk M. V. Cyclic Annealing of High Carbon Steel in Carbon Environment.....	329
Erofeev A. V., Gorokhov T. I., Danilov V. M. The Impact of Aging Patterns of Cyclic Freezing-Thawing on Brinell Hardness of Penoplex	334
New Professors, Doctors and Candidates of Sciences	341

**ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СТРУКТУРЕ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов, М. А. Каменская

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; rotankurnosov@yandex.ru*

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь; измерительный канал; информационно-измерительная система; метрологическая надежность; метрологическая характеристика.

Аннотация: Предложена математическая модель изменения во времени метрологических характеристик электронных измерительных средств (ЭИС), позволяющая оценивать требуемые в конкретной постановке задачи прогнозирования показатели метрологической надежности. Приведены математические модели модулей проектируемого блока аналого-цифрового преобразователя, входящего в структуру ЭИС.

Одной из важнейших характеристик качества измерительных средств (ИС), и в том числе информационно-измерительных систем (ИИС), является метрологическая надежность (МН), характеризующаяся способностью сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм при заданных режимах эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Основным показателем МН аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ИИС является метрологический ресурс (МР) t_p , определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска. Как показывают проведения исследования [1], МН ИИС в целом определяется метрологической надежностью блоков, входящих в измерительный канал (ИК) ИИС: первичный измерительный преобразователь, нормирующие преобразователи, АЦП. В современной структуре ИК ИИС особое место занимает блок АЦП, который отличается высокой точностью, сложностью и ответственностью выполняемых функций. Соответственно, достаточно важным является вопрос оценки показателей МН данного блока, прежде всего МР. В статье приводятся результаты оценки МР АЦП с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования, в основе которого лежит процесс математического моделирования блока.

На рисунке 1 представлена структурная схема АЦП двухтактного интегрирования, являющегося одним из типовых блоков в структуре современных ИС. Устройство ADC32RF45 представляет собой 14-разрядный, с быстродействием 3.0-гигацикла в секунду, двухканальный, АЦП, который поддерживает выборку радиочастотного (RF) сигнала с входными частотами до 4 ГГц и за его пределами. Устройство ADC32RF45 обеспечивает спектральную плотность шума 155 дБ/Гц, а также динамический диапазон и изоляцию канала в большом диапазоне входных частот. Каждый канал АЦП может быть подключен к двухдиапазонному цифровому преобразователю (DDC) с тремя независимыми 16-битными генераторами с числовым управлением (NCO) на двухдиапазонный цифровой преобразователь для фазово-когерентной скачкообразной перестройки частоты. Устройство ADC32RF45 поддерживает последовательный интерфейс JESD204B с детерминированной задержкой на основе подкласса 1 с использованием скорости передачи данных до 12,5 Гбит/с до четырех полос на двухдиапазонный цифровой преобразователь. Также устройство поддерживает промышленный диапазон температур (– 40...+ 85 °С).

На начальном этапе решения поставленной задачи составляется математическая модель (ММ) функционирования блока на основе анализа исходной функциональной схемы (рис. 2).

Анализ функциональной схемы АЦП показывает, что МН всего блока будет определяться показателем МН, и, в частности, величиной МР аналоговых модулей, составляющих ИК: входной высокочастотной цепи, буферного усилителя и преобразователя,

$$t_{p\text{АЦП}} = \min_{i=1,2,3} \{t_{pi}\}, \quad (1)$$

где t_{pi} – значение МР рассматриваемых модулей АЦП.

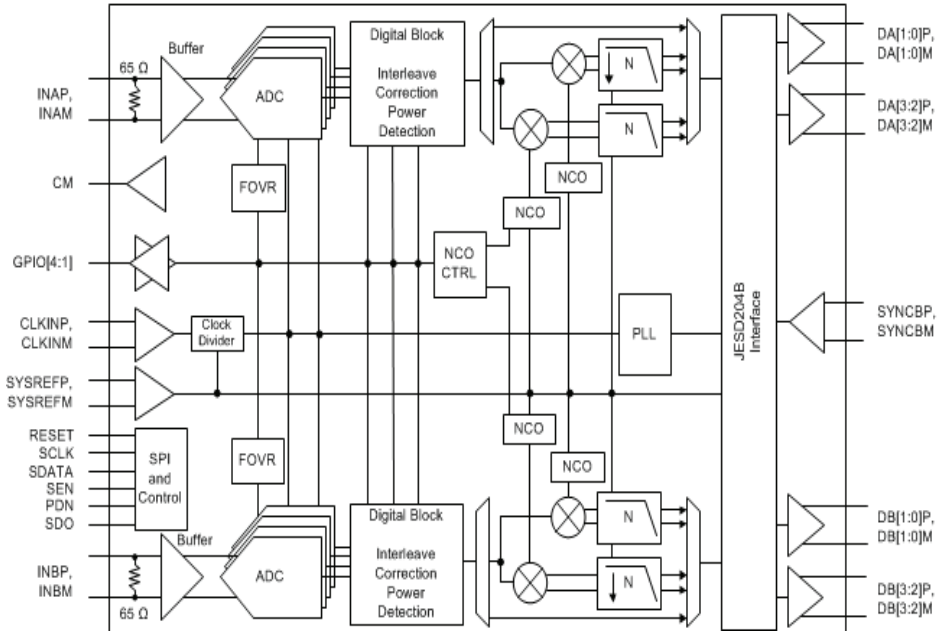


Рис. 1. Функциональная схема двухканального 14-разрядного, 3.0-гигацикла в секунду, АЦП

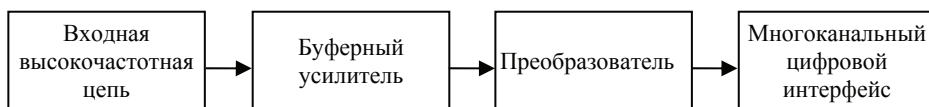


Рис. 2. Функциональная схема АЦП при подаче переменного высокочастотного напряжения

В соответствии с (1) использование для оценки МР аналитико-вероятностного метода предполагает [2, 3]:

- последовательное осуществление математического моделирования рассматриваемых модулей на основе анализа их принципиальных схем;
- математическое моделирование исследуемой МХ, которой является основная относительная погрешность δ ;
- статистическое моделирование значения основной относительной погрешности в различные моменты времени предстоящей эксплуатации по значениям параметров элементной базы каждого из модулей;
- построение ММ для функций временного изменения математического ожидания МХ $m_\delta(t)$ и функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, которые характеризуют изменение границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения с доверительной вероятностью $P = 0,997$

$$\begin{cases} m_\delta(t); \\ \Psi_{\pm}(t) = m_\delta(t) \pm 3\sigma(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $\sigma_\delta(t)$ – среднеквадратическое отклонение МХ в различные моменты времени эксплуатации.

Условие сохранения метрологической исправности позволяет оценить величину МР каждого из рассматриваемых модулей экстраполяцией $m_\delta(t)$, функцией $\psi_{\pm\sigma}(t)$ на область предстоящей эксплуатации модуля, в общем виде представленное формулой

$$|\delta(t)| < \delta_{\text{доп}}, \quad \forall t \in T_1, \quad \forall t \in T_2, \quad (3)$$

где $\delta(t)$ – изменение во времени погрешности, которое описывается функцией $m_\delta(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$; T_1, T_2 – области контроля и прогноза соответственно.

Рассмотрим модуль входной высокочастотной цепи (рис. 3).

Для решения поставленной задачи прогнозирования основной относительной погрешности АЦП целесообразно использовать прогнозирующий параметр, в качестве которого выбран коэффициент преобразования. Соответственно коэффициент передачи рассматриваемого модуля равен

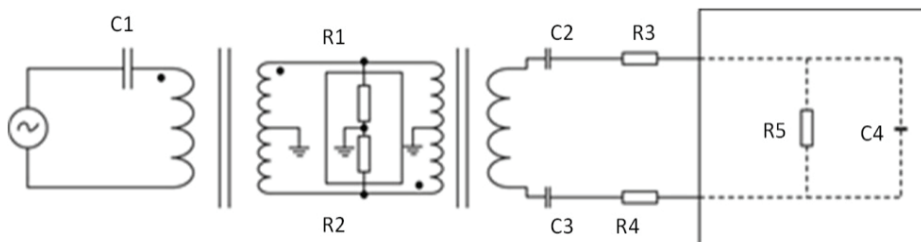


Рис. 3. Структурная схема входной высокочастотной цепи

$$K_p = \frac{R_5}{C_1 \left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2} \right)} \frac{R_5}{2C_3 R_3 \left(\frac{R_3 + R_4}{2R_4} \right)}. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) ММ исследуемой метрологической характеристики этого модуля, а именно основной относительной погрешности, представляется в виде

$$\begin{cases} \delta = \frac{K_{p \text{ ном}} - K_{p \text{ расч}}}{K_{p \text{ ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p = \frac{R_5}{C_1 \left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2} \right)} \frac{R_5}{2C_3 R_3 \left(\frac{R_3 + R_4}{2R_4} \right)}, \end{cases} \quad (5)$$

где $K_{p \text{ ном}}$, $K_{p \text{ расч}}$ – номинальный и расчетный коэффициенты передачи модулей соответственно.

С использованием статистического моделирования основной относительной погрешности строится ММ изменения во времени МХ проектируемого модуля вида (2). Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 7,245 \cdot 10^{-15} t^3 + 9,921 \cdot 10^{-11} t^2 + 5,377 \cdot 10^{-7} t + 0,032; \\ m_\delta(t) = 5,698 \cdot 10^{-15} t^3 - 2,063 \cdot 10^{-11} t^2 + 4,751 \cdot 10^{-7} t + 0,005; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 4,247 \cdot 10^{-15} t^3 - 0,224 \cdot 10^{-12} t^2 + 1,337 \cdot 10^{-7} t - 0,004. \end{cases} \quad (6)$$

Определение с учетом выражения (6) величин МР с помощью экстраполяции функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, $m_\delta(t)$, на область будущих значений времени эксплуатации и с учетом условия (3), показывает, что с доверительной вероятностью $P = 0,997$ МР рассматриваемого модуля составляет 32 900 ч.

Рассмотрим модуль буферного усилителя, структурная схема которого представлена на рис. 4.

Составим ММ функционирования модуля. Так как сопротивление буферного усилителя очень велико, а его инвертирующий вход практически не потребляет ток, то

$$I_1 = I_2, \quad (7)$$

где I_1 , I_2 – токи, проходящие через резисторы R_1 и R_2 соответственно.

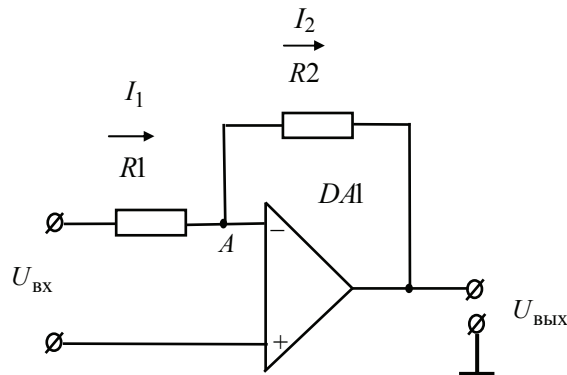


Рис. 4. Структурная схема буферного усилителя

Значения токов определяются следующим образом:

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R_1}; \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}, \quad (9)$$

где U_A – напряжение, действующее в точке A , определяемое по выражению

$$U_A = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}, \quad (10)$$

где K_0 – коэффициент усиления буферного усилителя.

Подставляя выражения (8) и (9) в равенство (7), получаем

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R_1} = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}. \quad (11)$$

Осуществив замену в (11) в соответствии с (10), имеем следующее равенство

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}}{R_1} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}. \quad (12)$$

После деления обеих частей (12) на $U_{\text{ВХ}}$ получаем соотношение

$$\frac{1 - \frac{K_p}{K_0}}{R_1} = \frac{\frac{K_p}{K_0} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2}. \quad (13)$$

где $K_p = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$.

Таким образом, получим выражение для расчета коэффициента передачи инвертирующего усилителя

$$K_p = \frac{R_2}{\frac{R_2}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right) R_1}. \quad (14)$$

Математическая модель функционирования буферного усилителя имеет вид

$$K_p(t) = \frac{R_2(t)}{\frac{R_2(t)}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right) R_1(t)}. \quad (15)$$

Соответственно, математическая модель основной относительной погрешности модуля буферного усилителя запишется в виде

$$\left\{ \begin{aligned} \delta(t) &= \frac{K_{p \text{ ном}} - K_p(t)}{K_{p \text{ ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p(t) &= \frac{R_2(t)}{\frac{R_2(t)}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right) R_1(t)}. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

Статистическое моделирование значений исследуемой МХ в различные моменты времени его эксплуатации по данным об изменении во времени параметров элементной базы модуля позволяет построить ММ изменения во времени основной относительной погрешности модуля буферного усилителя в виде

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 6,50 \cdot 10^{-16} t^3 - 5,27 \cdot 10^{-12} t^2 + 2,79 \cdot 10^{-7} t + 1,92 \cdot 10^{-2}; \\ m_{\delta}(t) = 9,22 \cdot 10^{-16} t^3 - 7,33 \cdot 10^{-12} t^2 + 3,97 \cdot 10^{-7} t + 2,47 \cdot 10^{-2}; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 1,19 \cdot 10^{-15} t^3 - 9,41 \cdot 10^{-12} t^2 + 5,16 \cdot 10^{-7} t + 3,02 \cdot 10^{-2}. \end{cases} \quad (17)$$

Определение с учетом выражения (16) и условия (3) величины МР с помощью экстраполяции функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, $m_{\delta}(t)$ на область будущих значений времени эксплуатации показывает, что с доверительной вероятностью $P = 0,997$ МР рассматриваемого модуля составляет 24 600 ч.

Следующим модулем, составляющим ИК АЦП, является модуль преобразования, математическое моделирование которого осуществляется на основе анализа его структурной схемы (рис. 5).

Работа данного преобразователя основана на принципе баланса зарядов. Вначале ток $I_{\text{вх}}$, пропорциональный входному напряжению, проходит через резистор R , заряжая конденсатор C . По мере накопления заряда на конденсаторе интегратора $И$, выходное напряжение входного операционного усилителя возрастает. Когда выходное напряжение операционного усилителя проходит ноль, срабатывает компаратор $К$ и одновибратор вырабатывает одиночный импульс длительностью t_{OS} и на время импульса замыкает ключ S . За это время ток $(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})$ проходит через конденсатор интегратора. Тем самым конечная величина заряда, прошедшая через конденсатор за время данного цикла, равна $(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})t_{OS}$. После размыкания ключа S конденсатор вновь начинает заряжаться и возвращается обратно к начальному значению, после чего опять срабатывает компаратор $К$, и цикл повторяется вновь. Тем самым заряд, выходящий из конденсатора C , равен заряду, полученному конденсатором в каждом цикле:

$$(I_{\text{оп}} - I_{\text{вх}})t_{OS} = I_{\text{вх}} \left(\frac{1}{f_{\text{вых}}} - t_{OS} \right). \quad (18)$$

где $f_{\text{вых}}$ – выходная частота; $I_{\text{оп}}$ – источник опорного тока.

Для исследования МР преобразователя вначале получим зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения.

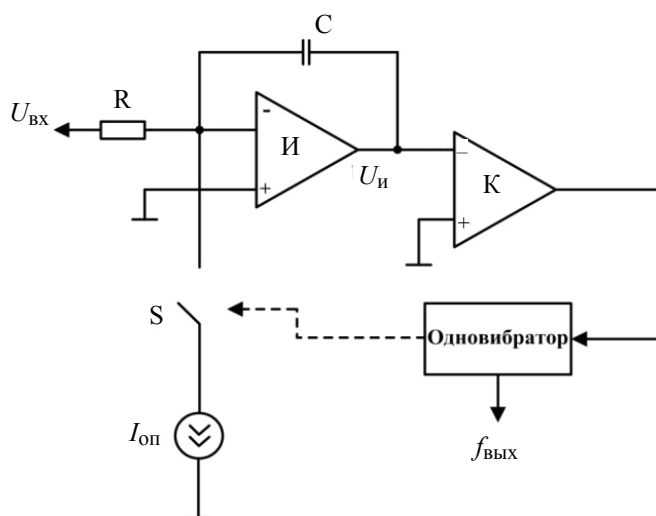


Рис. 5. Структурная схема преобразователя

Входной ток $I_{\text{вх}}$ пропорционален входному напряжению

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_1. \quad (19)$$

Поделив правую и левую части уравнения баланса зарядов (18) на $I_{\text{вх}}$ и преобразовав, получим

$$f_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{вх}}}{I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{ос}}}. \quad (20)$$

С учетом (19) уравнение (20) примет вид

$$f_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 I_{\text{оп}}} \frac{1}{t_{\text{ос}}}. \quad (21)$$

Параметры источника тока $I_{\text{оп}}$ задаются следующими элементами: R_6 , R_7 задают рабочую точку транзистора VT2; R_8 задает ток эмиттера. Уравнение, описывающее работу источника тока, имеет вид

$$I_{\text{оп}} = \frac{2U_{\text{п}} \frac{R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}}{R_8}, \quad (22)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания схемы (в данном случае ± 15 В); $U_{\text{БЭ}}$ – напряжение падения на $(p-n)$ -переходе транзистора VT2 ($\approx 0,7$ В).

Длительность импульса одновибратора в основном определяется постоянной времени цепочки $C_3 R_3$

$$t_{\text{ос}} = C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{ВД1}}}{U_{\text{ОУ max}}} \right) \right], \quad (23)$$

где $U_{\text{ВД1}}$ – напряжение падения на открытом диоде ($\approx 0,7$ В); $U_{\text{ОУ max}}$ – максимальное выходное напряжение ОУ (амплитуда на выходе современных ОУ близка к напряжению питания и составляет $U_{\text{п}} \approx 1$ В).

Запишем уравнение (21) с учетом (22) и (23) и получим конечное уравнение, описывающее зависимость выходной частоты преобразователя от входного напряжения

$$f_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{\text{БЭ}}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{\text{ВД1}}}{U_{\text{ОУ max}}} \right) \right]}. \quad (24)$$

Нормируемой МХ исследуемого преобразователя является основная относительная погрешность, вычисляемая по следующей формуле

$$\delta = \frac{f_{\text{вых. изм}} - f_{\text{вых. расч}}}{f_{\text{вых. расч}}} \cdot 100\%, \quad (25)$$

где $f_{\text{вых. изм}}$, $f_{\text{вых. расч}}$ – измеренное и рассчитанное значения выходной частоты.

Коэффициент преобразования модуля запишется в виде

$$K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{\Pi} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}}{R_8}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OY_{\max}}} \right) \right]}. \quad (26)$$

Окончательно математическая модель нормируемой МХ преобразователя имеет следующий вид

$$\begin{cases} \delta = \frac{K_{p \text{ ном}} - K_p(t)}{K_{p \text{ ном}}} \cdot 100\%; \\ K_p = \frac{1}{R_1 \frac{U_{\Pi} \frac{2R_7}{R_6 + R_7} + U_{БЭ}}{R_8}} \frac{1}{C_3 R_3 \ln \left[\left(1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \left(1 + \frac{U_{VD1}}{U_{OY_{\max}}} \right) \right]} \end{cases} \quad (27)$$

Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности исследуемого модуля буферного усилителя имеет вид

$$\begin{cases} \psi_{-\sigma}(t) = 129,03 - 1,751 \cdot 10^{-3}t - 3,737 \cdot 10^{-10}t^2; \\ m_{\delta}(t) = 129,9303 - 1,75 \cdot 10^{-3}t + -3,736 \cdot 10^{-10}t^2; \\ \psi_{+\sigma}(t) = 130,806 - 1,749 \cdot 10^{-3}t - 3,735 \cdot 10^{-10}t^2. \end{cases} \quad (28)$$

С использованием выражений (28) и (3) величина МР данного модуля равна $t_p = 23\,000$ ч с доверительной вероятностью $P = 0,997$.

Полученные значения МР для каждого из аналоговых модулей, составляющих измерительный канал, дают возможность согласно выражению (1) определить МР всего блока в целом. Величина МР для АЦП в целом составляет 23 000 ч. Таким образом, применение метода аналитико-вероятностного прогнозирования с использованием при его реализации приемов математического моделирования позволяет дать вероятностную оценку показателей МН блока АЦП уже на начальных этапах его проектирования при минимальной априорной информации.

Список литературы

1. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
3. Чернышова, Т. И. Применение математического моделирования при реализации методов оценки и повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 381 – 387. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387

Metrological Reliability Assessment of Analog-to-Digital Converter in the Structure of the Information-Measuring System at the Design Stage

T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov, M. A. Kamenskaya

*Department of Designing Radio-Electronic and Microprocessor Systems,
TSTU, Tambov, Russia; romankurnosov@yandex.ru*

Keywords: analog-to-digital converter; measuring channel; information measuring system; metrological reliability; metrological characteristic.

Abstract: A mathematical model of the time variation of the metrological characteristics of electronic measuring instruments (EMIs) is proposed. It is used to assess the metrological reliability indicators required in a specific formulation of the prediction problem. Mathematical models of modules of the designed block of the analog-digital converter included in the EMIs structure are given.

References

1. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli ob"ektov, protsedur i sredstv izmerenii. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models of objects, procedures and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis], St. Petersburg, 2014, 293 p. (In Russ.)
2. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. [Mathematical modeling of metrological characteristics in assessing the metrological reliability of electronic measuring instruments], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 209-215, doi: 10.17277/vestnik.2017.02. pp. 209-215 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of mathematical modeling in the implementation of methods for assessing and improving the metrological resource of analog blocks of information-measuring systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-387, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387 (In Russ., abstract in Eng.)

Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit des Analog-Digital-Wandlers in der Struktur des Informations-und Messsystems in der Entwurfsphase

Zusammenfassung: Es ist ein mathematisches Modell zur Änderung des zeitlichen Verlaufs der messtechnischen Eigenschaften der elektronischen Messgeräte (EIS) vorgeschlagen, das ermöglicht, die in der bestimmten Aufgabenstellung des Vorhersagens erforderlichen messtechnischen Zuverlässigkeitsindikatoren zu bewerten. Angegeben sind mathematische Modelle von Modulen des entworfenen Blocks des Analog-Digital-Wandlers, der in der EIS-Struktur enthalten ist.

Évaluation de la fiabilité métrologique du convertisseur analogique-numérique dans la structure du système d'information et de mesure à l'étape de la phase de la conception

Résumé: Est proposé un modèle mathématique de l'évolution dans le temps des caractéristiques métrologiques des instruments de mesure électroniques (IME), permettant d'évaluer les indicateurs de la fiabilité métrologique qui sont exigés dans la situation donnée. Sont cités les modèles mathématiques des modules de l'unité conçue du convertisseur analogique-numérique qui fait partie de la structure IME.

Авторы: *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники; *Курнос Роман Юрьевич* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Каменская Мария Анатольевна* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВОЗДУШНОГО СУДНА В УГЛОМЕРНОМ КАНАЛЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В. Н. Глистин, Ю. Н. Панасюк

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; glistinwadim@mail.ru*

Ключевые слова: воздушные суда; информационно-измерительные системы; модель; оптимальная фильтрация; угломерный канал.

Аннотация: Представлены и обоснованы векторы состояния и наблюдения перемещения воздушного судна, а также разработанный алгоритм функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы (ИИС), с учетом динамических характеристик воздушных судов. Проведено имитационное моделирование на ЭВМ разработанного алгоритма, и представлены результаты исследования алгоритма функционирования угломерного канала ИИС.

В настоящий момент одним из методов повышения точности определения угловых координат воздушного судна (ВС) в информационно-измерительной системе (ИИС) является применение различных алгоритмов обработки радиолокационной информации. Многие алгоритмы [1] используют дополнительную информацию от бортовых датчиков воздушного судна, описывающих его различные параметры и характеристики, поступающих в ИИС не только от радиолокационных измерителей.

Проблемой алгоритмов вторичной обработки информации в ИИС, в частности посадочных радиолокационных станций, является применение моделей состояния и наблюдения использующих, как правило, только кинематические характеристики движения ВС. Погрешности определения координат ВС ИИС [2], алгоритм функционирования фильтров вторичной обработки радиолокационной информации которых основан на кинематических моделях, особенно заметны при выполнении ВС маневра [3], когда силы воздействующие на него значительно изменяются.

Учесть изменение скорости ВС по величине и направлению и уменьшить величину ошибок определения угловых координат ВС позволят модели состояния, в основу которых положены векторы перегрузок.

Цель работы – синтез алгоритма функционирования угломерного канала ИИС с учетом динамики движения ВС.

Алгоритмы фильтрации, основанные на моделях, учитывающих динамические и кинематические характеристики перемещения ВС, позволят ИИС повысить точность определения угловых координат ВС, в частности при выполнении им маневра «посадка».

В целях определения динамических характеристик движения ВС выведено выражение с составляющими векторов перегрузок, определяющее приращение скорости изменения азимута ВС

$$\varpi_{\Gamma} = \arctg \left[\left(\left(\left(g \left((\sin(\varphi) \sin(\theta) - \cos(\varphi) \sin(\theta)) (n_{ya} \cos(\gamma_a) - n_{za} \sin(\gamma_a)) + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + n_{xa} \cos(\theta) (\cos(\varphi) - \sin(\varphi)) + (\sin(\varphi) + \cos(\varphi)) (n_{ya} \sin(\gamma_a) + n_{za} \cos(\gamma_a)) \right) \right)^2 - \right. \\ \left. \left. -(a_{JB} \cos(\varepsilon_B))^2 \right)^{0,5} \right] / (D \cos \varepsilon_B), \quad (1)$$

где D – дальность до воздушного судна по линии визирования, определяемое РЛС; θ , φ – углы наклона и поворота траектории ВС соответственно; ε_B – угол места; $a_{дв}$ – ускорение воздушного судна по линии визирования, определяемое в дальномерном канале РЛС; g – ускорение свободного падения; n_{xa} , n_{ya} , n_{za} – продольная, нормальная и боковая перегрузки ВС соответственно; γ_a – скоростной угол крена.

Учитывая выражение (1), предложены следующие декомпозированные вектора моделей состояния $\mathbf{x}$ и наблюдения $\mathbf{z}$:

– дальности, скорости и ускорения:

$$\mathbf{x}_D = [D \ V \ a]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{z}_D = D_{\mathbf{u}}; \quad (3)$$

– тангенциальной перегрузки и скорости изменения вектора тангенциальной перегрузки:

$$\mathbf{X}_{nx} = \begin{bmatrix} n_{xa} & \omega_{nx} \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_{n\chi} = n_{\chi q\mathbb{H}}; \quad (5)$$

– нормальной перегрузки и скорость изменения вектора нормальной перегрузки:

$$\mathbf{x}_{nv} = [n_{vg} \ \omega_{nv}]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{z}_{ny} = n_{yqH}; \quad (7)$$

– боковой перегрузки и скорость изменения вектора боковой перегрузки:

$$\mathbf{X}_{nz} = [n_{za} \ \mathbf{0}_{nz}]^T, \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_{nz} = n_{zaw}; \quad (9)$$

– скоростного угла крена и скорость изменения скоростного угла крена цели:

$$\mathbf{X}_\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_a & \mathbb{O}_{\gamma a} \end{bmatrix}^\top, \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_\gamma = \gamma_{a\mathbb{H}}; \quad (11)$$

- угла наклона и скорости изменения угла наклона цели:

$$\mathbf{x}_\theta = [\theta \ \omega_\theta]^T, \quad (12)$$

$$\mathbf{z}_\theta = \theta_u; \quad (13)$$

– путевого угла и угловой скорости путевого угла цели:

$$\mathbf{x}_\varphi = [\varphi \ \omega_\varphi]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{z}_{\mathcal{Q}} = \mathbf{0}_{\mathcal{H}}; \quad (15)$$

$$\Delta \varepsilon_{\Gamma}(k+1) = \varepsilon_{\Gamma \Pi}(k+1) - \varepsilon_{\Gamma \Xi}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла наклона линии визирования и скорости его изменения в вертикальной плоскости:

$$\varepsilon_{\text{BO}}(k+1) = \varepsilon_{\text{B}\Xi}(k+1) + K_{\varepsilon \text{B}11}(k+1)\Delta \varepsilon_{\text{B}}(k+1);$$

$$\omega_{\text{BO}}(k+1) = \omega_{\text{B}\Xi}(k+1) + K_{\varepsilon \text{B}21}(k+1)\Delta \varepsilon_{\text{B}}(k+1);$$

$$\varepsilon_{\text{B}\Xi}(k+1) = \varepsilon_{\text{BO}}(k) + \omega_{\text{BO}}(k)\tau;$$

$$\omega_{\text{B}\Xi}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{фB}}\tau)\omega_{\text{BO}}(k);$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{B}}(k+1) = \varepsilon_{\text{B}\Pi}(k+1) - \varepsilon_{\text{B}\Xi}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки угла наклона и скорости изменения угла наклона цели:

$$\theta_{\text{O}}(k+1) = \theta_{\text{O}\Xi}(k+1) + K_{\theta11}(k+1)\Delta \theta(k+1);$$

$$\omega_{\theta_{\text{O}}}(k+1) = \omega_{\theta_{\text{O}\Xi}}(k+1) + K_{\theta21}(k+1)\Delta \theta(k+1);$$

$$\theta_{\text{O}\Xi}(k+1) = \theta_{\text{O}}(k) + \omega_{\theta_{\text{O}}}(k)\tau;$$

$$\omega_{\theta_{\text{O}\Xi}}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{ф}\theta}\tau)\omega_{\theta_{\text{O}\Xi}}(k);$$

$$\Delta \theta(k+1) = \theta_{\text{H}}(k+1) - \theta_{\text{O}\Xi}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки путевого угла и скорости изменения путевого угла цели:

$$\varphi_{\text{O}}(k+1) = \varphi_{\text{O}\Xi}(k+1) + K_{\varphi11}(k+1)\Delta \varphi(k+1);$$

$$\omega_{\varphi_{\text{O}}}(k+1) = \omega_{\varphi_{\text{O}\Xi}}(k+1) + K_{\varphi21}(k+1)\Delta \varphi(k+1);$$

$$\varphi_{\text{O}\Xi}(k+1) = \varphi_{\text{O}}(k) + \omega_{\varphi_{\text{O}}}(k)\tau;$$

$$\omega_{\varphi_{\text{O}\Xi}}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{ф}\varphi}\tau)\omega_{\varphi_{\text{O}\Xi}}(k);$$

$$\Delta \varphi(k+1) = \varphi_{\text{H}}(k+1) - \varphi_{\text{O}\Xi}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки скоростного угла крена и скорости изменения скоростного угла крена цели:

$$\gamma_{a_{\text{O}}}(k+1) = \gamma_{a_{\text{O}\Xi}}(k+1) + K_{\gamma11}(k+1)\Delta \gamma_a(k+1);$$

$$\omega_{\gamma_{a_{\text{O}}}}(k+1) = \omega_{\gamma_{a_{\text{O}\Xi}}}(k+1) + K_{\gamma21}(k+1)\Delta \gamma_a(k+1);$$

$$\gamma_{a_{\text{O}\Xi}}(k+1) = \gamma_{a_{\text{O}}}(k) + \omega_{\gamma_{a_{\text{O}}}}(k)\tau;$$

$$\omega_{\gamma_{a_{\text{O}\Xi}}}(k+1) = (1 - \alpha_{\gamma}\tau)\omega_{\gamma_{a_{\text{O}}}}(k);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора тангенциальной перегрузки и скорости изменения вектора тангенциальной перегрузки:

$$n_{xa_{\text{O}}}(k+1) = n_{xa_{\text{O}\Xi}}(k+1) + K_{n_{xa}11}(k+1)\Delta n_{xa}(k+1);$$

$$\omega_{n_{xa_{\text{O}}}}(k+1) = \omega_{n_{xa_{\text{O}\Xi}}}(k+1) + K_{n_{xa}21}(k+1)\Delta n_{xa}(k+1);$$

$$n_{xa_{\text{O}\Xi}}(k+1) = n_{xa_{\text{O}}}(k) + \omega_{n_{xa_{\text{O}}}}(k)\tau;$$

$$\omega_{n_{xa_{\text{O}\Xi}}}(k+1) = (1 - \alpha_{\text{ф}n_x}\tau)\omega_{n_{xa_{\text{O}}}}(k);$$

$$\Delta n_{xa}(k+1) = n_{xa_{\text{H}}}(k+1) - n_{xa_{\text{O}\Xi}}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора нормальной перегрузки и скорости изменения вектора нормальной перегрузки:

$$n_{ya_{\text{O}}}(k+1) = n_{ya_{\text{O}\Xi}}(k+1) + K_{n_{ya}11}(k+1)\Delta n_{ya}(k+1);$$

$$\omega_{n_{ya_{\text{O}}}}(k+1) = \omega_{n_{ya_{\text{O}\Xi}}}(k+1) + K_{n_{ya}21}(k+1)\Delta n_{ya}(k+1);$$

$$n_{ya_3}(k+1) = n_{ya_0}(k) + \omega_{ny_0}(k)\tau;$$

$$\omega_{ny_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_{ny}}\tau)\omega_{ny_0}(k);$$

$$\Delta n_{ya}(k+1) = n_{ya_{и}}(k+1) - n_{ya_3}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки вектора боковой перегрузки и скорости изменения вектора боковой перегрузки:

$$n_{za_0}(k+1) = n_{za_3}(k+1) + K_{n_{za}11}(k+1)\Delta n_{za}(k+1);$$

$$\omega_{nz_0}(k+1) = \omega_{nz_3}(k+1) + K_{n_{za}21}(k+1)\Delta n_{za}(k+1);$$

$$n_{za_3}(k+1) = n_{za_0}(k) + \omega_{nz_0}(k)\tau;$$

$$\omega_{nz_3}(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_{nz}}\tau)\omega_{nz_0}(k);$$

$$\Delta n_{za}(k+1) = n_{za_{и}}(k+1) - n_{za_3}(k+1);$$

– алгоритм фильтрации для оценки дальности, скорости и ускорения цели:

$$D_0(k+1) = D_3(k+1) + K_{D11}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$V_0(k+1) = V_3(k+1) + K_{D21}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$a_0(k+1) = a_3(k+1) + K_{D31}(k+1)\Delta D(k+1);$$

$$D_3(k+1) = D_0(k) + V_0(k)\tau + 0,5a_0(k)\tau^2;$$

$$V_3(k+1) = V_0(k) + a_0(k)\tau;$$

$$a_3(k+1) = (1 - \alpha_{\phi_D}\tau)a_0(k);$$

$$\Delta D(k+1) = D_{и}(k+1) - D_3(k+1),$$

где k – номер дискреты времени; τ – период дискретизации; α_{ϕ} – постоянная маневра соответствующей величины; Δ – символ, обозначающий невязку измерений соответствующей величины; символы с индексами «э», «о» – экстраполированные и оцененные значения соответствующих величин.

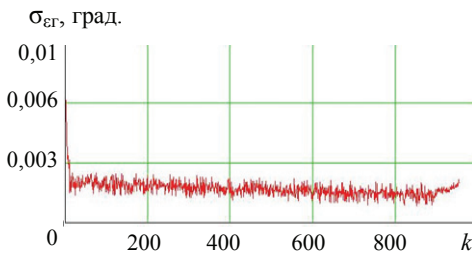


Рис. 1. Зависимость СКО измерения азимута ВС от дискрета времени

В целях оценки точностных характеристик синтезированного алгоритма выполнено имитационное моделирование на ЭВМ угломерного информационно-измерительного устройства, следящего за выполнением ВС маневра «посадка». Результаты моделирования в виде зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) азимута ВС от номера дискрета времени приведены на рис. 1.

Результаты имитационного моделирования позволяют заметить, что алгоритмы, использующие данные о динамических характеристиках перемещения ВС, позволяют уменьшить значение СКО, в сравнении с алгоритмами, не использующими дополнительную динамическую информацию о ВС [4]. Данный факт особенно заметен при выполнении ВС динамичного маневра, что объясняется более точной экстраполяцией скорости изменении азимута ВС. Повышение точности угломерных каналов ИИС позволяет повысить пропускную способность ВС при заданном уровне безопасности.

Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
2. Чернышова, Т. И. Применение математического моделирования при реализации методов оценки и повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 381 – 387. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387
3. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконfigurацией модели / С. Н. Данилов, Р. А. Ефремов, Н. А. Кольтюков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 418 – 423. doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423
4. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконfigurации / А. В. Иванов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 572 – 577. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577

Application of Dynamic Aircraft Data in the Goniometric Channel of Information-Measuring Systems

V. N. Glistin, Yu. N. Panasyuk

*Department of Radio Engineering, TSTU,
Tambov, Russia; glistinwadim@mail.ru*

Keywords: aircraft; information and measuring systems; model; optimal filtering; goniometer channel.

Abstract: Vectors of state and observation of the aircraft movement are presented and substantiated; the algorithm for the operation of the goniometric channel of the information-measuring system (IMS), taking into account the dynamic characteristics of aircraft is developed. Computer simulation of the developed algorithm was carried out, and the results of the research into the algorithm of the IMS angular reference channel are presented.

References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnyye metody obrabotki informatsii v radio-tekhnicheskikh sistemakh* [Perspective methods of information processing in radio-technical systems], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)

2. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of mathematical modeling in the implementation of methods for assessing and improving the metrological resource of analog blocks of information-measuring systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-387, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Danilov S.N., Yefremov R.A., Kol'tyukov N.A. [The tracking algorithm with model reconfiguration], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 418-423, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.418-423 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Moskvitin S.P., Chernyshov V.N. [Accuracy characteristics of navigation systems using the integrity control of satellite radio navigation systems for reconfiguration], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 572-577, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.572-577 (In Russ., abstract in Eng.)

Die Verwendung der dynamischen Daten des Luftfahrzeugs im Winkelmesskanal von Informations-und Messsystemen

Zusammenfassung: Es sind die Vektoren des Zustandes und der Beobachtung der Bewegung des Luftfahrzeugs, sowie auch der entwickelte Algorithmus für das Funktionieren des Winkelmesskanals des Informations-und Messsystems (IMS) unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Luftfahrzeuge präsentiert und begründet. Es ist das Simulationsmodellieren des entwickelten Algorithmus auf dem Computer durchgeführt und die Ergebnisse der Untersuchung des Funktionierens des Algorithmus des Winkelkanals IIS sind vorgestellt worden.

Application des données dynamiques de l'aéronef dans le canal angulaire des systèmes d'information et de mesure

Résumé: Sont présentés et justifiés des vecteurs d'état et d'observation de la marche de l'aéronef ainsi que l'algorithme du fonctionnement du canal angulaire du système d'information et de mesure (SIM) en tenant compte des caractéristiques dynamiques des aéronefs. Est effectuée la simulation sur l'ordinateur de l'algorithme élaboré et sont présentés les résultats de l'étude de l'algorithme du fonctionnement du contrôleur angulaire IIS.

Авторы: *Глистин Вадим Николаевич* – аспирант кафедры «Радиотехника»; *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И. Г. Рязанов, Н. Г. Чернышов, Ю. Т. Зырянов, А. Ю. Наумова

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; chief.ryazanoff2012@yandex.ru*

Ключевые слова: нейронные сети; оптимальный период технического обслуживания; эффективность системы технического обслуживания.

Аннотация: Предложен подход для определения оптимальной периодичности технического обслуживания информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) с применением нейросетевых технологий, основанный на использовании фактических данных о текущем техническом состоянии ИИУС.

Введение

В настоящее время для успешной эксплуатации различных типов информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) необходима достоверная и оперативная оценка их технического состояния (ТС). В процессе функционирования ИИУС их ТС может изменяться от исправного до работоспособного, затем до неработоспособного. Состояния системы характеризуются ее параметрами в рассматриваемый момент времени, а для поддержания требуемого уровня надежности ИИУС на всех этапах эксплуатации проводят ее техническое обслуживание (ТО).

Несмотря на применение новых методов эксплуатации, в большинстве случаев отказы ИИУС носят стохастический характер, время возникновения которых затруднительно определить. Мероприятия, выполняемые в рамках ТО, не способны в полной мере предупредить внезапные отказы.

Задача управления техническим состоянием ИИУС и пути ее решения

При всех стратегиях ТО мероприятия по повышению надежности ИИУС, корректировка объемов и периодичности ТО осуществляется на основе анализа информации о характеристиках ТС ИИУС и эффективности управления ТС. Однако методы анализа и использования различных видов информации зависят от стратегий ТО [1]. Принципиально выделяются три основные стратегии технической эксплуатации ИИУС:

- по ресурсу (программное управление по разомкнутому циклу);
- уровню надежности параметров (управление по замкнутому циклу с обратной связью по информации о состоянии техники);
- состоянию с контролем параметров (управление по замкнутому циклу с обратной связью по информации о состоянии техники).

Информационно-измерительные и управляющие системы, эксплуатируемые без соответствующего ТО, стохастически переходят от одного состояния к другому естественным путем, пока не перейдут в состояние отказа.

Однако возможно регулировать поведение ИИУС путем выбора определенных мер в каждый момент принятия решения.

К таким мерам относятся:

- осмотр ИИУС;
- профилактические работы по поддержанию ТС ИИУС;
- различные виды ремонта ИИУС;
- замены элементов системы и другие меры, ведущие к восстановлению ИИУС.

Качество функционирования ИИУС можно определить затратами ресурсов, путем определения стоимости выполнения каждого вида работ. Процесс ТО или текущего ремонта выбираются при обнаружении предельного или неработоспособного состояния системы.

Различают две стратегии ТО по состоянию:

- с контролем параметров;
- с контролем уровня надежности.

При применении стратегии ТО с контролем параметров в эксплуатационной документации указывается предельное значение параметра, при достижении которого система считается неисправной, требующей регулировки или текущего ремонта. Данная стратегия позволяет обеспечить надежность ИИУС за счет раннего, до наступления отказа, обнаружения повреждений (дефектов) и повысить экономическую эффективность эксплуатации путем максимально возможного использования работоспособности ИИУС.

При применении стратегии ТО с контролем уровня надежности каждая система используется по назначению до отказа, после чего проводятся операции текущего ремонта. Операции ТО по поддержанию надежности назначаются по результатам контроля уровня надежности парка ИИУС, в том числе с использованием статистических методов контроля и регулирования качества продукции (например, путем проведения доработок). Они обеспечивают высокую экономическую эффективность эксплуатации ИИУС за счет полного использования работоспособного состояния каждой системы.

Внедрение стратегии ТО ИИУС, учитывающей фактическое техническое состояние позволяет сократить затраты, связанные с обслуживанием и ремонтом, на 20 – 50 % [2]. Основной целью внедрения стратегии ТО по состоянию является сокращение эксплуатационных расходов при обеспечении заданного уровня надежности.

Выигрыш может быть получен, если на начало проведения профилактических и восстановительных работ персонал будет располагать достоверными данными о фактическом и прогнозируемом состоянии ИИУС.

В качестве ИИУС, как объекта исследования, была выбрана система наведения и стабилизации панорамического визира (**СН и СПВ**), основной функцией которой является стабилизация зеркала, посредством которого осуществляется визирование. В основе функционирования СН и СПВ лежит гироскопический прибор, осуществляющий отслеживание перемещения зеркала в пространстве, передавая в систему управления данные о скорости и направлении перемещения. Также в рассматриваемой системе применяются два датчика (для вертикальной и горизонтальной плоскостей), задачей которых является отслеживание угловых положений зеркала. Опираясь на информацию, полученную от гироскопического датчика и датчиков угловых положений, система управления генерирует управляющие сигналы, подающиеся на исполняющие, которыми являются датчик стабилизации (для вертикальной плоскости) и редуктор на базе электродвигателя (для горизонтальной плоскости).

Таким образом, описываемая СН и СПВ представляет собой замкнутый контур стабилизации у которого есть измерительные каналы, передающие в систему управления информацию о перемещении и позиционировании зеркала, и управляющие, осуществляющие непосредственно перемещение зеркала посредством датчиков стабилизации (рис. 1).

Одной из существенных проблем эксплуатации СН и СПВ является сложность ее устройства, которая проявляется в применении прецизионной механики совместно с мощной аналоговой электроникой. При различных условиях эксплуатации воздействие внешних факторов может быть критично как для механических элементов СН и СПВ, так и для электроники, что в свою очередь обуславливает применение технической эксплуатации по состоянию (ТЭС).

Очевидно, что при решении задачи нахождения оптимального периода ТО при ТЭС, основные затруднения вызывает необходимость определения времени безотказной работы СН и СПВ.

При наличии нескольких определяющих параметров ТС параметрическая вероятность безотказной работы СН и СПВ определяется по формуле

$$P_{\text{пар}}(\tau_i) = \prod_{r=1}^M P_r(\tau_i), \quad (1)$$

где M – число определяющих предельное состояние параметров СН и СПВ; $P_r(\tau_i)$ – вероятность невыхода r -го определяющего параметра ТС за пределы допусков в течение прогнозируемого периода τ_i .

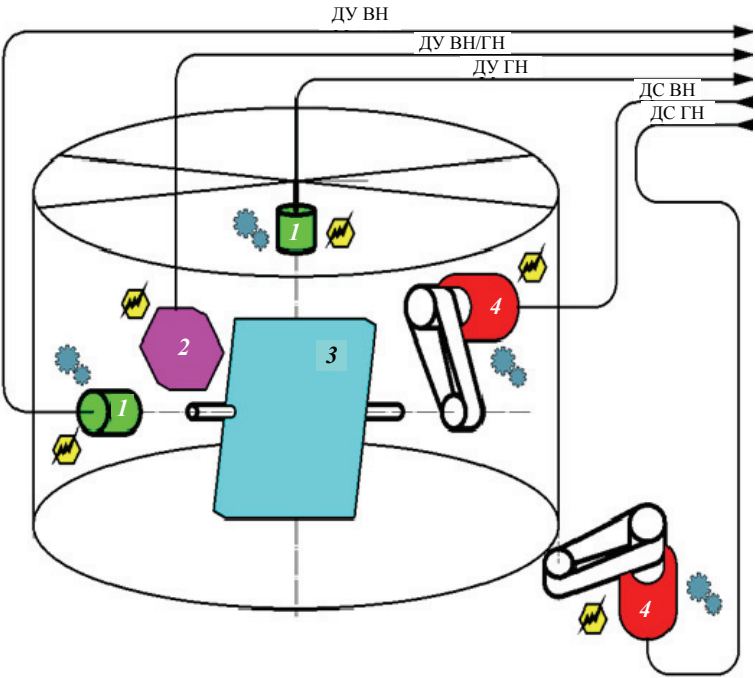


Рис. 1. Система наведения и стабилизации панорамического визира как сложная информационно-измерительная и управляющая система:
 1 – датчики угловых положений зеркала по вертикали и горизонту;
 2 – гироскопический датчик; 3 – зеркало; 4 – датчики стабилизации

Так как на процесс изменения параметров во времени влияет множество различных независимых факторов, то вероятность безотказной работы (невыхода параметров за пределы допуска) СН и СПВ по r -му определяющему параметру за время $T = t_n - t_{n-1}$ определяется как

$$P_r(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r^2(T)}} \int_{v_r^H}^{v_r^B} \exp\left\{-\frac{[v_r - \bar{v}_r(T)]^2}{2\sigma_r^2(T)}\right\} dv_r, \quad (2)$$

где t_{n-1} – момент времени проведения последнего измерения определяющего параметра; v_r^B и v_r^H – соответственно верхняя и нижняя границы допуска r -го определяющего предельное состояние системы параметра; $\bar{v}_r(t)$ – наиболее адекватная модель r -го определяющего ТС параметра; $\sigma_r^2(t)$ – дисперсия r -го определяющего параметра.

В известных работах формирование математических моделей изменения определяющих параметров во времени осуществлялось на основе методов анализа и прогнозирования временных рядов (метод группового учета аргументов, сингулярный спектральный анализ и т.д.) в области полиномов вида

$$v(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i + \sum_{j=2}^n b_j t^{j-1}, \quad i, j \in Z, \quad n \leq n_{\max}, \quad (3)$$

где a_i , b_j – неизвестные коэффициенты; Z – множество натуральных чисел; $n_{\max}$ – установленное значение максимальной степени полинома.

Расчет коэффициентов математических моделей проводится на основе обучающей части исходных данных объемом k_0 .

Эти методы определения оптимального периода ТО требуют для своей реализации больших объемов как временных, так и материальных затрат, а результаты могут значительно отличаться от значений, ввиду индивидуальных особенностей изделий, условий их эксплуатации, значения показателей надежности, зависящие от конструкции, внешних воздействий, принятой системы ТО и других факторов.

Как описано в [3, 4], одним из способов, которым возможно совершенствовать известные подходы, является применение нейросетевых технологий (НСТ), основным достоинством которых является динамическое саморегулирование во времени, учитывающее воздействие внешних воздействующих факторов.

Алгоритм построения моделей изменения определяющих параметров ИИУС на основе НТС будет основываться на нелинейной рекуррентной сети Элмана, которая получается из многослойного перцептрона введением обратных связей. Однако связи идут не от выхода сети, а от выходов внутренних нейронов. Это позволяет учесть предысторию наблюдаемых процессов и накопить информацию для формирования адекватной модели изменения параметров во времени. Рассмотрим математическую модель данной сети:

$$\begin{aligned} LW^{2,1} &= S^1(IW^{1,1} + LW^{1,1} + b^1); \\ \bar{v}(t) &= S^2(LW^{2,1} + b^2), \end{aligned} \quad (4)$$

где $IW^{1,1}$ – вектор входных данных; $LW^{1,1}$, $LW^{2,1}$ – вектора весовых коэффициентов внутреннего и внешнего слоев соответственно; S^1 и S^2 – функции активации внутреннего и внешнего слоев соответственно.

Применение данного типа НСТ на этапе построения моделей изменения определяющих параметров СН и СПВ и построенной модели в системе функционирования нелинейной авторегрессионной сети позволит учитывать различные воздействия внешних факторов, характерных для разных условий эксплуатации. На рисунке 2, а, представлена структура нелинейной рекуррентной сети Элмана.

Нелинейная авторегрессионная сеть основана на следующей структуре (рис. 2, б).

$$\begin{aligned} LW^{2,1} &= S^1(IW^{1,1} + LW^{1,3} + b^1); \\ \bar{v}(t+1) &= S^2(LW^{2,1} + b^2), \end{aligned} \tag{5}$$

где $LW^{1,3}$ – вектор весовых коэффициентов внутреннего слоя.

В основе функционирования предлагаемой интеллектуальной системы лежит алгоритм, основанный на следующем: учитывая априорную информацию об объекте управления $S(t)$, нейронная рекуррентная сеть проводит построение модели изменения определяющих параметров объекта $\bar{v}(t)$, учитывая обучающую выборку; затем полученная модель изменения определяющих параметров применяется в нелинейной авторегрессионной сети, результатом работы которой является прогноз изменения определяющих объект параметров на период времени $(t+n)$.

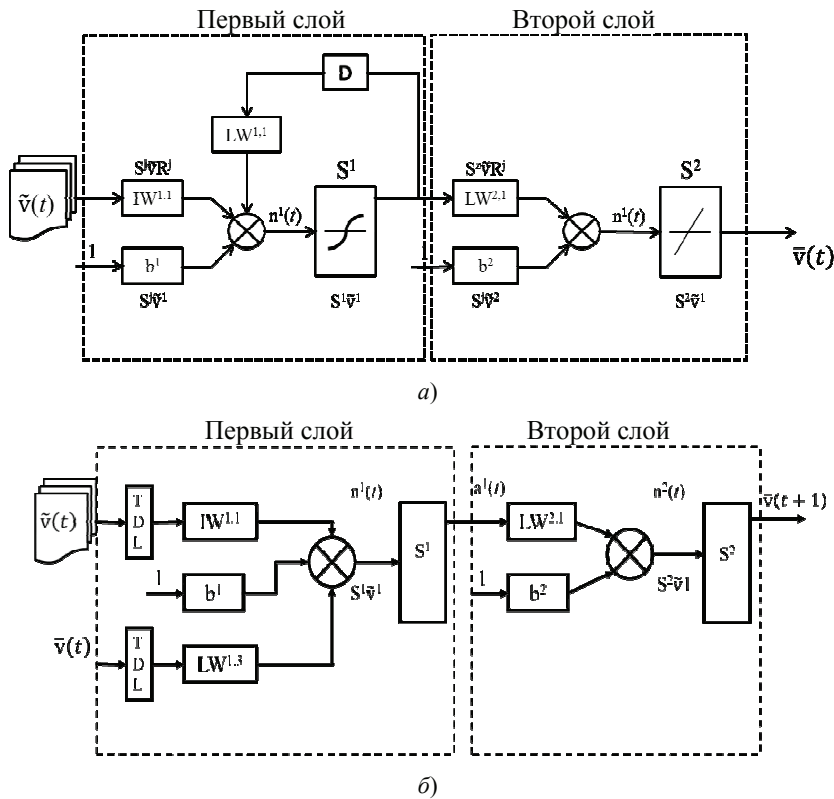


Рис. 2. Структура нелинейной рекуррентной сети Элмана (а) и нелинейной авторегрессионной сети (б)

На основе разработанных алгоритмов для оценки ТС в реальных масштабах времени и с учетом данных эксплуатации СН и СПВ проведено имитационное моделирование, позволяющее определить оптимальный период ТО.

Предлагаемая структура интеллектуальной системы для построения моделей изменения определяющих параметров представлена на рис. 3.

Структура нелинейной рекуррентной сети, выбранной для реализации описываемой интеллектуальной системы, имеет 30 «нейронов» в первом слое и 8 «нейронов» во втором. Для обучения полученной нейронной сети взяты исходные данные, полученные в процессе проведения испытаний СН и СПВ. За определяющий параметр выбран «потребление тока», который характеризует степень износа основных механических элементов редуктора. На основе исходных данных была обучена рекуррентная нейронная сеть Элмана, которая легла в основу определения модели изменения определяющего параметра во времени. Результаты моделирования изменения параметра «потребление тока» во время наработки (τ , усл. ед. времени) представлены на рис. 4.

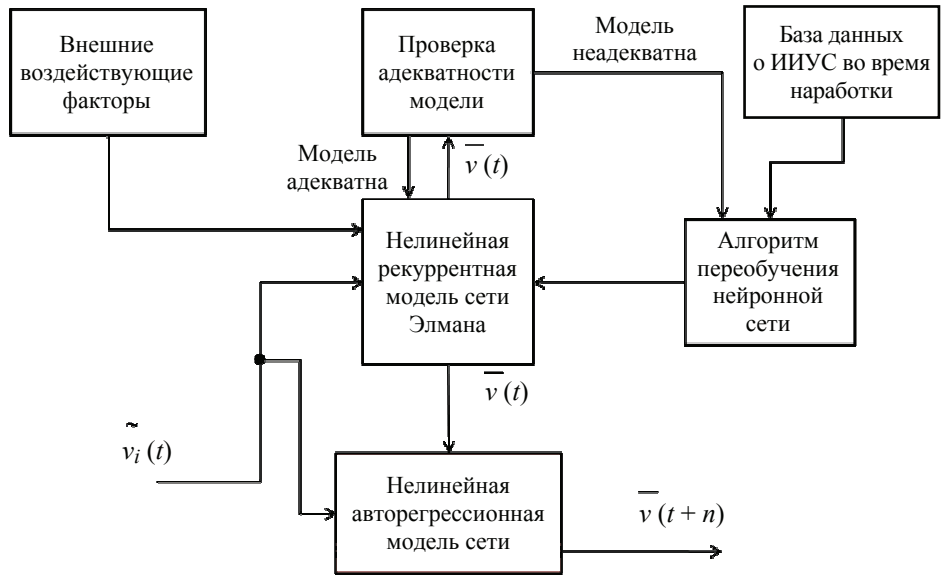


Рис. 3. Структура интеллектуальной системы построения моделей изменения определяющих параметров

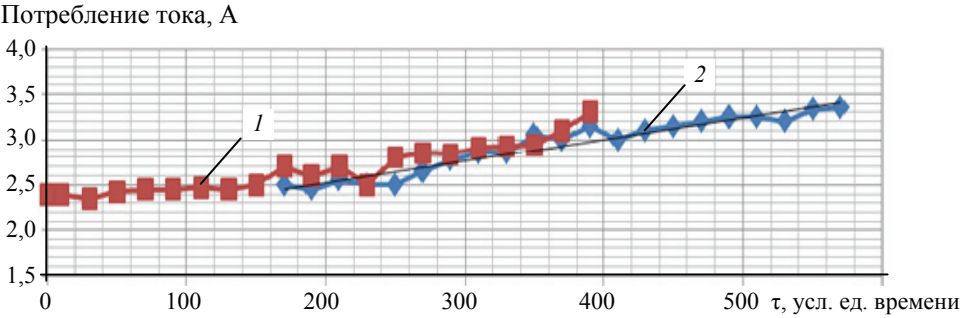


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования работы СН и СПВ (1) и прогноз изменения определяющего параметра системы (2)

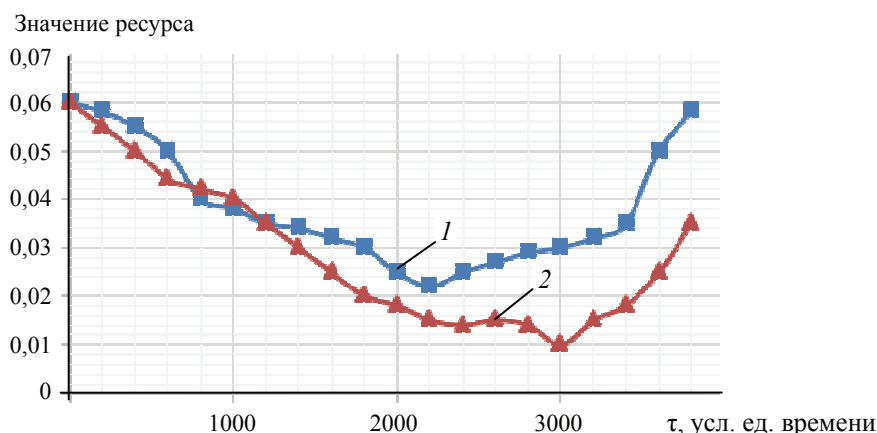


Рис. 5. Оценка эффективности применяемого метода определения оптимального периода ТО (1) в сравнении с исходным способом (2)

По итогам функционирования разработанной интеллектуальной системы можно сделать заключение об адекватности построенных моделей изменения определяющих параметров ИИУС (СН и СПВ).

Оценка эффективности применяемых методов определения оптимального периода ТО проведена по критерию относительного непроизводительно расходуемого ресурса СН и СПВ $R_{отн}$. Эффективность предлагаемого метода сравнили со способом-прототипом. На рисунке 5 представлены результаты оценки эффективности предложенного подхода.

Вывод

Ошибка определения оптимального периода технического обслуживания СН и СПВ по известному способу-прототипу, по сравнению с предлагаемым методом

$$\Delta = \frac{\tau_{3000} - \tau_{2200}}{\tau_{3000}} \cdot 100 \% = \frac{3000 - 2200}{3000} \cdot 100 \% = 26,67 \% . \quad (8)$$

Относительный выигрыш в величине относительного непроизводительно расходуемого ресурса СН и СПВ

$$\Lambda = \frac{R_{отн}(\tau_{2200})}{R_{отн}(\tau_{3000})} = \frac{0,0225}{0,01} = 2,25. \quad (9)$$

Как видно из графиков, показанных на рис. 6, применение интеллектуальной системы повысило точность определения расходуемого ресурса на 26,67 %, что в свою очередь позволяет сформировать алгоритм оптимального управления техническим состоянием СН и СПВ.

Список литературы

1. Зырянов, Ю. Т. Планирование профилактики в организационно-технических системах / Ю. Т. Зырянов, К. А. Малыков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 410 – 420.

2. Rastegari, Ali. Condition based maintenance in the manufacturing industry from strategy to implementation / Ali Rastegari. – Mälardalen Universet, Sweden, 2017. – 106 p.

3. Артемова, С. В. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления / С. В. Артемова, Д. Ю. Муромцев, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 632 – 637.

4. Муромцев, Д. Ю. Методика проектирования базы знаний для активных экспертных систем / Д. Ю. Муромцев, В. В. Ермолаев, А. Ю. Коток // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2014. – Спец. вып. № 52. – С. 92 – 95.

Finding an Optimal Periodicity of Technical Maintenance of Information-Measuring and Control Systems Using Neural Network Technologies

I. G. Ryazanov, N. G. Chernyshov, Yu. T. Zyryanov, A. Yu. Naumova

*Department of Designing Radio-Electronic and Microprocessor Systems,
TSTU, Tambov, Russia; chief.ryazanoff2012@yandex.ru*

Keywords: neural networks; optimal maintenance period; maintenance system efficiency.

Abstract: An approach for determining the optimal periodicity of maintenance of information-measuring and control systems (IMaCSs) using neural network technologies based on the use of actual data on the current technical condition of the IMaCSs is proposed.

References

1. Zyryanov Yu.T., Malykov K.A. [Planning for prevention in organizational-technical systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 2, pp. 410-420. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Rastegari Ali. Condition based maintenance in the manufacturing industry from strategy to implementation, *Mälardalen Universet, Sweden*, 2017, 106 p.

3. Artemova S.V., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. [Prediction and compensation of disturbances in optimal control systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 632-637. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Muromtsev D.Yu., Yermolayev V.V., Kotok A.Yu. [Methods of designing a knowledge base for active expert systems], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2014, spec. issue no. 52, pp. 92-95. (In Russ., abstract in Eng.)

Bestimmung der optimalen Periodizität der technischen Wartung der Informationsmess- und Steuerungssysteme mit Anwendung der Netzwerktechnologien

Zusammenfassung: Es ist ein Ansatz zur Bestimmung der optimalen Periodizität der technischen Wartung von Informationsmess- und Steuerungssystemen (IIMS) unter Anwendung der Netzwerktechnologien vorgeschlagen, der auf der Verwendung der aktuellen Daten über den aktuellen technischen Zustand des ICIS gründet.

Détermination de la fréquence optimale de l'entretien technique des systèmes d'information, de mesure et de gestion à l'aide des technologies de réseau neuronal

Résumé: Est proposée une approche pour déterminer la fréquence optimale de l'entretien technique des systèmes d'information et de mesure et des systèmes de gestion (SIMSG) avec l'utilisation des technologies de réseau neuronal fondée sur l'utilisation des données factuelles sur l'état technique actuel de SIMSG.

Авторы: *Рязанов Илья Георгиевич* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Чернышов Николай Генрихович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Зырянов Юрий Трифонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Наумова Анастасия Юрьевна* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С ВЗАИМОСВЯЗАННЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

**М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский,
А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов**

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; dmiboris@yandex.ru*

Ключевые слова: взаимосвязанные величины; задача управления; модель объекта; объект управления; система управления; сталеплавильная печь; сушилка.

Аннотация: Рассмотрены теоретические и методологические основы управления объектами с взаимосвязанными величинами, раскрыта специфика таких объектов и основные особенности задачи управления. На многосвязном объекте возникает множество управленческих задач, причем необходимо управлять не только техническими, но и экономическими показателями. На основе проведенного анализа и исследования данного объекта как объектов моделирования и автоматизации предложены способы совершенствования методов управления, позволяющие повысить качество управления процессом. В качестве примеров рассмотрены процессы сушки и процессы плавления в дуговой сталеплавильной печи.

Введение

Большинство технологических систем представляет собой совокупность связанных материальными и энергетическими потоками технологических объектов с взаимосвязанными величинами. Физические перемещения потоков сопровождаются следующими тепловыми процессами: тепловыделением, теплообменом, теплопередачей. Примерами тепловых объектов являются теплообменники, химические реакторы, сушильные установки, печи, ректификационные колонны и др. Как правило, данные объекты входят в состав автоматизированных технологических установок большой мощности, и их не эффективная работа может приводить к значительным издержкам производства промышленной продукции и ухудшению ее качества.

Задачам разработки систем управления посвящено большое количество публикаций [1 – 4]. Однако поиск более совершенных методов и путей управления такими объектами представляет собой нетривиальную задачу, так как используется большое многообразие ресурсов, а скорость изменения влияния окружающей среды довольно высока [5]. Эффективность автоматизации в первую очередь зависит от того, насколько широко и глубоко она охватывает реальный технологический процесс.

Формализация задачи управления

Задачу, возникающую при построении автоматизированных систем управления (АСУ) объектами с взаимосвязанными величинами, можно сформулировать следующим образом: на базе имеющихся технических средств автоматизации повысить эффективность управления данным объектом путем разработки систе-

мы управления, обеспечивающей достижение минимальных производственных затрат.

Рассмотрим следующие подходы к решению поставленной задачи:

- интуитивный,
- формализованный.

Каждый из них имеет отличительные особенности.

В первом случае на основании априорных представлений об объекте и логических рассуждений предлагается некоторый алгоритм управления и его реализация. Эффективность принятого решения опирается на интуицию разработчика и проверяется экспериментально на объекте.

Во втором случае первоначально делается попытка формализовать исходные представления об объекте и всей задаче управления. Далее либо математически строго, либо при помощи целого ряда дополнительных предположений предлагается алгоритм управления. Принятые решения до экспериментальной проверки на объекте проверяются в лабораторных условиях, опираясь на имеющиеся формальные представления об объекте. Анализируя оба подхода можно заключить, что первый путь проще, а второй в большей степени позволяет использовать достижения теории управления и более надежен. Однако для объекта с взаимосвязанными величинами эффективность первого подхода существенно ниже, поэтому важное значение приобретает формализованный подход, рассмотренный в работе.

Для решения сформулированной задачи управления на базе формализованного подхода необходимо:

1. Провести исходную формализацию задачи управления.
2. Разработать алгоритмы управления.
3. Подобрать рациональную структуру технических средств, реализующих АСУ.

Используя классический подход, систему управления рассматриваем состоящей из объекта управления и управляющей части. Под объектом управления понимаем всю установку или ее часть, управление которой предполагается автоматизировать. Объект управления однозначно выделяется принятой совокупностью наблюдаемых величин, управляющих воздействий и критериев управления (наряду с ограничениями). Под наблюдаемыми величинами понимаем показания измерительных приборов установки. Информация о наблюдаемых величинах поступает в управляющую часть системы.

Управляющие воздействия представляют переменные, характеризующие положения органов управления установкой. Изменения значений управляющих воздействий осуществляются на основании решений, принимаемых управляющей частью системы.

Под критерием управления понимаем некоторый показатель, определяющий качество работы системы, а под ограничениями – допустимые пределы изменения тех или иных переменных, характеризующих протекание технологического процесса, конструктивные возможности установки, номенклатурные признаки продукта и т.п. Переменные, характеризующие состояние объекта и входящие в выражения критерия управления и ограничений, будем называть выходными координатами объекта.

Для уточнения общей задачи, возникающей при построении АСУ, предполагаем, что автоматизируется управление действующей установкой и имеется набор готовых технических средств для реализации тех и иных функций управления.

Выделим четыре основных этапа, связанные с исходной формализацией задачи.

1. Содержательное описание установки и существующей системы управления.
2. Формулирование цели управления, выделение объекта управления.

3. Составление структурной схема объекта управления, декомпозиция задачи управления.

4. Составление априорной математической модели.

По мере увеличения знаний об объекте управления возвращаемся к предшествующим этапам, исправляем принятые раньше решения, вновь повторяем пройденные этапы и т.д.

Синтез алгоритма управления

При решении задачи управления необходимо сформировать некоторую абстрактную схему на основании анализа реального процесса. При этом принимается большое количество интуитивных решений. Значительная часть таких решений определяется стремлением разумно упростить описание объекта и задачи управления, выделить главное и отбросить второстепенные подробности. В противном случае математические модели становятся слишком громоздкими, а точность решения задачи при этом практически не увеличивается.

Формализацию задачи синтеза алгоритма управления начинаем с формулирования цели управления. Для этого записываем аналитическое выражение критерия управления, определив при этом временной (расчетный) интервал, для которого формулируется задача, и выписываем все ограничения.

Чаще всего критерий управления не формируется заказчиком, хотя предложение автоматизировать установку обычно подразумевает стремление к улучшению производственных экономических показателей (себестоимости, прибыли, производительности и т.д.). В этих условиях строгое формирование самостоятельной задачи для данной установки может быть осуществлено путем анализа и последующей формализации задач планирования и оперативного управления всем цехом, а возможно, и более широким участком производства. Если подобная работа не проводится, то разработка критерия управления сводится к формализации существующих стимулов, принятых для соответствующих работников различных групп управления. В этом случае перед формулированием цели управления для системы особенно важно принять, какие функции управления возьмет на себя автоматизированная система. Следует помнить, что при разработке АСУ изменяется существующая система управления.

Сложной задачей является выбор расчетного временного интервала, который определяется как характеристиками объекта управления, так и общим видом принятого критерия. При синтезе систем автоматического регулирования (САР) для простых объектов управления это время выбирается бесконечно большим. В тех случаях, когда управление на предшествующих интервалах мало влияет на поведение объекта в последующее время, заменяем критерий управления некоторым текущим показателем, характеризующим работу системы в каждый данный интервал или в каждый данный момент времени.

Для рассматриваемого объекта такие решения недопустимы. При увеличении расчетного времени усложняется математическое описание объекта. В то же время значительное уменьшение расчетного времени приводит к существенным потерям, так как принимаемые на данном интервале решения по управлению могут оказаться не лучшими. Рациональным расчетным временем является интервал, соответствующий межремонтному пробегу установки. Иногда и такой расчетный интервал может быть сокращен. Например, для некоторых периодических процессов в качестве расчетного интервала может быть принято время рабочего цикла, если можно пренебречь влиянием данного цикла на последующие. После того как сформулирована цель управления, для четкого выделения объекта из всей совокупности управляющих воздействий и наблюдаемых переменных, относя-

щихся к установке в целом, выделяем переменные, которые будут рассматриваться в формулируемой задаче.

Выбираемые управляющие воздействия должны существенно влиять на цель управления. Можно использовать принятое ранее решение о том, чьи функции будет выполнять разрабатываемая АСУ. В этом случае выбираются те управляющие воздействия и соответствующие наблюдаемые переменные, которыми пользуется оператор в существующей системе. При этом возможно целесообразное изменение перечня наблюдаемых переменных.

При выделении объекта управления важным для принятия того или иного решения является оценка экономической эффективности АСУ, выполненная на основании имеющихся общих данных об объекте. Эффект, который ожидается от системы управления, сопоставляется с оценкой стоимости соответствующих технических средств и их эксплуатации. По мере углубления знаний об объекте управления необходимо провести дополнительные исследования эффективности принятых решений.

Под возмущающими воздействиями будем понимать координаты, характеризующие влияние внешней среды на объект управления, не зависящие от состояния объекта и изменяющиеся независимо от функционирования управляющей части системы. К возмущающим воздействиям также отнесем внутренние неуправляемые изменения объекта.

Промежуточными координатами будем называть переменные, зависящие от управляющих или возмущающих воздействий и влияющие на выходные и наблюдаемые координаты. Промежуточные координаты связывают между собой элементы структурной схемы.

В отличие от управляющих воздействий, наблюдаемых и выходных координат, выделение которых проводится на стадии формализации исходной задачи управления, определение промежуточных координат и возмущающих воздействий проводится на стадии составления структурной схемы и во многом является отражением понимания существа технологического процесса. Именно поэтому структурная схема уточняется по мере увеличения знаний об объекте.

Рассмотрим предпосылки, которыми необходимо руководствоваться при определении возмущающих воздействий, выборе промежуточных координат и выделении отдельных элементов структурной схемы.

1. Рассматривая последовательно все материальные и энергетические потоки, проходящие через установку, можно определять существенные характеристики этих потоков, как соответствующие координаты объекта.

2. Деление объекта управления на элементы структурной схемы по реальным аппаратам.

3. Определение в качестве промежуточных тех переменных, с помощью которых легче представить физическую сущность рассматриваемого процесса и от величины которых существенно зависят выходные переменные. Выделение таких координат приводит к ряду существенных упрощений. Взаимное влияние многих координат может оказаться несущественным и поэтому не учитываться; отдельные координаты могут быть исключены из рассмотрения, как не оказывающие влияния на величину критерия; критерий управления может разделиться на несколько частей и управляющие воздействия, действующие на каждую из этих частей, могут не оказывать влияния на остальные. Произойдет декомпозиция задачи управления, то есть деление ее на ряд более простых, не связанных между собой задач.

Эффективным способом декомпозиции задачи управления является выделение режимных координат. Этот способ применим в тех случаях, когда среди промежуточных координат могут быть выделены такие, при которых часть управляющих и возмущающих воздействий влияет на выходные переменные объекта

не непосредственно, а только через некоторые из выделенных промежуточных координат. При этом можно построить локальные САР, обеспечивающие стабилизацию этих промежуточных координат, независимо от значений других управляющих и промежуточных координат.

Таким образом, переходя к решению задачи управления не в пространстве всех управляющих и возмущающих воздействий, а в пространстве режимных координат и тех возмущений, которые воздействуют на выходные переменные помимо режимных координат, сокращается число переменных и, соответственно, облегчается решение. Это будет тем существенней, чем большее количество возмущений и управлений из числа действующих на объект проявляет свое действие через режимные координаты. Такую задачу, в отличие от исходной, будем называть задачей управления режимом.

Для того чтобы качество управления не ухудшилось в результате деления исходной задачи на задачи регулирования и управления режимом, должны быть выполнены следующие условия.

1. Системы автоматического регулирования режимных координат должны обеспечивать компенсацию возмущающих воздействий. При этом каждая режимная координата должна быть наблюдаемой переменной.

2. Управляющие воздействия, используемые для регулирования режимных координат, должны влиять на выходные переменные только через режимные координаты.

Управление процессом сушки

К настоящему времени сушилки крайне недостаточно изучены как объекты управления. Причинами этого являются сложность процессов тепло-, массообмена, происходящих в сушилках, нестационарности коэффициентов; изменение формы, размеров и структуры частиц высушиваемого материала; недостаточность экспериментальных данных о кинетике сушки и аэродинамике аппаратов (особенно при сушке распылением и в кипящем слое); сложность геометрии некоторых типов сушилок.

Для построения систем управления необходимы динамические характеристики сушилок, которые могут быть получены аналитическим и экспериментальным методом. К аналитическому методу относятся:

1. Решение общих уравнений процесса для какого-либо конкретного способа сушки с наложением краевых условий, соответствующих данному типу сушилки, и экспериментальным определением коэффициентов уравнений или зависимостей этих коэффициентов от вида и физико-химических свойств высушиваемого материала и сушильного агента и конструкции аппарата. В результате получаем полную математическую модель автоматизируемой сушилки.

2. Решение уравнения кинетики сушки с опытным нахождением коэффициента скорости сушки для конкретных условий (исследуемых материала и сушилки).

3. Составление и решение балансовых уравнений в малых отклонениях для данной конструкции сушилки – при небольших отклонениях от номинального (или любого расчетного) режима с последующей линеаризацией уравнений и всех сложных зависимостей, входящих в них, которую обычно проводят разложением в ряд Тейлора. В итоге получают линеаризованное математическое описание, вполне пригодное для анализа работы объекта при режимах близких к расчетному.

4. Составление структурных схем объекта с аппроксимацией сушилки одним или несколькими типовыми звеньями.

К экспериментальному методу относятся:

1. Методы активного эксперимента – определение кривых разгона, нахождение частотных характеристик, определение импульсных характеристик, статистический планируемый эксперимент.

2. Методы пассивного эксперимента – статистическая обработка данных нормальной эксплуатации.

Полученное математическое описание используется для расчета коэффициентов усиления по всем каналам связей между входными и выходными параметрами, в расчете статики и динамики сушилок, для оптимизации их работы.

Рассмотрим математические модели, описывающие процесс сушки в аппаратах с фонтанирующим слоем. Сушилка представляет собой конический аппарат, внутрь которого засыпаются частицы влажного материала. Снизу подается горячий воздух со скоростью, при которой он пробивает слой и образует фонтан (струи). Влажные частицы могут подаваться как в фонтан, так и в слой и в нем высушиваются. Выгрузка проводится из нижней части аппарата. Сушка в основном происходит в фонтане и частично в слое (влажность частиц в слое считаем одинаковой). Ниже приведены математические модели для разных вариантов сушки:

– непрерывная сушка, подача частиц в слой, сушка в фонтане и слое:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -KW_1; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{N_1(W_1 - W_2) + N_0(W_n - W_2)}{N_2} - K_0W_2;\end{aligned}\quad (1)$$

– периодическая сушка, сушка в фонтане:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -KW_1; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{N_1}{N_2}(W_1 - W_2);\end{aligned}\quad (2)$$

– непрерывная сушка, подача частиц в слой, сушка в фонтане:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -KW_1; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{N_1(W_1 - W_2) + N_0(W_n - W_2)}{N_2};\end{aligned}\quad (3)$$

– непрерывная сушка, подача частиц в фонтан, сушка в фонтане и слое:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -K \frac{N_1W_1 + N_0W_n}{N_1 + N_0}; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{N_1 + N_0}{N_2}(W_1 - W_2) - K_0W_2;\end{aligned}\quad (4)$$

– непрерывная сушка, подача частиц в фонтан, сушка в фонтане:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -K \frac{N_1W_1 + N_0W_n}{N_1 + N_0}; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{(N_1 + N_0)(W_1 - W_2)}{N_2};\end{aligned}\quad (5)$$

– периодическая сушка, сушка в фонтане и слое:

$$\begin{aligned}\frac{dW_1}{dt} &= -KW_1; \\ \frac{dW_2}{dt} &= \frac{N_1}{N_2}(W_1 - W_2) - K_0W_2.\end{aligned}\quad (6)$$

Здесь W_n, W_1, W_2 – влагосодержащие частицы начальное, в фонтане и слое; $N_1, N_2, N_0, N_{\text{вых}}$ – количество частиц, вовлекаемых в фонтан из слоя, в слое,

подающихся (выгружаемых $N_{\text{ВЫХ}}$) в аппарат, где $N_{\text{ВЫХ}} = N_0$; K, K_0 – коэффициент скорости сушки в фонтане и слое.

Поставим задачу: найти управляющее воздействие для процесса сушки в аппарате с фонтанирующим слоем, при котором достигается экстремум критерия оптимальности. В качестве критерия оптимальности выбрано: минимальное время, при котором влажность продукта достигает заданного значения; минимальное значение влажности продукта, которое достигается за заданное время; минимальное значение среднеквадратического отклонения влажности продукта от заданного значения за заданное время.

В качестве примера рассмотрим метод оптимизации по одному параметру. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

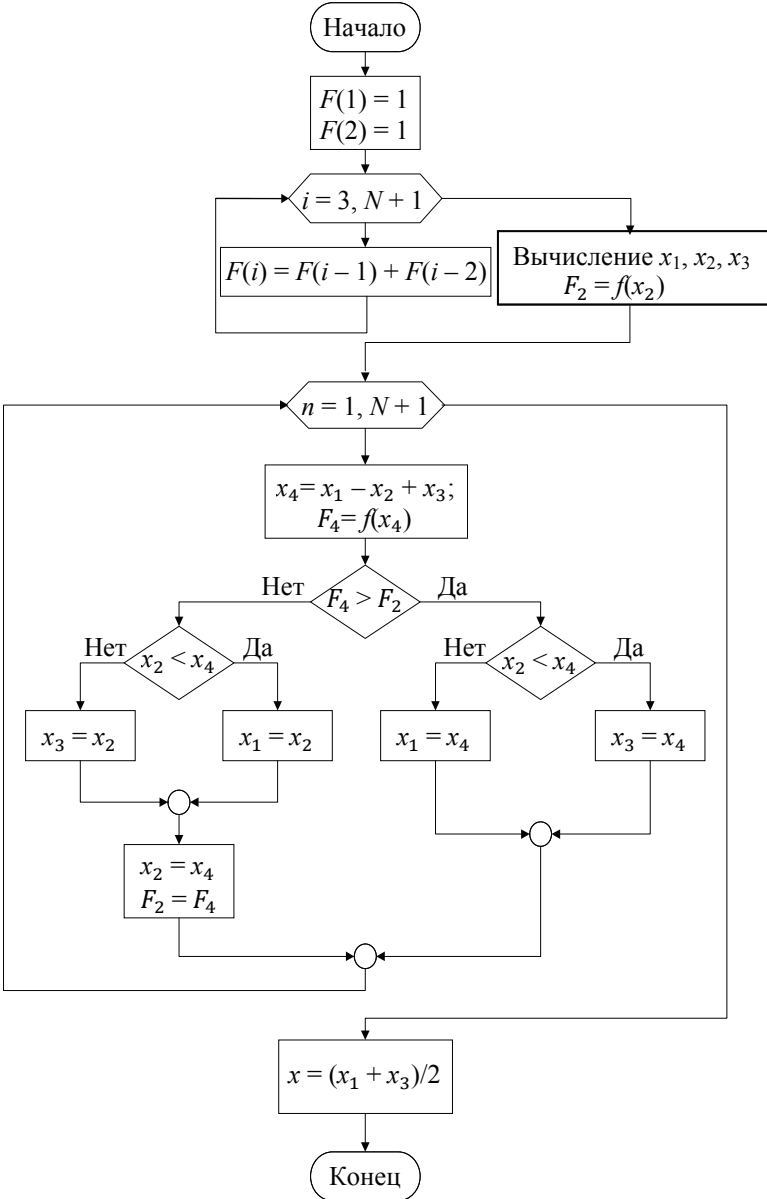


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оптимизации

В результате работы программы для модели № 1 при $N_0 = 150$; $N_1 = 100$; $N_2 = 120$; $K_0 = 0,3$; $W_n = 500$; $W_k = 300$ получено оптимальное значение $K = 5$.

Управление процессом плавления в дуговой сталеплавильной печи

Основным и самым сложным процессом в работе дуговой сталеплавильной печи (ДСП) является поддержание устойчивого горения дуги при соблюдении определенного электрического режима (заданных значений силы тока и напряжения) [6, 7]. Качество выплавляемого металла напрямую зависит от вводимой мощности и длины дуги. Практика промышленного использования ДСП показывает, что регулирование электрического режима или выделяемой в дуге мощности возможно двумя путями: изменением напряжения печного трансформатора и изменением длины межэлектродного промежутка – длины дуги. Так как частые коммутации силовых цепей нежелательны, то к оперативному регулированию воздействия относят изменение положения электрода, определяющего длину дуги. При этом изменяющиеся параметры – сила тока, напряжение, активная мощность и сопротивление дуги – могут быть использованы как параметры регулирования. Однако лучшие результаты предоставляет регулятор, использующий дифференциальный параметр, представляющий собой разность тока и напряжения. Такой подход к регуляторам зарекомендовал себя повсеместно и широко используется в различных проектах АСУ печей, как малой вместимости, так и крупных.

Изменение дугового пространства позволяет регулятору поддерживать заданную водимую мощность, однако для каждого этапа плавки значение этого параметра должно быть разным в силу характерных особенностей тепловой работы сталеплавильной печи. Смену ступени трансформатора и установление тока в нужное положение осуществляет сталевар, что может привести к ошибкам управления. Предотвращение ошибок возможно при исключении человека в принятии решения смены электрического режима. Данная задача имеет несколько путей решения, однако самым простым и надежным является программный.

Программным способом можно менять и некоторые характерные особенности плавки, зависящие от электрического режима. Так, в процессе плавления часто происходят короткие замыкания, характерно нестабильное горение дуги и ее обрывы, что приводит к частому возникновению ошибок рассогласования и, как итог, смене положения электрода. В момент окисления горение дуги становится стабильным, ошибки рассогласования уменьшаются. Эти особенности отражаются в зоне нечувствительности регулятора, которая позволяет сократить количество запусков привода электрода при незначительных ошибках рассогласования для каждого из этапов плавки. Традиционные законы регулирования не дают на сегодняшний день заданного качества регулирования на всем процессе выплавки. Система управления должна слабо реагировать на незначительные изменения, но отрабатывать быстрые смены режима (короткие замыкания, обрыв дуги).

Поставленную задачу управления можно решить с помощью одноконтурной САР. Система состоит из объекта регулирования, блока формирования задания, блока формирования ошибки, регулятора, блока формирования задания исполнительному механизму, частотного преобразователя и исполнительного механизма. Одним из наиболее универсальных регуляторов, получивших широкое распространение, является пропорциональный закон регулирования.

Результаты имитационного исследования системы управления представлены на рис. 2.

Выделим три характерных участка. Первый участок отражает момент розжига дуги. По технологии процесса розжига осуществляется в момент касания электродом шихты, сопровождаемого коротким замыканием. Резкое повышение зна-

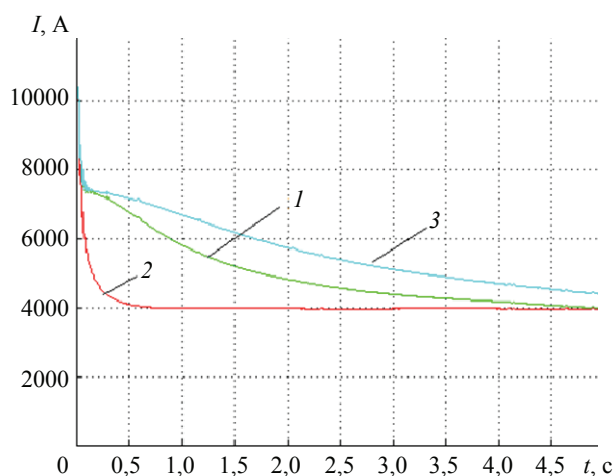


Рис. 2. График изменения значений тока дуги I в одноконтурной САР для начальных стадий расплавления при разных коэффициентах пропорциональности k :
 $1 - k = 1$; $2 - k = 10$; $3 - k = 0,5$

чения тока обеспечивает возникновение столба нестабильной дуги при неблагоприятных условиях окружающей среды и незначительной эмиссионной способности материалов. Второй участок отвечает за переход установки в заданный режим. Как видно из графика кривая 2 имеет меньше время регулирования (менее 0,5 с), однако в начальные моменты розжига резкое изменение длины дуги нежелательно, так как столб дуги не сформировался. Такое влияние системы может привести к обрыву дуги и необходимости повторного розжига. Кривая 3 не отвечает требованиям, предъявляемым к качеству регулирования.

Одним из возможных путей решения выявленной проблемы является применение нового подхода к регулированию с помощью регуляторов, использующих статические характеристики разной формы, например, параболической и линейной на разных стадиях расплавления, что обеспечивает более точное управление процессом. Учесть особенности технологии позволяет использование программного типа управления.

Система включает в себя объект управления, блоки формирования задания, расчета «ошибки», программного управления (выбор типа характеристики, определение задания управления) в зависимости от режима работы печи, системы интеллектуального розжига, формирования задания частотному преобразователю, частотный преобразователь и исполнительные механизмы. Основной задачей блока интеллектуального розжига является создание устойчивого столба дуги, которая заключается в разделении процесса розжига на несколько этапов от момента короткого замыкания до устойчивого горения. При этом формирование сигналов управления происходит на основании переходных процессов, характеризующих состояния дуги в независимости от заданного электрического режима.

Разработанная система управления имеет блочную многоуровневую систему. Условно систему можно разделить на три основных уровня:

- нижний, включающий в себя датчики температуры, датчики положения, концевые выключатели, а также исполнительные механизмы (двигатели, электроклапаны и др.);
- средний, включающий в себя логические контроллеры, программируемые реле, панели оператора, модули ввода и вывода информации;
- верхний, обеспечивающий дистанционный контроль технологических процессов.

Средний уровень включает в себя несколько щитов управления, обеспечивающих как автономную работу блоков АСУ, так и совместную под управлением центрального контроллера. Каждый блок системы отвечает за определенную часть комплекса технологического процесса.

Щит регулятора мощности и центрального пульта управления электропечи – основной пульт, в котором размещены все основные технологические контроллеры, а также органы управления, индикации и визуализации АСУ, сбора и хранения параметров плавки. Пульт включает в себя головной контроллер системы СПК110 ОВЕН, обеспечивающий совместную работу блоков системы, визуализацию, сбор и хранение технологических параметров плавки; контроллеры ПЛК-110 ОВЕН, отвечающий за работу регулятора мощности дуги, и ПР-200, обеспечивающий управление гидравлической и пневматической системами механизмов электропечи.

Щит контроля и управления высоковольтным выключателем и печного трансформатора, осуществляющий контроль расхода активной и реактивной энергии, управление переключением ступеней напряжения печного трансформатора, контроль состояния трансформатора, поддержание микроклимата печного трансформатора и трансформаторного помещения.

Щит контроля теплообмена, обеспечивающий контроль системы охлаждения электропечи с возможностью расширения функционала по управлению внешними теплообменниками. Аппаратно реализован с использованием программируемого логического контроллера ПЛК 73 ОВЕН.

Внешний пульт управления, осуществляющий оперативное управление электропечью с площадки сталевара. В состав щита внесены наиболее часто используемые органы управления.

Блок сбора дополнительной информации о работе системы, необходимой для обеспечения работы сервисных функций печи, таких как повторное включение высоковольтного выключателя, после срабатывания токовой защиты и автоматического перепуска электродов. Представлен счетчиками импульсов СИ30 ОВЕН.

Верхний уровень системы представлен SCADA-системами.

Особое внимание при разработке системы управления уделено отражению текущей информации о технологических параметрах печи в удобной для оператора форме. Разработанное автоматизированное рабочее место оператора представлено основным экраном визуализации, включающим в себя фреймы информации состояния печи, а также экраны системных настроек, позволяющих проводить изменение параметров процесса без вмешательства в программное обеспечение. Фреймы основного экрана предоставляют детальную информацию о параметрах горения дуги, положениях механизмов печи, значениях вводимой и расхода активной мощностей, состоянии теплообмена и др.

Заключение

Предложено исследование объектов с взаимосвязанными величинами как целостной системы, осуществляющей многообразие взаимосвязанных функций, находящейся в определенных взаимоотношениях с окружающей средой и подвергающейся последовательным изменениям под влиянием внешних и внутренних факторов.

Разработаны принципы управления технологическими объектами с взаимосвязанными величинами. Для эффективного управления необходимо построение многоуровневой системы, отражающей особенности соответствующего уровня.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечения системы оценки состояний и принятия решений по управлению, с помощью которого в режиме реального времени можно получить информацию о ходе производственного процесса, наличии ресурсов.

Разработанная система управления позволяет повысить эффективность функционирования технологического процесса за счет своевременного принятия управленческих решений.

Список литературы

1. Джамбеков, А. М. Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций / А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 557 – 571. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571
2. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580
3. Конкина, В. В. Постановка задачи оптимального управления реверсивным режимом нанесения гальванического покрытия в ванне со многими анодами / В. В. Конкина, Д. С. Соловьев, Ю. В. Литовка // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 248 – 256. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256
4. Чернышов, Н. Г. Синтез энергосберегающего управления / Н. Г. Чернышов, С. И. Дворецкий // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 7 – 15. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.007-015
5. Попов, Н. С. К методике конструирования экспертной системы оценки промышленной безопасности / Н. С. Попов, Н. В. Лузгачева, М. Т. Чан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 43 – 51.
6. Воробьев, В. П. Автоматизация дуговых электропечей / В. П. Воробьев, А. В. Сивцов, С. Г. Возжеников // Черные металлы. – 1999. – № 5. – С. 12 – 14.
7. Андрианова, А. Я. О свойствах электрических цепей с дугами и вопросы управления ДСП / А. Я. Андрианова, В. М. Эдемский // Электрометаллургия. – 2002. – № 10. – С. 29 – 32.

Control of Objects with Interrelated Values

**M. H. M. Saif, V. G. Matveykin, B. S. Dmitrievsky,
A. V. Bashkatova, A. A. Mamontov**

*Department of Information Processes and Control,
TSTU, Tambov, Russia; dmiboris@yandex.ru*

Keywords: interrelated quantities; control problem; object model; control object; control system; steel furnace; Dryer.

Abstract: The paper discusses the theoretical and methodological foundations of controlling objects with interrelated quantities, reveals the specifics of such objects and the main features of the control problem. A set of control problems arise at a multiply connected object and it is necessary to control not only technical, but also economic indicators. On the basis of the analysis and research of the object under study as the

object of modeling and automation, we proposed ways to update control methods to improve the quality of process control. The solution of the problem under study is to use modern methods for constructing an appropriate automated control system. The drying processes and melting processes in an electric arc furnace are considered as examples.

References

1. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. [Optimal control of the catalytic reforming process of gasoline fractions], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 557-571, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.557-571 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Simulation method of a multiply-connected digital system for controlling ammonia synthesis], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Konkina V.V., Solov'yev D.S., Litovka Yu.V. [Statement of the problem of optimal control of the reversible mode of electroplating in a bath with many anodes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 248-256, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.248-256 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Chernyshov N.G., Dvoretzkiy S.I. [Synthesis of energy-saving control], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 7-15, doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.007-015 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Popov N.S., Luzgacheva N.V., Chan M.T. [To the method of constructing an expert system for assessing industrial safety], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 43-51. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Vorob'yev V.P., Sivtsov A.V., Vozhenikov S.G. [Automation of electric arc furnaces], *Chernyye metally* [Ferrous metals], 1999, no. 5, pp. 12-14. (In Russ.)
7. Andrianova A.Ya., Edemskiy V.M. [On the properties of electric circuits with arcs and the problems of chipboard control], *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2002, no. 10, pp. 29-32. (In Russ.)

Verwalten von Objekten mit zusammenhängenden Werten

Zusammenfassung: In der Arbeit werden die theoretischen und methodischen Grundlagen der Verwaltung von Objekten mit zusammenhängenden Größen diskutiert, die Besonderheiten solcher Objekte und die Hauptmerkmale der Verwaltungsaufgabe werden aufgedeckt. An einem mehrfach zusammenhängenden Objekt ergibt sich eine Vielzahl von Verwaltungsaufgaben, und es gilt, nicht nur technische, sondern auch wirtschaftliche Kennzahlen zu verwalten. Auf der Grundlage der durchgeführten Analyse und Erforschung dieses Objekts als Objektes der Modellierung und Automatisierung wurden Möglichkeiten zur Verbesserung der Managementmethoden vorgeschlagen, mit denen die Qualität der Prozesssteuerung verbessert werden kann. Die Lösung der gestellten Aufgaben ist die Verwendung moderner Methoden zum Aufbau eines geeigneten automatisierten Steuerungssystems. Als Beispiele sind die Trocknungsprozesse und Schmelzprozesse in einem Lichtbogenstahlschmelzofen betrachtet.

Gestion des objets avec des valeurs interconnectées

Résumé: Sont examinées les bases théoriques et méthodologiques de la gestion des objets avec des valeurs interconnectées, est montrée la spécificité de ces objets et les principales caractéristiques de la tâche de la gestion. Il existe de nombreuses tâches de gestion sur un site à plusieurs liens, et il est nécessaire de gérer non seulement les performances techniques, mais aussi celles économiques. A la base de l'analyse et de l'étude de l'objet donné sont proposés des moyens d'amélioration des méthodes de la gestion pour augmenter la qualité de la gestion des processus. La solution consiste à utiliser des méthodes modernes pour construire un système de contrôle automatisé approprié. À titre d'exemple, sont considérés les processus du séchage et ceux de fusion dans le four à fusion à l'arc.

Авторы: *Саиф Марван Номан Мохаммед* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Баишкатова Александра Владимировна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Мамонтов Андрей Александрович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Литовка Юрий Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕСУРСНОЙ МОДЕЛИ В ВЫЧИСЛЕНИЯХ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СКЛАДОМ

Т. В. Чашкина, И. Л. Коробова, Н. В. Майстренко

*Кафедра «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; sapr.tstu@mail.ru*

Ключевые слова: автоматизация управления; комбинаторная математическая модель; математическое моделирование; матрицы отношений; оптимизация управления; система управления складом.

Аннотация: Показан ресурсный подход к моделированию процесса размещения товара на складе. Сформулирована задача оптимизации размещения относительно критерия затрачиваемых ресурсов на дальнейшую выемку товара, а также его обслуживание в процессе работы предприятия торговли. Рассмотренные методики в совокупности с экономическими критериями оценки динамики реализации товара могут быть использованы в математическом аппарате систем автоматизации управления складом.

В настоящее время актуальность разработки систем автоматизированного управления складскими помещениями объясняется широким развитием сетей розничной торговли с крупными узлами логистики. Эффективность планирования каждого этапа перемещения товара гарантирует оптимальность затрат предприятия в общем и минимизацию связанных рисков [1]. В статье будет определена методика формализации ресурсной модели склада. В совокупности с маркетинговыми инструментами оценки динамики товара, такая модель позволит получать оптимальные решения по размещению продукции относительно затрачиваемых ресурсов на ее обслуживание и извлечение при реализации. Актуальность рассмотренных вопросов заключается в полной проработке факторов оценки распределения товара на складе, которое в настоящее время осуществляется исключительно из оптимизации геометрического доступа без учетов собственной динамики ликвидности продукции или расходов, связанных с обслуживанием стеллажей: аудит, кодификация единиц продукции и т.д. [2].

Разработка математического аппарата, в таком случае, позволит унифицировать критерий оптимального поиска и на основе сравнительного анализа алгоритмов поисковой оптимизации выявить наиболее подходящую методику для ее последующей программной реализации в составе автоматизированной системы.

Перейдем к математической формализации модели. Пусть геометрическое место точек, отражающее расположение N единиц товара в пространстве склада, есть вектор $X = \{x_i\}$, $i = 1, \dots, N$. Правило, задающее расположение стеллажей, то есть допустимые места размещения товара, обозначим как $X \in X_{\text{доп}}$ [3].

В представленной задаче особое значение имеет приоритет выемки товаров, который определяется динамикой его реализации и физически отражает ближайшее расположение ликвидного товара относительно некоторой опорной точки его реализации M и других единиц продукции [4]. Определим обозначенный приори-

тет математически как вектор эмпирических коэффициентов $P = \{p_i\}, i = 1, \dots, N$. Поскольку суждение о ликвидности товара имеет периодический характер, что может быть связано, например, с сезонностью его реализации, будем говорить о некотором статичном промежутке планирования [5].

Оптимальность распределения товаров априори зависит от минимизации всех перемещений работников R между стеллажами при его выемке относительно точки M :

$$R = \sum_{i=1}^N |x_i - M|. \quad (1)$$

Выражение под знаком суммы в (1) отражает расстояние от i -го товара до опорной точки, которое на практике не обязательно представляет отрезок прямой и зависит от конфигурации склада.

С учетом вектора P и при условии положительной действительной градации коэффициентов прямо пропорционально степени товарной ликвидности, задача оптимизации размещения товара R' на основе (1) примет вид

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{p_i} |x_i - M| \rightarrow \min_{X \in X_{\text{доп}}} R'(X). \quad (2)$$

Однако на этапе обработки товара, на рассматриваемом временном промежутке, необходимо учитывать и ресурсы, связанные с физическим доступом к единицам продукции, которые не всегда на практике полностью определяются расстоянием до точки M . Для унификации понятия ресурсов в представленной задаче введем матрицу переходов между товарами C , формируемую экспертно относительно показателей работы операторов склада, принятых к рассмотрению в качестве оценки: время перемещения, расход энергии машины-погрузчика и т.п. Стоит отметить, что элементы такой матрицы $\{c_{i,j}\}$ могут отражать и комплексный критерий – суперпозицию локальных оценок [6].

В таком случае, имеет место следующая задача оптимизации ресурсов обслуживания, которая характеризуется как комбинаторная:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{i,j} x_i \rightarrow \min_{X \in X_{\text{доп}}} C(X). \quad (3)$$

Объединим задачи (2) и (3) для осуществления возможности достижения глобального экстремума из локальных оценок $C(X)$ и $R'(X)$ на численной вариации параметра оптимизации $X \in X_{\text{доп}}$

$$A \sum_{i=1}^N \frac{1}{p_i} |x_i - M| + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{i,j} x_i \rightarrow \min_{X \in X_{\text{доп}}} AR'(X) + BC(X). \quad (4)$$

В записи проблемы (4) используются коэффициенты математической свертки A и B , устанавливающие взаимный приоритет локальных критериев $R'(X)$ и $C(X)$. Точное численное их определение имеет эмпирический характер и зависит от практического моделирования с соответствующей экспертной оценкой результатов.

Решение задачи (4) относительно допустимого размещения товара будет гарантировать эффективность его обслуживания и осуществления процесса выемки. Отметим, что ряд коэффициентов целевой функции имеет эмпирический характер, увеличивающий число предварительных исследований предметной области.

Однако последнее оправдано возможностью полной автоматизации поиска численного решения эффективного относительно представленных критериев оценки размещения товара. Проблема (4) априори не может быть решена аналитически. Так как она имеет отношение к классу комбинаторных задач, точное решение может быть проведено полным или сокращенным перебором в зависимости от размерности задачи N и мощности вычислительных ресурсов [7].

Функционально алгоритм сокращенного перебора, применяемый в терминологии рассматриваемой задачи, приведен на рис. 1.

Абстрагируясь от матрицы отношений $\{c_{i,j}\}$ до некоторого множества всех возможных решений G полный перебор представил бы вариативное рассмотрение каждого его элемента. Итерационно, будем умеренно сокращать G до возможности частичного перебора с учетом резкого понижения размерности выделением подмножества перспективных вариантов развития решений [8]. Порядок операций будет следующий:

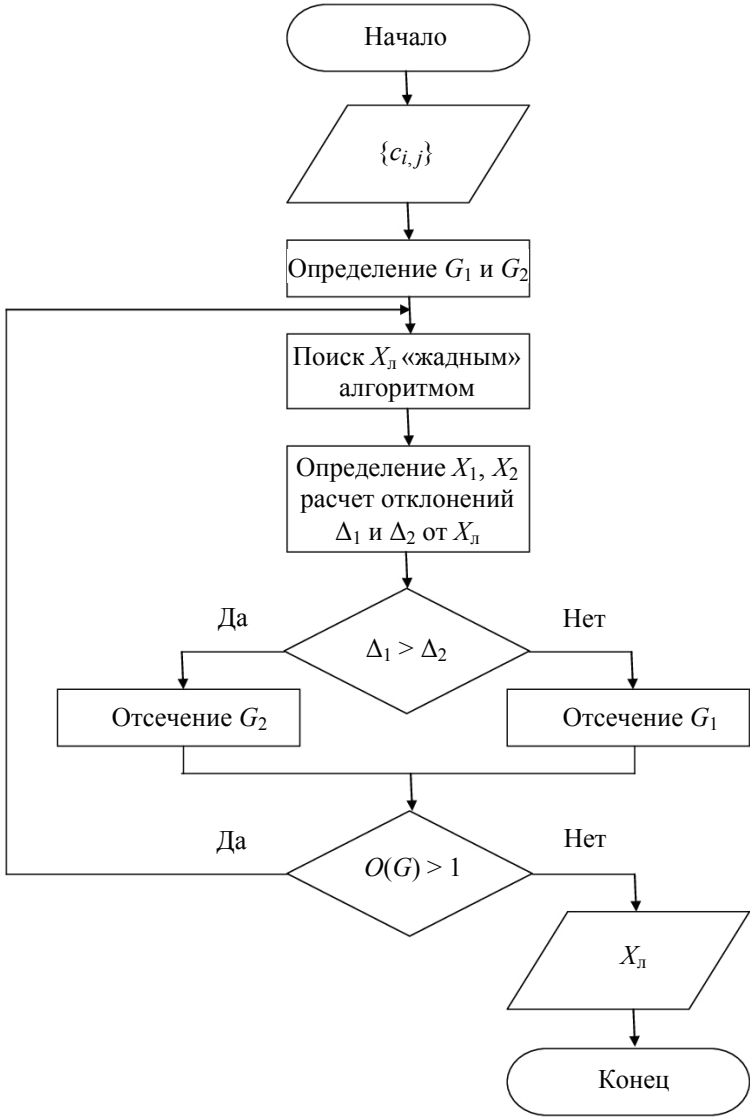


Рис. 1. Функциональная схема поиска решения методом сокращенного перебора

- 1) локализация G на уровне обозначения матрицы $\{c_{i,j}\}$ и соответствующих направлений ее поэлементного рассмотрения;
- 2) выделение подмножеств G_1 и G_2 ;
- 3) поиск «жадным» алгоритмом локального решения X_L и принятия его в качестве алгоритма оценки;
- 4) прогнозирование развития решения X_1 и X_2 относительно G_1 и G_2 соответственно;
- 5) расчет отклонений X_1 и X_2 от X_L и локализация наиболее выраженного;
- 6) сокращение G путем исключения подмножества G_1 или G_2 , соответствующего неперспективному направлению развития решения;
- 7) вариативное рассмотрение проблемы путем повторения обозначенных выше п. 3 – 6 до полного рассмотрения всего множества решений.

Отметим, что представленный алгоритм, согласно теории комбинаторной оптимизации, будет являться априори точным. Вырождение алгоритма в полный перебор исключается переходом по X_L с некоторым шагом.

Практическая апробация проводилась на множествах исходных данных, допускающих реализацию алгоритма полного перебора. Рассмотрены выборки размерностью до 15-ти элементов системы (рис. 2).

Отметим, что численно решения полного и сокращенного перебора сошлись, что говорит о правильности практической реализации методик. Однако преимущество скорости решения методом сокращенного перебора явилось очевидным. Так, на размерности от 7 элементов системы метод полного перебора стал отставать от частичного и к 15-й размерности модуль разности достиг 103 с. Поскольку практические размерности предполагаются значительно больше 15, выбор конечного метода очевиден.

Направлением развития работы является унификация алгоритмов поиска вектора X в терминах представленной проблемы под различные типы товаров организаций-операторов торговли, что в частности, касается и применения ускоряющих методик, позволяющих получать точные решения задачи и, при этом, не давать алгоритму вырождаться в полный перебор на областях определения функции со слабовыраженным градиентом. Последнее также не исключено на практике и априори должно быть учтено при программно-алгоритмической реализации обобщенного решения.

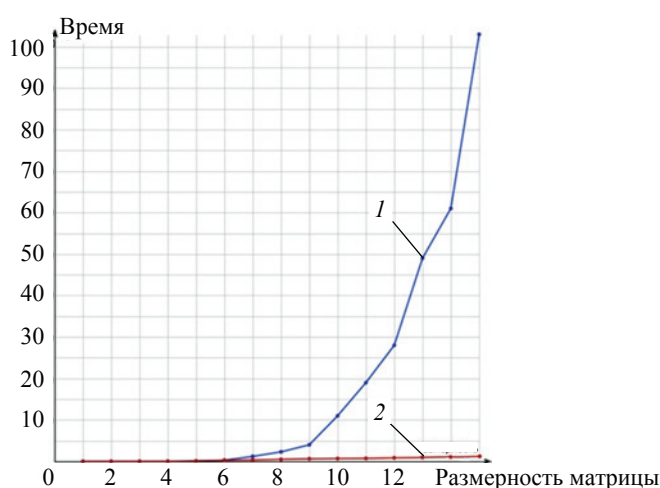


Рис. 2. Кривые фактического времени поиска решения от размерности матрицы отношений для алгоритмов полного (1) и сокращенного перебора (2)

Это позволит сформировать универсальную математическую базу для практического применения в системах автоматизации работы склада. Эффективность применяемых методов гарантирована теорией комбинаторной оптимизации и абсолютной точностью получаемых решений.

Список литературы

1. Автоматизированные информационные технологии в экономике : учебник / под ред. Г. А. Титоренко. – М. : ЮНИТИ, 2005. – 399 с.
2. Буреш, О. В. Интеллектуальные информационные системы управления социально-экономическими объектами / О. В. Буреш, М. А. Жук. – М. : Красанд, 2012. – 192 с.
3. Дыбская, В. В. Управление складированием в цепях поставок / В. В. Дыбская. – М. : Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.
4. Хайрулин, С. А. Сертификация услуг товарного склада. Нормативные документы и комментарии / С. А. Хайрулин. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2002. – 576 с.
5. Волгин, В. В. Логистика хранения товаров. Практ. пособие / В. В. Волгин. – М. : Дашков и Ко, 2010. – 410 с.
6. Пападимитриу, Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стайглиц. – М. : Мир, 1984. – 512 с.
7. Левин, В. И. Непрерывно-логические алгоритмы решения комбинаторных задач / В. И. Левин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2007. – Т. 13, № 3. – С. 687 – 698.
8. Тарakanов, В. Е. Комбинаторные задачи и (0,1)-матрицы / В. Е. Тараканов. – М. : Наука, 1985. – 192 с.

Application of the Resource Model in Calculations for Computer-Aided Warehouse Management

T. V. Chashkina, I. L. Korobova, N. V. Maistrenko

*Department of Computer-Aided Decision Support Systems,
TSTU, Tambov, Russia; sapr.tstu@mail.ru*

Keywords: computer-aided control; combinatorial mathematical model; math modeling; relationship matrix; management optimization; warehouse management system.

Abstract: The resource approach to modeling the warehousing process is described. The problem of warehousing optimization with respect to the criterion of resources spent on the further flow of the goods and their handing at a retail enterprise is formulated. The considered techniques together with the economic criteria for assessing the dynamics of the sale of goods can be used in the mathematical modeling of computer-aided warehouse management systems.

References

1. Titorenko G.A. [Ed.] *Avtomatizirovannyye informatsionnyye tekhnologii v ekonomike: uchebnik* [Automated information technologies in economics: a textbook], Moscow: YUNITI, 2005, 399 p. (In Russ.)

2. Buresh O.V., Zhuk M.A. *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy upravleniya so-tsial'no-ekonomicheskimi ob'yektami* [Intellectual information systems for managing socio-economic objects], Moscow: Krasand, 2012, 192 p. (In Russ.)
 3. Dybskaya V.V. *Upravleniye skladirovaniyem v tsepyakh postavok* [Warehouse management in supply chains], Moscow: Al'fa-Press, 2009, 720 p. (In Russ.)
 4. Khayrulin S.A. *Sertifikatsiya uslug tovarnogo sklada. Normativnyye dokumenty i kommentarii* [Certification of warehouse services. Regulatory documents and comments], Moscow: RIA "Standarty i kachestvo", 2002, 576 p. (In Russ.)
 5. Volgin V.V. *Logistika khraneniya tovarov. Prakticheskoye posobiye* [Logistics of storage of goods. Practical guide], Moscow: Dashkov i Ko, 2010, 410 p. (In Russ.)
 6. Papadimitriu Kh., Stayglits K. *Kombinatornaya optimizatsiya. Algoritmy i slozhnost'* [Combinatorial optimization. Algorithms and complexity], Moscow: Mir, 1984, 512 p. (In Russ.)
 7. Levin V.I. [Continuous-logical algorithms for solving combinatorial problems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2007, vol. 13, no. 3, pp. 687-698. (In Russ., abstract in Eng.)
 8. Tarakanov V.Ye. *Kombinatornyye zadachi i (0,1)-matritsy* [Combinatorial problems and (0,1)-matrices], Moscow: Nauka, 1985, 192 p. (In Russ.)
-

Anwendung des Ressourcenmodells in Berechnungen für Automatisierung der Lagerverwaltung

Zusammenfassung: Es ist der Ressourcenansatz zur Modellierung des Vorgangs des Lagerbestands gezeigt. Das Problem der Optimierung der Platzierung hinsichtlich des Kriteriums der für die weitere Entnahme der Waren aufgewendeten Ressourcen sowie ihrer Dienstleistung im Prozess des Handelsunternehmens ist formuliert. Die betrachteten Techniken zusammen mit den wirtschaftlichen Kriterien zur Beurteilung der Dynamik des Warenverkaufs können in mathematischen Geräten von Automatisierungssystemen der Lagerverwaltung verwendet werden.

Utilisation du modèle de ressource dans les calculs de l'automatisation de la gestion de l'entrepôt

Résumé: Est présentée une approche de ressources pour modéliser le processus de la création de stock. L'objectif est d'optimiser le placement suivant le critère des ressources dépensées pour la poursuite de l'excavation du produit, ainsi que son service dans le processus d' fonctionnement de l'entreprise commerciale. Les méthodes examinées, associées aux critères économiques d'évaluation de la dynamique de la vente des marchandises, peuvent être utilisées dans l'application mathématique des systèmes d'automatisation de la gestion des entrepôts.

Авторы: *Чашкина Татьяна Владимировна* – магистрант; *Коробова Ирина Львовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; *Майстренко Наталья Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Егоров Сергей Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

МЕТОД ПОНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЛЮКОЗЫ НЕИНВАЗИВНЫМ СПЕКТРОФОТОМЕТРОМ

С. С. Фролов

*Кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники,
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
г. Оренбург, Россия; frolovsergey7@mail.ru*

Ключевые слова: неинвазивное измерение; неинвазивные глюкометры; сахарный диабет; сахарный диабет домашних животных; спектрофотометрический глюкометр.

Аннотация: В настоящее время проблема неинвазивного измерения концентрации глюкозы в крови человека и некоторых домашних животных, больных сахарным диабетом, остается актуальной. Обоснована необходимость одновременного контроля содержания воды и гемоглобина в крови при каждом определении концентрации глюкозы спектрофотометрическим методом для обеспечения требуемой погрешности измерения. Предложена модифицированная структурная схема спектрофотометрического неинвазивного измерителя содержания глюкозы и метод измерения, возможность реализации которых позволит уменьшить влияние суточных колебаний концентрации воды и гемоглобина в крови на погрешность измерения.

Введение

Сахарный диабет (СД) – тяжелое заболевание как для человека, так и для некоторых домашних животных – собак, кошек и непарнокопытных с однокамерным желудком. Лечению СД у животных посвящено много научных публикаций. Больным СД целесообразно многократно в течение суток (3 – 5 раз) делать измерение концентрации глюкозы в крови, а пациентам с тяжелой степенью – выполнять непрерывный ее мониторинг. Соответственно, для пациентов с легкой степенью СД желательно, а для тяжелых – необходимо применение неинвазивных глюкометров.

Известно об испытаниях в 2015 году приложения Cardiogram для умных часов Apple Watch. По фотоплетизмограммам сердечного ритма 14 000 человек у 463 выявлен недиагностированный СД. Установленная точность диагноза 85 % удовлетворительно соотносится с требуемой максимальной погрешностью измерений 15 % [1]. Критерии диагностики определены на основе анализа кардиограмм 33 000 человек, страдающих СД и другими заболеваниями. Однако статистических методов проверки только 14 000 тысяч человек недостаточно для внедрения предлагаемого приложения Cardiogram в медицину. Необходима большая выборка пациентов, а также испытания, основанные на сличении данных приложения с результатами измерений образцовых глюкометров.

Для остальных относительно несложных и дешевых неинвазивных глюкометров, вышедших на рынок, характерна на порядок большая по отношению

к инвазивным погрешность измерения. Метрологические характеристики самых точных глюкометров не достигают регламентируемых требований. Погрешности только 92 % измерений прибором GlucoTrack и 94,4 % – Symphony tCGM [2] – не превышают 15 % относительно референтных (прецизионных инвазивных) измерений. По международным и отечественным ГОСТам требуется не менее 95 % измерений с указанной погрешностью [1]. Себестоимость же названных моделей неинвазивных глюкометров на порядок выше инвазивных.

Таким образом, задача разработки простых и точных неинвазивных методов измерения содержания глюкозы в крови остается актуальной.

В настоящее время исследуется множество подходов к неинвазивному анализу. Многоволновые фотометры (спектрофотометры), реализующие метод спектроскопии поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (**БИК**-диапазон), отличаются простотой и экономичностью конструкций по сравнению к остальным, не требуют дополнительных расходных материалов и длительных процедур измерения. Однако выпущены только экспериментальные образцы спектрофотометрических глюкометров [3], результаты испытаний которых показали их способность определять малые концентрации глюкозы (Glucose) только *in vitro* – в растворах. Но *in vivo* (при анализе непосредственно в тканях) они функционируют с неприемлемо большой погрешностью из-за сверхмалого соотношения «сигнал/фон».

Причины высокого уровня фона следующие:

- в крови большие массовые доли приходятся на воду (Water – основной поглотитель) и гемоглобин (Hemoglobin) – приблизительно 75 – 85 %¹ и 13 – 16 % соответственно, на содержание глюкозы приходится порядка 0,1 % [4];
- относительное количество крови в организме – 6 – 8 %;
- свет частично отражается от неровностей кожи, рассеивается, поглощается окружающими сосуды тканями.

В итоге, доля глюкозы именно в крови просвечиваемых тканей, без учета глюкозы клеток и межклеточного вещества других тканей, не превышает 0,008 %.

1. Окклюзионный спектрофотометрический глюкометр

В пособии [3] рассмотрен один из вариантов многоволнового фотометрического глюкометра – окклюзионный спектрофотометр, устройство и методика измерения которого теоретически исключают составляющие погрешности от рассеяния тканями и фонового поглощения сосудов. В устройстве применяются два источника света (рис. 1): при длине волны λ_G максимума поглощения глюкозы и при максимуме гемоглобина λ_{Hg} .

Микропроцессором через блок фотоприемников 5 и АЦП 6 фиксируются четыре показания: интенсивности $\Phi_{G,1}$ и $\Phi_{Hb,1}$ для обеих длин волн после ткани при ненакачанной манжете 11 (обычное кровенаполнение φ_1), и интенсивности $\Phi_{G,2}$ и $\Phi_{Hb,2}$ при накачанной манжете (кровенаполнение φ_2).

В пособии [3] приведено выражение для вычисления концентрации глюкозы по результатам измерений

$$c_G = \left[\left\{ \frac{s_{Hb}}{s_G} \ln \left(\frac{\Phi_{G,1}}{\Phi_{G,2}} \right) \right\} / \ln \left(\frac{\Phi_{Hb,1}}{\Phi_{Hb,2}} \right) - \frac{\varepsilon_{Hb,G}}{\varepsilon_{Hb}} \right] \varepsilon_{Hb} c_{Hb} - \varepsilon_{W,G} c_W \Bigg/ \varepsilon_G, \quad (1)$$

выведенное на основании закона Бугера – Ламберта – Бера (**ЗЛБ**). Согласно ЗЛБ, например, интенсивности прошедших световых потоков $\Phi_{G,1}$ и $\Phi_{G,2}$ описаны в [3] примерно так:

¹ Вода плазмы и вода форменных элементов включительно.

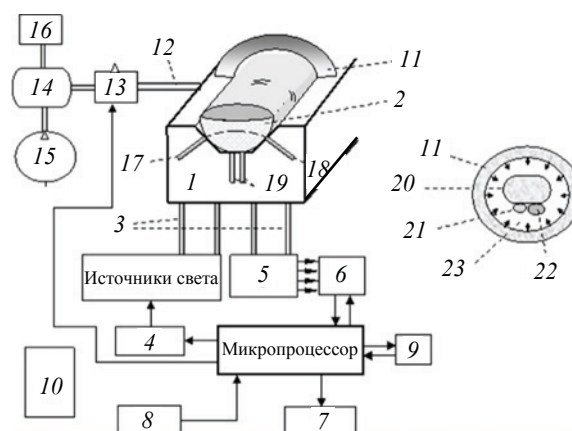


Рис. 1. Структурная схема окклюзионного спектрофотометрического глюкометра [3]:
 1 – измерительное ложе для пальца; 2 – передняя фаланга пальца; 3 – продолжения световодов; 4 – модулятор источников света; 5 – фотоприемники и усилители сигналов; 6 – демодулятор и АЦП; 7 – дисплей; 8 – клавиатура; 9 – интерфейсный канал связи с компьютером; 10 – блок питания; 11 – надувное кольцо-манжета; 12 – воздуховод; 13 – управляемый пневмовентиль; 14 – ресивер; 15 – насос; 16 – манометр; 17 – 19 – световоды; 20 – костная ткань; 21, 22 – венозные и артериальные сосуды; 23 – мягкие ткани

$$\Phi_{G,1} = \Phi_{G,0} \exp \left(- \left(K_{G,1} + (\varepsilon_{W,G} c_W + \varepsilon_{Hb,G} c_{Hb} + \varepsilon_G c_G) \phi_1 \right) s_G \right); \quad (2)$$

$$\Phi_{G,2} = \Phi_{G,0} \exp \left(- \left(K_{G,2} + (\varepsilon_{W,G} c_W + \varepsilon_{Hb,G} c_{Hb} + \varepsilon_G c_G) \phi_2 \right) s_G \right), \quad (3)$$

где $\Phi_{G,0}$ – интенсивность света перед входом в биоткань (см. рис. 1); $K_{G,1}$, $K_{G,2}$ – коэффициенты поглощения, учитывающие отражение, рассеяние тканями и фоновое поглощение за пределами кровеносных сосудов соответственно; ε_G , $\varepsilon_{Hb,G}$, $\varepsilon_{W,G}$ – соответственно натуральные молярные коэффициенты экстинкции глюкозы, гемоглобина и воды при длине волны λ_G ; ε_{Hb} – аналогичный коэффициент экстинкции гемоглобина при длине λ_{Hb} ; c_G , c_{Hb} , c_W – молярные концентрации глюкозы, гемоглобина и воды соответственно; s_G – суммарный путь прохождения световых потоков через палец.

В дальнейшем, в рамках настоящего текста, будем придерживаться следующей системы индексации переменных:

– первый индекс интенсивностей потоков Φ , фоновых коэффициентов поглощения K , путей прохождения света s , соответствует фотодатчику анализируемого вещества, длине волны λ излучаемого света;

– первый индекс коэффициента экстинкции ε соответствует веществу, а второй – длине волны излучаемого света. Причем, если вещество и длина волны друг с другом совпадают, второй индекс будет опускаться. Например, вместо переменной $\varepsilon_{W,W}$ будет писаться ε_W .

Из предположения, что составляющие отражения, рассеяния и фонового поглощения не зависят от кровенаполнения – $K_{G,1} = K_{G,2}$, при определении разностей оптических плотностей

$$\Phi_{G,2} / \Phi_{G,1} = \exp \left(- (\varepsilon_{W,G} c_W + \varepsilon_{Hb,G} c_{Hb} + \varepsilon_G c_G) (\phi_2 - \phi_1) s_G \right) \quad (4)$$

микропроцессорная измерительная система избавится от указанных составляющих погрешности. Аналогичные предположения справедливы и для светового

потока при длине волны λ_{Hb} . Значения его интенсивностей $\Phi_{\text{Hb},1}$ и $\Phi_{\text{Hb},2}$ использовались для определения разницы кровенаполнений φ_2 и φ_1

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \ln \left(\frac{\Phi_{\text{Hb},1}}{\Phi_{\text{Hb},2}} \right) / \varepsilon_{\text{Hb}} c_{\text{Hb}} s_{\text{Hb}}, \quad (5)$$

которая уже учтена в выражении (1).

Концентрацию возможно вычислить с помощью (1), если известны концентрации воды c_W и гемоглобина c_{Hb} . В пособии [3] утверждается, что данные величины флуктуируют очень слабо, достаточно контролировать и корректировать их раз в полгода по инвазивным анализам крови. Однако в течение суток у здорового человека гематокрит, со значением которого связана концентрация воды в крови, а также концентрация гемоглобина могут изменяться с относительными амплитудами:

$$\delta c_{W,0} = 10 - 25 \% [5] \text{ и } \delta c_{\text{Hb},0} = 8 - 15 \% [6] \quad (6)$$

соответственно. У больных СД указанные колебания значительно выше. Поэтому упомянутое выше утверждение вызывает сомнение.

В настоящей работе оценивается степень влияния указанных суточных колебаний на погрешность неинвазивного измерения содержания глюкозы в крови и определяется правомочность утверждений пособия [3]. Также предлагается вариант структурной схемы спектрофотометрического измерителя содержания глюкозы и версия метода измерения, дающие возможность устранить влияние указанных колебаний.

2. Оценка влияния суточных колебаний содержания воды и гемоглобина

Рассмотрим относительный уровень оптической плотности, вносимой глюкозой, на фоне гемоглобина и воды, при различных максимумах спектров поглощения глюкозы – при длинах волн $\lambda_{G,1} = \{843, 928, 1015\}$ (рис. 2, а) и $\lambda_{G,2} = 1590$ нм (рис. 2, б). В таблице 1 приведены значения коэффициентов экстинкции крови, гемоглобина и глюкозы при указанных длинах волн, полученные в результате анализа известных спектров поглощения. Также приведены средние значения концентраций воды и гемоглобина и максимальное значение концентрации глюкозы для здорового человека.

Выражение для степени соотношения (4) – разности оптических плотностей (РОП) – обозначим за ΔD

$$\Delta D = (\varepsilon_{W,G} c_W + \varepsilon_{\text{Hb},G} c_{\text{Hb}} + \varepsilon_G c_G) (\varphi_2 - \varphi_1) s_G. \quad (7)$$

В таблице 2 приведены значения произведений коэффициентов экстинкции и концентраций, полученные по данным табл. 1, в табл. 3 – для тех же длин волн значения доли РОП, обусловленной глюкозой

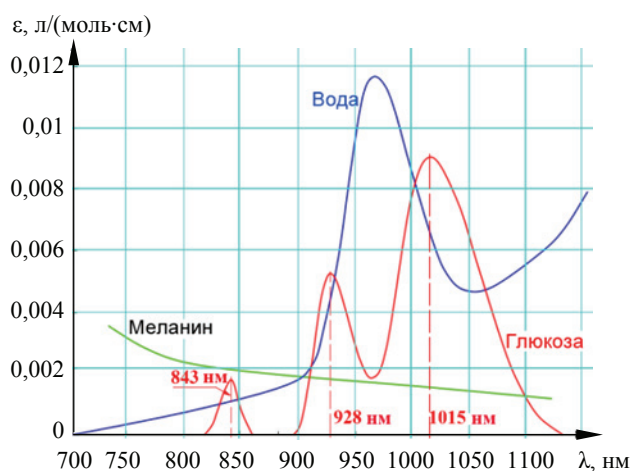
$$\delta D_G = \frac{\varepsilon_G c_G (\varphi_2 - \varphi_1) s}{\Delta D} = \frac{\varepsilon_G c_G}{\varepsilon_{W,G} c_W + \varepsilon_{\text{Hb},G} c_{\text{Hb}} + \varepsilon_G c_G}; \quad (8)$$

отношения долей РОП, обусловленных глюкозой и водой

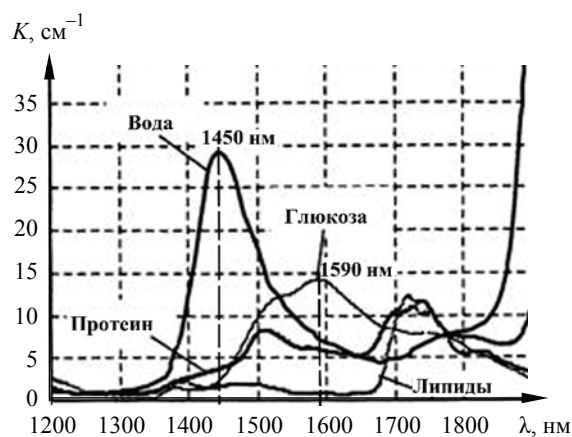
$$\delta D_{G,W} = \frac{\delta D_G}{\delta D_W} = \frac{\varepsilon_G c_G}{\varepsilon_{W,G} c_W}; \quad (9)$$

а также глюкозой и гемоглобином

$$\delta D_{G,\text{Hb}} = \frac{\delta D_G}{\delta D_{\text{Hb}}} = \frac{\varepsilon_G c_G}{\varepsilon_{\text{Hb},G} c_{\text{Hb}}}. \quad (10)$$



а)



б)

Рис. 2. Спектры поглощения воды и глюкозы в диапазонах 700...1150 нм [7] (а) и 1,2...1,9 мкм [8] (б)

Таблица 1

Молярные коэффициенты экстинкции и концентрации веществ в крови при различных максимумах поглощения [7 – 9]

Длина волны λ_G , нм	Вода		Гемоглобин		Глюкоза	
	ε_G , л/(моль·см)	c_W , моль/л (%)	$\varepsilon_{Hb,G}$, л/(моль·см)	c_{Hb} , (ммоль/л)/(г/л)	$\varepsilon_{W,G}$, л/(моль·см)	c_G , ммоль/л
843	$1,1 \cdot 10^{-3}$	44,44 (0,8)	1,0	2,246 (150)	$1,8 \cdot 10^{-3}$	5,6
928	$4,4 \cdot 10^{-3}$		1,09		$5,2 \cdot 10^{-3}$	
1015	$6,7 \cdot 10^{-3}$		1,0		$9,05 \cdot 10^{-3}$	
1590	0,13		1,0		1,6	

Таблица 2

**Значения произведений коэффициентов экстинкции и концентраций
для разных пиков поглощения глюкозы**

$\lambda_G, \text{ нм}$	$\varepsilon_{W,G} c_W, \text{ см}^{-1}$	$\varepsilon_{Hb,G} c_{Hb}, \text{ см}^{-1}$	$\varepsilon_G c_G, \text{ см}^{-1}$
843	0,0489	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$
928	0,19	$2,45 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
1015	0,298	$2,25 \cdot 10^{-3}$	$5,07 \cdot 10^{-5}$
1590	5,6	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,008

Таблица 3

**Результаты оценок долей разностей оптических плотностей
и флюктуаций концентраций Glucose, Water и Hemoglobin,
вызывающих их одинаковые изменения**

$\lambda_G, \text{ нм}$	δD_G	$\delta D_{G,W}$	$\delta D_{G,Hb}$	δc_G	δc_W	δc_{Hb}
843	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$2,06 \cdot 10^{-4}$	$4,489 \cdot 10^{-3}$	0,15	$3,09 \cdot 10^{-5}$	$6,73 \cdot 10^{-4}$
928	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,489 \cdot 10^{-4}$	0,012		$2,234 \cdot 10^{-5}$	$1,784 \cdot 10^{-3}$
1015	$1,69 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,023		$2,553 \cdot 10^{-5}$	$3,385 \cdot 10^{-3}$
1590	0,04	$1,601 \cdot 10^{-3}$	3,992		$2,401 \cdot 10^{-4}$	0,599

Согласно ГОСТ Р ИСО 15197–2015 [1], ошибка измерений концентрации глюкозы должна быть в пределах $\pm 0,83$ ммоль/л значений при концентрации глюкозы $< 5,55$ ммоль/л и в пределах 15 % при концентрации глюкозы $\geq 5,55$ ммоль/л. Оценим, каково должно быть изменение концентраций воды и гемоглобина, вызывающее указанную ошибку $\delta c_G = 0,15$ (см. табл. 2), используя результаты вычислений (9) и (10):

$$\delta c_W = \delta c_G \delta D_{G,W}, \tag{11}$$

$$\delta c_{Hb} = \delta c_G \delta D_{G,Hb}. \tag{12}$$

Результаты оценок приведены в табл. 3.

Сравнивая данные (6) действительных относительных суточных колебаний содержания воды $\delta c_{W,0}$ и гемоглобина $\delta c_{Hb,0}$ и результаты вычислений (11) и (12) можем заключить, что при длинах волн $\lambda_G = \{843, 928 \text{ и } 1015 \text{ нм}\}$ суточные флюктуации воды на четыре порядка, а гемоглобина – в разы превышают значения, допустимые для измерения глюкометром (см. рис. 1) с приемлемой погрешностью. Аналогичная ситуация наблюдается и при других пиках спектра поглощения глюкозы, кроме длины волны $\lambda_G = 1590$ нм – здесь существенные искажения показаний вызовут только флюктуации концентрации воды, и влияния их на порядок меньше.

Кроме того, следует критично отнестись к выражению для разности кровенаполнений (5), так как при его выводе в [3] пренебрегли составляющей $\varepsilon_{W,Hb} c_W$, которая приблизительно в 1000 раз меньше составляющей $\varepsilon_{Hb} c_{Hb}$. Это приведет к относительным погрешностям вычисления разности кровенаполнений (5) и разности оптических плотностей (7) порядка 10^{-3} , что превысит минимальные относительные изменения оптической плотности, обусловленные глюкозой, при первых трех длинах волн (см. табл. 3).

Таким образом, при пиках поглощения глюкозы $\lambda_G = \{843, 928 \text{ и } 1015 \text{ нм}\}$ во время измерений глюкозы необходимо одновременное измерение концентраций и глюкозы и воды. При $\lambda_G = 1590 \text{ нм}$ достаточно дополнительно измерять только содержание воды, содержание гемоглобина можно корректировать реже.

3. Структурная схема спектрофотометра с дополнительными функциями измерения содержания воды и гемоглобина

Для решения выявленных проблем предлагается структурная схема глюкометра (рис. 3) – модификации окклюзионного спектрофотометра (см. рис. 1), отличающаяся дополнительными фотодатчиками для определения концентраций гемоглобина (при пиках поглощения гемоглобина $\lambda_{Hb,2} \approx 410 \text{ нм}$ и $\lambda_{Hb} \approx 565 \text{ нм}$ (рис. 4, а)) и воды (при $\lambda_W = 1450 \text{ нм}$ (см. рис. 2, б и 4, б)) в крови, а также способом определения кровенаполнений капилляров – по фотоплетизмограмме пульса. Кровенаполнение φ_1 соответствует максимуму фотоплетизмограммы в фазе систолы (сердечная мышца сжата), φ_2 – минимуму фотоплетизмограммы в фазе диастолы (сердечная мышца расслаблена).

На основе ЗБЛБ получено выражение для вычисления концентрации глюкозы c_G . Ниже приведен его вывод.

Выражения для интенсивностей потоков в фазе систолы $\Phi_{G,1}$ и диастолы – $\Phi_{G,2}$ аналогичны соотношениям (2) и (3), разность оптических плотностей (натуральных) в указанных фазах получим, используя отношение (4)

$$\ln(\Phi_{G,2}/\Phi_{G,1}) = (\varepsilon_{W,G}c_W + \varepsilon_{Hb,G}c_{Hb} + \varepsilon_Gc_G)(\varphi_1 - \varphi_2)s_G, \quad (13)$$

откуда получим выражение для концентрации глюкозы

$$c_G = \left(\frac{\ln(\Phi_{G,2}/\Phi_{G,1})}{(\varphi_1 - \varphi_2)s_G} - \varepsilon_{W,G}c_W + \varepsilon_{Hb,G}c_{Hb} \right) / \varepsilon_G. \quad (14)$$

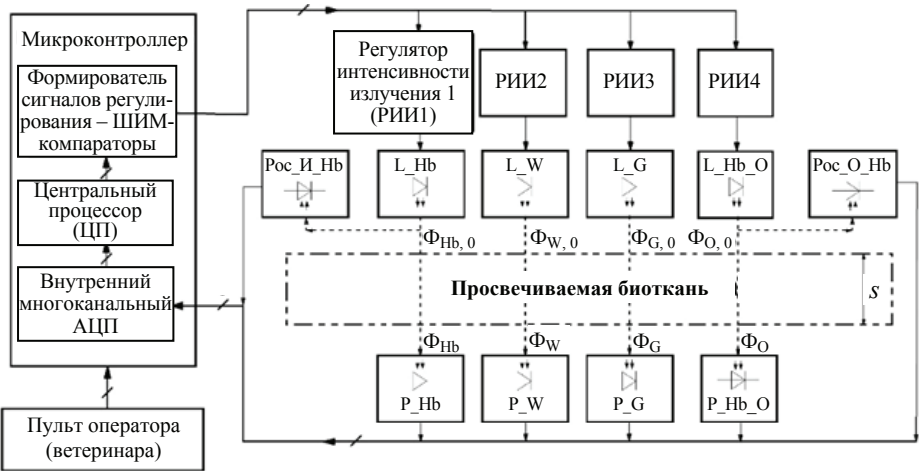


Рис. 3. Структурная схема спектрофотометра:

«L_W», «L_G», «L_Hb», «L_Hb_O» – источники света при длинах волн λ_W , λ_G , λ_{Hb} , $\lambda_{Hb,2}$ соответственно; «P_W», «P_G», «P_Hb», «P_Hb_O» – фотодетекторы пройденного света при длинах волн λ_W , λ_G , λ_{Hb} , $\lambda_{Hb,2}$ соответственно; «Poc_O_Hb» – фотодетекторы контуров обратной связи

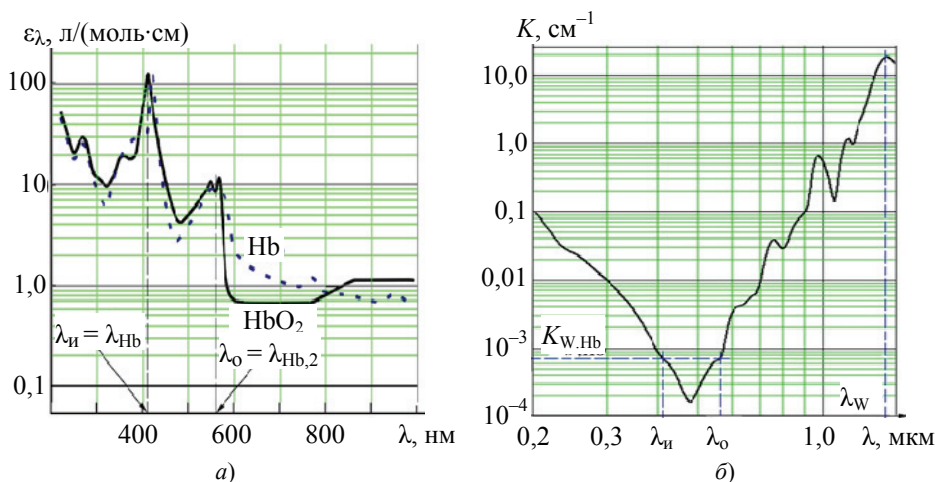


Рис. 4. Спектры поглощения гемоглобина [10] (а) и воды [9] (б)

Уточним выражение для разности (5), записав аналогичные соотношения ЗБЛБ для интенсивностей потоков при длине волны гемоглобина $\lambda_{\text{Hb}} = 410 \text{ нм}$:

$$\Phi_{\text{Hb},1} = \Phi_{\text{Hb},0} \exp\left(-(K_{\text{G},1} + (\varepsilon_{\text{W,Hb}}c_{\text{W}} + \varepsilon_{\text{Hb}}c_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{G,Hb}}c_{\text{G}})\varphi_1)\right)s_{\text{Hb}}, \quad (15)$$

$$\Phi_{\text{Hb},2} = \Phi_{\text{Hb},0} \exp\left(-(K_{\text{G},2} + (\varepsilon_{\text{W,Hb}}c_{\text{W}} + \varepsilon_{\text{Hb}}c_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{G,Hb}}c_{\text{G}})\varphi_2)\right)s_{\text{Hb}}. \quad (16)$$

С учетом, что $\varepsilon_{\text{G,Hb}} \ll \varepsilon_{\text{G}}, \varepsilon_{\text{G,Hb}}c_{\text{G}} \ll \varepsilon_{\text{Hb}}c_{\text{Hb}}$ и $\varepsilon_{\text{G,Hb}}c_{\text{G}} \ll \varepsilon_{\text{W,Hb}}c_{\text{W}}$, а также $K_{\text{G},1} = K_{\text{G},2}$, из выражений (15) и (16) получим

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \ln\left(\frac{\Phi_{\text{Hb},1}}{\Phi_{\text{Hb},2}}\right) / ((\varepsilon_{\text{W,Hb}}c_{\text{W}} + \varepsilon_{\text{Hb}}c_{\text{Hb}})s_{\text{Hb}}). \quad (17)$$

Подставляя (17) в (14), уточним выражение для концентрации глюкозы

$$c_{\text{G}} = \left(\frac{\ln(\Phi_{\text{G},1}/\Phi_{\text{G},2})s_{\text{Hb}}}{\ln(\Phi_{\text{Hb},1}/\Phi_{\text{Hb},2})s_{\text{G}}} (\varepsilon_{\text{W,Hb}}c_{\text{W}} + \varepsilon_{\text{Hb}}c_{\text{Hb}}) - \varepsilon_{\text{W,G}}c_{\text{W}} - \varepsilon_{\text{Hb,G}}c_{\text{Hb}} \right) / \varepsilon_{\text{G}}. \quad (18)$$

Из выражений, аналогичных (2), (3) или (15), (16), с учетом, что для световых потоков при длине волны воды $\lambda_{\text{W}} = 1450 \text{ нм}$ (см. рис. 4) выполняются условия $\varepsilon_{\text{G,W}} \ll \varepsilon_{\text{G}}, \varepsilon_{\text{G,W}}c_{\text{G}} \ll \varepsilon_{\text{Hb,W}}c_{\text{Hb}}$ и $\varepsilon_{\text{G,W}}c_{\text{G}} \ll \varepsilon_{\text{W}}c_{\text{W}}$, $K_{\text{W},1} = K_{\text{W},2}$, а также используя результат (17), получим выражение для концентрации воды

$$c_{\text{W}} = c_{\text{Hb}} \left[\left(\varepsilon_{\text{Hb}} \frac{s_{\text{Hb}}}{s_{\text{W}}} \frac{\ln(\Phi_{\text{W},1}/\Phi_{\text{W},2})}{\ln(\Phi_{\text{Hb},1}/\Phi_{\text{Hb},2})} - \varepsilon_{\text{Hb,W}} \right) / \left(\varepsilon_{\text{W}} - \varepsilon_{\text{W,Hb}} \frac{\ln(\Phi_{\text{W},1}/\Phi_{\text{W},2})}{\ln(\Phi_{\text{Hb},1}/\Phi_{\text{Hb},2})} \right) \right]. \quad (19)$$

Для измерения молярной концентрации гемоглобина c_{Hb} в системе (см. рис. 3) воспользовались методикой из пособия [3]. С помощью МК предлагается вычислить средние значения интенсивностей потоков $\bar{\Phi}_{\text{Hb},2}$ и $\bar{\Phi}_{\text{Hb}}$ с фотодатчиков P_Hb_O и P_Hb (см. рис. 3), соответствующих опорной длине волны $\lambda_{\text{o}} = \lambda_{\text{Hb},2} = 565 \text{ нм}$ и длине волны излучения $\lambda_{\text{и}} = \lambda_{\text{Hb}} = 410 \text{ нм}$. Результаты измерений предлагается усреднять в течение интервала времени, соответствующего целому числу сердцебиений, с шагом дискретизации, удовлетворяющему критерию Котельникова. Значения $\lambda_{\text{Hb},2}$ и λ_{Hb} предлагается подобрать таким образом,

чтобы коэффициенты экстинкции воды при них не отличались (см. рис. 4), пути прохождения света для обеих длин волн выровнять

$$\varepsilon_{W,Hb} = \varepsilon_{W,Hb,2}, \quad s_{Hb} = s_{Hb,2}.$$

Запишем выражения ЗБЛБ для указанных потоков

$$\overline{\Phi}_и = \overline{\Phi}_{и,0} \exp\left(-(K_{Hb} + \varepsilon_{W,Hb}c_W + \varepsilon_{Hb}c_{Hb})s_{Hb}\right), \quad (20)$$

$$\overline{\Phi}_о = \overline{\Phi}_{о,0} \exp\left(-(K_{Hb,2} + \varepsilon_{W,Hb}c_W + \varepsilon_{Hb,2}c_{Hb})s_{Hb}\right) \quad (21)$$

Длины волн опорного потока и потока излучения друг от друга отстоят недалеко (см. рис. 4, а), поэтому коэффициенты рассеяния и фонового поглощения для них отличаются незначительно

$$K_{Hb} = K_{Hb,2}.$$

Контурами обратной связи из цепочек «фотоприемник Рос_И_Hb – канал 1 АЦП – ЦП – ШИМ-компаратор 1 – РР11 – светодиод L_Hb» и «фотоприемник Рос_О_Hb – канал 2 АЦП – ЦП – ШИМ-компаратор 2 – РР14 – светодиод L_Hb_О» (см. рис. 3) необходимо обеспечить равенство входных потоков $\Phi_{и,0} = \Phi_{о,0}$. Преобразуя отношение потоков (20) и (21), получим выражение для концентрации гемоглобина

$$c_{Hb} = \ln\left(\frac{\overline{\Phi}_о}{\overline{\Phi}_и}\right) / ((\varepsilon_{Hb} - \varepsilon_{Hb,2})s_{Hb}). \quad (22)$$

Таким образом, МК должен по результатам измерений вычислить с помощью (22) концентрацию гемоглобина, затем с помощью (19) молярную концентрацию в крови воды, затем – концентрацию глюкозы с помощью выражения (18).

Заключение

Результаты исследований, приведенные во втором разделе, показывают, что без мониторинга содержания воды и гемоглобина невозможно измерение концентрации глюкозы с приемлемой погрешностью. При длине волны $\lambda_G = 1590$ нм концентрацию гемоглобина также следует контролировать при каждом измерении, так как достоверность ее значения влияет на погрешность вычисления содержания воды с помощью выражения (19).

Возможность реализации структурной схемы (см. рис. 3) и выражений (18), (19) и (22) в программе ее микроконтроллера позволит уменьшить составляющую погрешности, вызванную суточными флуктуациями содержания воды и гемоглобина.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 15197-2015. Требования к системам мониторинга глюкозы в крови для самоконтроля при лечении сахарного диабета. – Введ. 2016-06-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 73 с.
2. Неинвазивные глюкометры без забора крови (Омелон, Glucotrack) : отзывы, инструкции [Электронный ресурс] / Diabethelp.org – сайт про диабет и жизнь с ним. – Режим доступа : http://diabethelp.org/izmeryaem/neinvazivnyj-glyukometr.html#Gluco_Track (дата обращения: 13.01.2019).
3. Войтович, И. Д. Интеллектуальные сенсоры : учеб. пособие / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 624 с.
4. Березов, Т. Т. Биологическая химия : учебник / Т. Т. Березов, Б. Ф. Коровкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Медицина, 1998. – 704 с.

5. Норма гематокрита в крови, его функции, причины отклонения от нормы [Электронный ресурс] / AnalizOnline.ru – расшифровка медицинских анализов. – Режим доступа : <http://analizonline.ru/gematokrit.html> (дата обращения: 13.01.2019).
6. Домашняя медицинская энциклопедия. Симптомы и лечение самых распространенных заболеваний. – М. : АСТ ; СПб. : Сова, 2010. – 177 с.
7. Кривенко, С. С. Термоспектрометрический неинвазивный измеритель концентрации глюкозы в цельной крови человека [Электрон. ресурс] / С. С. Кривенко, А. А. Пулавский, С. А. Литвин, В. Е. Меланка // Науч.-производств. комплекс «Биопроминь». – Режим доступа : <http://www.amp.life3000.ru/articles/poluchenie-termostabilizirovannogo-spektra-i-ego-obrabotka.html> (дата обращения: 13.01.2019).
8. New Methodology to Obtain a Calibration Model for Noninvasive Near-Infrared Blood Glucose Monitoring / K. Maruo [et al] // *Applied Spectroscopy*. – 2006. – Vol. 60, No. 4. – P. 441 – 449.
9. Hale, G. M. Optical Constants of Water in the 200 nm to 200 μ m Wavelength Region / G. M. Hale, M. R. Querry // *Applied Optics*. – 1973. – Vol. 12, No. 3. – P. 555 – 563.
10. Chacko, V. Application of a Fiber Optic Probe for Blood Oxygenation Measurement Using Near Infrared Spectroscopy / V. Chacko, S. Bansal // *Journal of Lasers, Optics & Photonics*. – 2016. – Vol. 3, Issue 2. – 6 p. doi: 10.4172/2469-410X.1000139

A Method for Reducing Glucose Concentration Measurement Error with a Non-Invasive Spectrophotometer

S. S. Frolov

*Department of Industrial Electronics and Information Measuring Technology,
Orenburg State University, Orenburg, Russia; frolovsergey7@mail.ru*

Keywords: non-invasive measurement; non-invasive blood glucose meters; diabetes; pet diabetes; spectrophotometric glucometer.

Abstract: Currently, the problem of non-invasive measurement of the concentration of glucose in the blood of humans and some diabetic pets remains relevant. The necessity of simultaneous control of the content of water and hemoglobin in the blood during each measurement of glucose concentration by a spectrophotometric method to ensure the required measurement error is substantiated. A modified structural diagram of a spectrophotometric non-invasive glucometer and a measurement method have been proposed, the possibility of which will reduce the effect of daily fluctuations in the concentration of water and hemoglobin in blood on the measurement error.

References

1. GOST R ISO 15197-2015. *Trebovaniya k sistemam monitoringa glyukozy v krovi dlya samokontrolya pri lechenii sakharnogo diabeta* [Requirements for glucose monitoring systems in the blood for self-control in the treatment of diabetes], Moscow: Standartinform, 2015, 73 p. (In Russ.)
2. http://diabethelp.org/izmeryaem/neinvazivnyj-glyukometr.html#Gluco_Track (accessed 13 January 2019).
3. Voytovich I.D., Korsunskiy V.M. *Intellektual'nyye sensory: uchebnoye posobiye* [Intellectual Sensors: a Tutorial], Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2009, 624 p. (In Russ.)
4. Berezov T.T., Korovkin B.F. *Biologicheskaya khimiya: uchebnik* [Biological chemistry: a textbook], Moscow: Meditsina, 1998, 704 p. (In Russ.)

5. <http://analizonline.ru/gematokrit.html> (accessed 13 January 2019).
 6. *Domashnyaya meditsinskaya entsiklopediya. Simptomy i lecheniye samykh rasprostranennykh zabolevaniy* [Home Medical Encyclopedia. Symptoms and treatment of the most common diseases], Moscow: AST, St. Petersburg: Sova, 2010, 177 p. (In Russ.)
 7. <http://www.amp.life3000.ru/articles/poluchenie-termostabilizirovannogo-spektra-i-ego-obrabotka.html> (accessed 13 January 2019).
 8. Maruo K., Oota T., Tsurugi M., Nakagawa T., Arimoto H., Tamura M., Ozaki Yu., Yamada Yu. New Methodology to Obtain a Calibration Model for Noninvasive Near-Infrared Blood Glucose Monitoring, *Applied Spectroscopy*, 2006, vol. 60, no. 4, pp. 441-449.
 9. Hale G.M., Querry M.R. Optical Constants of Water in the 200 nm to 200 μ m Wavelength Region, *Applied Optics*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555-563.
 10. Chacko V., Bansal S. Application of a Fiber Optic Probe for Blood Oxygenation Measurement Using Near Infrared Spectroscopy, *Journal of Lasers, Optics & Photonics*, 2016, vol. 3, issue 2, 6 p., doi: 10.4172/2469-410X.1000139
-

Methode zur Reduzierung des Messfehlers der Glukosekonzentration mit nicht-invasivem Spektrophotometer

Zusammenfassung: Derzeit bleibt das Problem der nicht-invasiven Messung der Glukosekonzentration im Blut von Menschen und einigen diabetischen Haustieren aktuell. Die Notwendigkeit einer gleichzeitigen Kontrolle des Wasser- und Hämoglobingehalts im Blut bei jeder spektrophotometrischen Bestimmung der Glukosekonzentration zur Sicherstellung des erforderlichen Messfehlers ist begründet. Es sind ein modifiziertes Strukturdiagramm eines spektrophotometrischen nichtinvasiven Glukosemessgeräts und ein Messverfahren vorgeschlagen, mit deren Hilfe der Einfluss täglicher Schwankungen der Konzentration von Wasser und Hämoglobin im Blut auf den Messfehler verringert werden kann.

Méthode de réduction de l'erreur de la mesure de la concentration de glucose par un spectrophotomètre non invasive

Résumé: A l'heure actuelle, le problème de la mesure non invasive de la concentration de glucose dans le sang d'une personne et de certains animaux atteints de diabète reste pertinent. Est justifiée la nécessité de contrôler simultanément la teneur de l'eau et de l'hémoglobine dans le sang à chaque détermination de la concentration de glucose par la méthode spectrophotométrique pour assurer l'erreur de mesure. Sont proposés le schéma structurel modifié du compteur de glucose non invasif spectrophotométrique et la méthode de mesure, ce qui permettra de réduire l'influence des fluctuations quotidiennes de la concentration de l'eau et des hémoglobines dans le sang sur l'erreur de mesure.

Автор: Фролов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия.

Рецензент: Булатов Виталий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия.

ОЦЕНИВАНИЕ КООРДИНАТ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МАНЕВРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

У. Р. Наимов

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; resbn@jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: воздушная цель; измерения; маневр; модель; слежение; трехмерная модель.

Аннотация: Рассмотрены особенности создания модели маневренного движения БПЛА в интересах исследования путей повышения точности сопровождения воздушной цели на основе алгоритмов оценивания координат траекторного движения БПЛА.

Для расчета траектории движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА) целесообразно использовать траекторную систему координат OX_T, OY_T, OZ_T . Траекторная система координат является подвижной, ее начало помещается на летательном аппарате (ЛА). Ось OX_T направлена по касательной к траектории БПЛА и совпадает с вектором скорости; ось OY_T – параллельно земной поверхности. Для оценки параметров движения БПЛА выбираются траекторная OX_T, OY_T, OZ_T и нормальная системы координат, лучевая система координат OX_L, OY_L, OZ_L и нормальная система координат в радиолокационной станции (РЛС) [1, 2].

Вторичная обработка информации применяется для того, чтобы построить траекторию и оценить параметры движения БПЛА. При объединении траекторных отсчетов параметров вторичная обработка завершается построением траектории цели. Параметры траекторий поступают для совместной обработки, в результате которой дополнительно описываются «ложные» и уточняются «истинные» траектории.

Данная задача включает в себя оценивание параметров траектории, задаваемой обычно векторной функцией, расчет координат цели, а также операцию упорядочивания движения отметок целей. Вторичная обработка информации осуществляется автоматически, с помощью цифровой вычислительной машины (ЦВМ).

Для решения задачи наблюдения целей по дальности обычно формируются оценки дальности $\hat{D}$ и скорости сближения $\hat{V}$ на основе алгоритма α - и β -фильтрации [3].

Исследования показали, что модели, приемлемые для оценок дальности и скорости сближения БПЛА, могут иметь место, если БПЛА движется с постоянной скоростью [3, 4]. При маневрах БПЛА радиальная скорость увеличивается в 3 – 3,5 раза, что является недопустимым в автоматических системах управления воздушным движением для своевременного сопровождения цели. Фильтрация траекторий и применение алгоритмов фильтрации необходимы для сглаживания

данных о наблюдаемых целях и прогнозирования предполагаемого положения цели [5].

Задача построения движения в пространстве решается, как правило, в два этапа. На *первом* этапе формируется набор точек пересечения в пространстве, заданных своими координатами. На *втором* – по сформированному набору точек в трехмерном пространстве строится параметрическая кривая, которая рассматривается в качестве пути следования БПЛА (траектории). Для решения задачи будем использовать трехмерную модель движения БПЛА, представляющую собой систему уравнений движения, записываемую с использованием траекторной системы координат. Тогда положению БПЛА в пространстве соответствуют уравнения равномерного движения:

$$\begin{aligned} X_{\text{БПЛА}}(k) &= X_{0\text{БПЛА}} + V_{X\text{БПЛА}} dtk; \quad Y_{\text{БПЛА}}(k) = Y_{0\text{БПЛА}} + V_{Y\text{БПЛА}} dtk; \\ Z_{\text{БПЛА}}(k) &= Z_{0\text{БПЛА}} + V_{Z\text{БПЛА}} dtk, \end{aligned} \quad (1)$$

где $X_{\text{БПЛА}}(k)$, $Y_{0\text{БПЛА}}$, $Z_{\text{БПЛА}}(k)$ – пространственные координаты БПЛА; $X_{0\text{БПЛА}}$, $Y_{0\text{БПЛА}}$, $Z_{0\text{БПЛА}}$ – начало дальности БПЛА; $V_{X\text{БПЛА}}$, $V_{Y\text{БПЛА}}$, $V_{Z\text{БПЛА}}$ – составляющие скорости БПЛА; dt – шаг изменения времени; k – дискретное время.

Выбор модели движения цели определяется с учетом характера ее движения. Следовательно, возникает необходимость проверить работу РЛС в процессе полета реальной цели и, особенно, при ее маневрировании. Наиболее точные данные и достоверная проверка качества функционирования РЛС могут быть получены только при проверке алгоритма на БПЛА в реальном полете с имитацией воздушного объекта.

В простейшем случае считают, что вектор скорости постоянен во времени и БПЛА не маневрирует. В установившемся режиме оценка скорости цели, полученная на основе системы уравнений (1), обеспечит оптимальную оценку скорости цели, если в РЛС отсутствуют ошибки. Таким образом, можно использовать процедуру расчета пространственного движения БПЛА на основе уравнений (1).

Далее можно провести пересчет траектории в полярную систему координат. Тогда дальность и скорость сближения от РЛС до БПЛА определяются соответственно формулам:

$$D_k = \sqrt{(X_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2 + (Y_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2 + (Z_{\text{БПЛА}}(k) - Z_k)^2},$$

где Z_k – вектор измерения координат БПЛА;

$$V_{\text{сб } k} = \frac{D_k - D_{k-1}}{dt}.$$

Для рассмотренной ситуации изменение истинного значения дальности между РЛС и БПЛА вполне удовлетворяет требованиям для имитации движения цели (рис. 1).

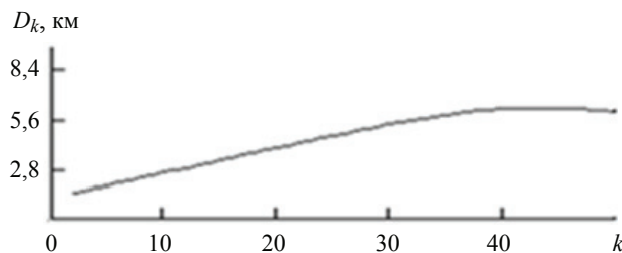


Рис. 1. Зависимость дальности от дискретного времени

В реальности цель не будет иметь постоянной скорости в течение всего времени. Фактически существует неопределенность в параметрах траектории, цель ускоряется или поворачивает в любой момент времени.

В результате цель может выйти за пределы строга системы сопровождения и происходит срыв слежения по дальности. Таким образом, канал слежения за воздушной целью по дальности должен быть в состоянии на основе соответствующего алгоритма фильтрации решать поставленные задачи в условиях маневренного движения БПЛА.

В качестве примера траектории полета показана пространственная кривая, по которой перемещается центр масс БПЛА в процессе его полета (рис. 2). Полет БПЛА может проходить на предельно малых высотах (1...5 м), в складках местности, в условиях применения активных и пассивных помех, определенного уровня инфракрасного излучения и акустического шума и при высокой маневренности БПЛА, резко изменяющей траекторию полета. Подъем на высоту и снижение БПЛА являются участками траектории, которые влияют на точность оценивания дальности.

Оценка высоты полета БПЛА обычно состоит из двух частей: определение скорости полета БПЛА в зависимости от высоты и оценивание соответствующих координат [6]. С помощью двух обычных фильтров Калмана можно создать систему оценивания высоты полета БПЛА.

На рисунке 3 представлено истинное подведение оцениваемой координаты (кривая 1), результирующие оценки первого и второго фильтров $\hat{x}(k)$ и упрощенного алгоритма, созданного на основе объединения отдельных фильтров [7] (кривая 2) и высота БПЛА h_k (кривая 3). Очевидно, что при резком изменении характера поведения параметров траектории точность оценки высоты полета БПЛА существенно не ухудшается для упрощенного алгоритма.

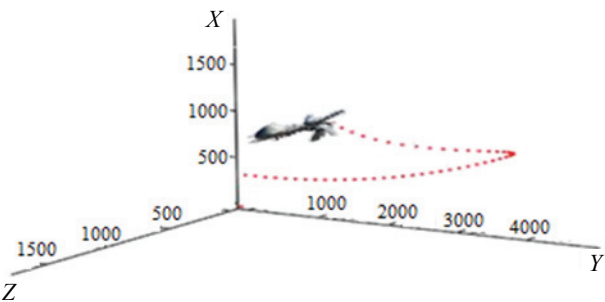


Рис. 2. Траектория движения БПЛА во время перемещения точки

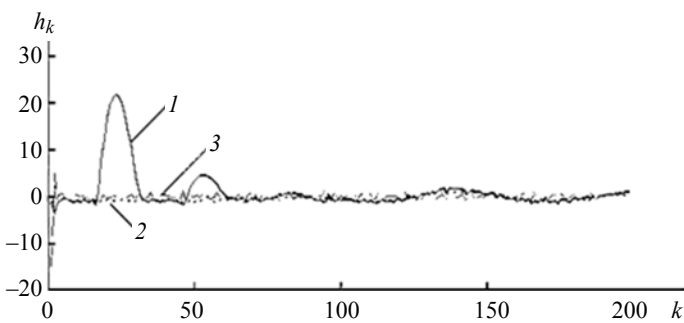


Рис. 3. Результаты измерений высоты полета после фильтрации

Отклонение высоты полета после фильтрации составляет не более 0,5 м. Сложность оценивания координат современных БПЛА обусловлена не только улучшением маневренных характеристик, но и существенным уменьшением их радиолокационной заметности. Снижение эффективной площади отражения цели приводит к уменьшению энергии отраженного сигнала, вызывая соответствующее уменьшение дальности устойчивого сопровождения цели.

Таким образом, создание модели для исследования траекторий движения БПЛА облегчает работу по синтезу систем вторичной обработки.

Список литературы

1. Задорожный, А. И. Автоматизированные системы управления полетами и воздушным движением / А. И. Задорожный. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1998. – 290 с.
2. Тарасенков, А. М. Динамика полета и боевое маневрирование летательного аппарата / А. М. Тарасенков. – М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. – 508 с.
3. Данилов, С. Н. Алгоритм прогноза координат воздушных объектов для обеспечения функционирования системы направленной связи на основе систем со случайным изменением структуры / С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин, Р. Р. Шатовкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 530 – 539.
4. Панасюк, Ю. Н. Алгоритмы функционирования дальномерного канала наземных РЛС СУП / Ю. Н. Панасюк, В. В. Луц // Межвузовская научно-техническая конференция «Военная электроника : опыт использования и проблемы подготовки специалистов». – Воронеж : ВИРЭ, 2005.
5. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
6. Федоров, Л. П. Приближенные методы оптимизации характеристик участников набора высоты самолета / Л. П. Федоров // Труды ЦАГИ. – 1987. – Вып. 2366.
7. Наимов, У. Р. Синтез канала слежения за параметрами случайного процесса в условиях их скачкообразного изменения / У. Р. Наимов, С. Н. Данилов, А. П. Пудовкин // Радиотехника. – 2019. – № 2. – С. 84 – 89. doi: 10.18127/j00338486-201902-16

Estimating Coordinates of Unmanned Aerial Vehicle Based on the Maneuvering Movement Model

U. R. Naimov

*Department of Radio Engineering, TSTU,
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

Keywords: aerial target; measurements; maneuver; model; tracking; three-dimensional model.

Abstract: The features of creating a model of maneuverable movement of a UAV are considered in the interest of studying ways to improve the accuracy of tracking an airborne target based on algorithms for estimating the coordinates of the trajectory movement of a UAV.

References

1. Zadorozhnyy A.I. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya poletami i vozдушnym dvizheniyem* [Automated flight control systems and air traffic], Moscow: VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1998, 290 p. (In Russ.)
2. Tarasenkov A.M. *Dinamika poleta i boyevoye manevrirovaniye letatel'nogo apparata* [Flight dynamics and combat maneuvering of the flight apparatus], Moscow: VVIA im. prof. N. Ye. Zhukovskogo, 1986, 508 p. (In Russ.)
3. Danilov S.N., Pudovkin A.P., Shatovkin R. R. [Algorithm for predicting the coordinates of airborne objects to ensure the functioning of a directional communication system based on systems with a random change in structure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 530-539. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Panasyuk Yu.N., Luts V.V. *Mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Voyennaya elektronika: opyt ispol'zovaniya i problemy podgotovki spetsialistov»* [Interuniversity scientific and technical conference "Military Electronics: Experience of Using and Problems of Specialist Training"], Voronezh: VIRE, 2005, (In Russ.)
5. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasyuk Yu.N. *Perspektivnyye metody obrabotki informatsii v radio-tekhnicheskikh sistemakh: monografiya* [Perspective methods of information processing in radio-technical systems: monograph], St. Petersburg: Ekspertnyye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
6. Fedorov L.P. [Approximate methods for optimizing the characteristics of aircraft climbers], *Trudy TSAGI* [Proceedings of TsAGI], 1987, issue 2366, (In Russ.)
7. Naimov U.R., Danilov S.N., Pudovkin A.P. [Synthesis of a channel for tracking parameters of a random process under conditions of their abrupt change], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2019, no. 2, pp. 84-89, doi: 10.18127/ j00338486-201902-16 (In Russ.)

Bewertung der Koordinaten eines unbemannten Luftfahrzeugs auf dem Grund des Modells der Manöverbewegung

Zusammenfassung: Es sind die Besonderheiten der Erstellung des Modells der manövrierfähigen Bewegung eines UAV im Interesse der Untersuchung von Möglichkeiten zur Verbesserung der Genauigkeit der Verfolgung eines Luftziels auf der Grundlage von Algorithmen zur Bewertung der Koordinaten der Flugbahnbewegung eines UAV betrachtet.

Évaluation des coordonnées du drone à la base du modèle du mouvement manœuvrable

Résumé: Sont examinées les particularités de la création d'un modèle du mouvement manœuvrable des drones afin d'étudier les moyens d'amélioration de la précision de la coprocession de la cible aérienne à la base d'algorithmes d'évaluation des coordonnées du mouvement autoroutier des drones.

Автор: *Наимов Умеджон Разибекович* – аспирант кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЕСТИБУЛЯРНЫХ НАРУШЕНИЙ

А. В. Горбунов¹, А. В. Непрокин¹, Е. Н. Туголуков², В. С. Егоров³

*Кафедры: «Биомедицинская техника» (1),
«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),
Тамбовский центр новых информационных технологий (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; alexey.gorbunov@mail.ru*

Ключевые слова: вестибулярные нарушения; видеонистагмография; дифференциальная диагностика; система визуализации нистагма, системы анализа и поддержки принятия решений.

Аннотация: Проанализированы применяемые методы дифференциальной диагностики вестибулярных нарушений. Визуализация нистагма является одним из видов диагностического обследования, достаточно широко используемых в неврологической и оториноларингологической практиках. Рассмотрены существующие информационные системы анализа и поддержки принятия решений при диагностике и лечении вестибулярных нарушений. Рассмотрены особенности программной реализации систем для визуализации и анализа нистагма. В результате проведенного анализа выделены достоинства и недостатки существующих методов и дальнейшие перспективы развития комплексов визуализации и систем обеспечения поддержки принятия решений в лечебно-диагностическом процессе.

При вестибулярном головокружении возникают разнообразные варианты нистагма, анализ которых позволяет врачу определить наличие патологии вестибулярной системы, уровень ее поражения и локализацию патологического процесса для выбора тактики обследования и лечения. Тщательный анализ нистагма позволяет избежать ошибок при дифференциальной диагностике доброкачественного пароксизмального позиционного головокружения и центрального позиционного нистагма.

В целях формирования наиболее адекватной тактики диагностики вестибулярных нарушений проведен анализ современных систем визуализации и анализа нистагма.

При визуальном осмотре больного не всегда удается зарегистрировать нистагм, поэтому в процессе диагностики применяются специальные устройства. Простейшим приспособлением для исследования нистагма являются очки Блессинга или Френзеля с астигматическими или диоптрическими (+20) линзами [1]. Конструкция очков может включать специальную подсветку. Большой силы собиравательные линзы создают препятствие для фиксации взгляда, которая способна подавить спонтанный нистагм. Это позволяет врачу проводить наблюдение за движением глаз.

Существенными недостатками такой диагностики являются: отсутствие возможности проанализировать параметры, которые нельзя определить визуально (дизритмия, неравномерность амплитуды и др.) [2], отсутствие регистрации данных обследования, а также передачи полученной информации дистанционно.

Другим методом регистрации движений глаз служит электроокулография (электронистамография). Метод основан на фиксации изменения электрического потенциала сетчатки и глазных мышц и его регистрации в графическом виде. Глазное яблоко по своей природе является диполем. Электрическая ось глазного яблока практически совпадает с оптической осью, зрительной линией [3]. При повороте глаза положение полюсов диполя изменяется. Отклонение электрической оси глаза во время нистагма приводит к изменению электрического потенциала, направление и амплитуда которого характеризуют определенное движение глазного яблока. Возникающий электрический сигнал регистрируется и выводится на дисплей или бумажную ленту.

Недостатком метода является использование электродов и, как следствие, наличие шумов и артефактов. Необходимость жесткой фиксации головы пациента в процессе диагностики существенно ограничивает время регистрации движений глаз [4]. Электроокулография не позволяет регистрировать торсионные (вращательные) движения глаз, проводить видеорегистрацию, фиксировать движения глаза меньше чем в 1° по амплитуде [1, 5].

Современным методом диагностики движений глаз является видеонистамография (ВНГ), также известная как видеоокулография (ВОГ). Метод основан на видеорегистрации движений глазного яблока с последующим программным анализом полученных результатов [6]. Системы ВНГ состоят из непрозрачных очков или пластиковой маски со встроенными инфракрасными камерами слежения, которые надеваются на голову пациента. Видеокамеры фиксируют движения глаз при проведении тестов и передают данные для последующего анализа. Тесты включают разные виды слежения за мишенью на проекционном экране, определенные повороты головы и туловища. С помощью специальной программы осуществляется детальный анализ параметров движения глаз. Видеозаписи глазодвигательной активности могут быть использованы для дистанционной диагностики пациента в соответствии с концепцией телемедицины [7 – 9]. Возможна регистрация не только нистагма, но и положения больного в момент исследования и комментариев к его ощущениям.

Преимуществами данного метода являются точная фиксация горизонтальных, вертикальных и вращательных движений глаз, возможность программной обработки данных в режиме реального времени, уменьшение времени процедуры диагностики, отсутствие шумов и артефактов в полученных результатах [2].

Кроме того, видеонистамографы регистрируют не косвенные, а необходимые количественные параметры (координаты центров зрачков, их скорости), причем делают это бесконтактным образом [10, 11]. Видеонистамография позволяет выделять и анализировать вертикальный и диагональный компоненты нистагменной реакции, что, безусловно, очень важно для топической диагностики [12].

Исследования с использованием видеонистамографа показывают, что записи нистагма могут быть использованы в диагностических целях, целях экспертизы и оценки состояния человека [13].

Анализ нистагма, на примере программного обеспечения компании «НПО Астек» для системы VF405 Video Frenzel, заключается в поиске ударов нистагма, записи движений глаз и их автоматическом распознавании [11]. В дополнение к распознаванию ударов нистагма, программа также вычисляет другие важные параметры, например, скорость медленной фазы и частоту ударов нистагма.

Программное обеспечение имеет два алгоритма автоматического анализа нистагма: непрерывный и дискретный.

При непрерывном анализе нистагма рассчитывается текущая скорость движения глаза для любого момента времени. Как только скорость движения глаза

превышает максимальное значение, распознается начало быстрой фазы. Конец быстрой фазы определяется в тот момент, когда скорость глаза падает ниже максимального значения. Пороговые значения, используемые для определения исходной и конечной точек быстрой фазы, подстраиваются автоматически, а результаты распознавания отображаются графически.

Скорость медленной фазы определяется при помощи временного сглаживания (низкочастотной фильтрации) скорости, рассчитываемой вне распознанных саккад и артефактов. Во время саккад или артефактов ее скорость приравняется к среднему между скоростью в начале и сразу после саккады. Низкочастотная фильтрация скоростей адаптирована к соответствующим требованиям тестов для того, чтобы избежать искажения результатов.

Преимуществом данной методики анализа нистагма является возможность определения скорости движения глаза для любого произвольного момента времени, то есть при таком подходе получается непрерывная оценка характера движений глаза; недостатком – в методиках с низкой активностью нистагма, например, в тесте спонтанного нистагма, скорость медленной фазы может быть определена для любого произвольного момента времени, однако для каждого удара нистагма не определяется отдельное значение.

Методика дискретного анализа нистагма применяется в случаях, когда истинная скорость нистагма не может быть правильно определена [14].

С помощью дискретного анализа нистагма выделяются пилообразные движения глазного яблока, которые распознаются по быстрой фазе и предшествующей ей медленной фазе противоположного направления. На рисунке 1 представлено изображение удара нистагма в виде графика.

Удары нистагма распознаются при выполнении следующих условий:

- рассчитанная скорость превышает заданную минимальную, установленную для быстрой фазы;
- амплитуда быстрой фазы превышает заданную минимальную, установленную для быстрой фазы;
- время, прошедшее с последней быстрой фазы, превышает заданную минимальную длительность, установленную для медленной фазы.

Если эти условия соблюдаются, проверяются следующие формальные критерии идентификации удара нистагма:

- ускорение и направление во время фазы возврата;
- амплитуда медленной фазы;
- скорость медленной фазы;
- длительность медленной фазы;

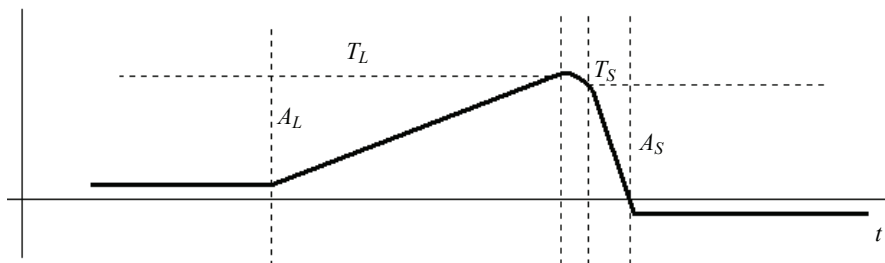


Рис. 1. Графическое представление нистагма:

A_L и T_L – соответственно амплитуда и длительность медленной фазы;

A_S и T_S – соответственно амплитуда и длительность быстрой фазы

– допустимые отклонения точек данных от рассчитанной линии регрессии (относительное значение).

Чем большее значение установлено, тем более линейным должно быть движение глаза для того, чтобы оно было распознано как медленная фаза.

Методику дискретного анализа нистагма выбирают в том случае, если нужно определить, как часто появляются его удары. Это особенно важно для сеансов выявления спонтанного нистагма, поскольку каждый удар распознается, и затем анализируются его частота, амплитуда и скорость. Даже при калорических тестах данный анализ может давать хорошие результаты, особенно если есть только низкая реакция на орошение.

Существующие методики непрерывного и дискретного анализа нистагма являются общепринятыми за рубежом. В России существует альтернативный подход для рассмотрения данной задачи [11]. Тоничностью удара нистагма называется отношение длительностей быстрой фазы к медленной, то есть для описания нистагма используется не скорость медленной фазы, а данное отношение. Такой подход можно считать более адекватным, так как он опирается на данные двух фаз каждого удара. Нормой считается тоничность в диапазоне $1/5 \dots 1/3$. Выход за эти пределы указывает на возможные отклонения от нормы.

При диагностике вестибулярного аппарата с использованием систем ВНГ используются различные варианты диагностических тестов.

Для регистрации неспровоцированных движений глаз проводится тест спонтанного нистагма. При диагностике регистрируются горизонтальная и вертикальная позиции глаз, скорость медленной фазы горизонтальных и вертикальных движений в градусах в секунду, изменение диаметра зрачка. Тест проводится в режиме светового изолирования [15].

При проведении теста с калорическим орошением проводят прямую температурную стимуляцию внутреннего уха. Для пациентов с выраженным нистагмом даже при отсутствии раздражителей рекомендуется перед проведением теста записать неспровоцированные удары нистагма. Полученные данные анализируются для расчета скорости медленной фазы и частоты ударов нистагма и отображаются в виде различных тестовых диаграмм отдельно для каждого орошения и выполняемого выборочно теста спонтанного нистагма, предшествующего основному тесту.

В тесте плавного слежения пациенту предъявляются визуальные стимулы. Глаза обследуемого должны следовать за изображением, которое движется непрерывно по проекционному экрану (монитору) [15].

При проведении теста саккад глаза пациента должны следить за визуальным материалом на проекторе или мониторе. При этом изображение двигается скачкообразно от одной позиции к другой, в отличие от теста плавного слежения. Пациент должен попытаться зафиксировать взгляд на проецируемом объекте, а затем быстро переместить взгляд к следующей позиции [15]. Анализируются основные параметры (латентность, скорость, точность фиксации) и отображаются на различных графиках для горизонтальных и вертикальных саккад.

В тесте фиксированного взгляда регистрируются и анализируются движения глаза в момент фиксации взгляда пациента на демонстрируемом изображении.

С помощью оптокинетического теста возможно анализировать движения глаз при стимуляции движущимся в горизонтальном или вертикальном направлении изображениями-стимулами с различной скоростью. При этом рассчитывается скорость движения глаз во время медленной фазы и сравнивается со скоростью движения проецируемого изображения. Голова пациента при этом должна оставаться неподвижной.

Ряд диагностических тестов проводится с использованием специального поворотного кресла.

Видеонистагмография обладает большими возможностями использования как в целях дифференциальной диагностики уровня поражения вестибулярной системы и различных отделов головного мозга, так и при обследовании больного в палате после хирургических вмешательств, а также для контроля выполнения позиционных маневров и вестибулярной реабилитации [12].

В связи с огромной информационной нагрузкой на врача, даже специалисту с большим опытом, трудно учитывать все характеристики исследуемых пациентов, что в итоге отражается на точности и эффективности проведенной диагностики и грамотном выборе тактики лечения. Для обеспечения поддержки принятия решений в лечебно-диагностическом процессе, наряду с использованием ВНГ систем, применяются информационные системы анализа и поддержки принятия решений (СППР) [16, 17].

В настоящее время актуально использование информационных СППР на основе алгоритмов, разработанных с применением методов интеллектуального анализа медицинских данных [16 – 18]. Искусственный интеллект помогает врачу проверить правильность постановки диагноза в сложных клинических случаях. Программные комплексы, использующие возможности искусственных нейронных сетей, играют важную роль в процессе диагностики и лечения [17, 19, 20].

Система анализа и поддержки принятия решений может включать в себя следующие компьютеризированные процедуры: сбор, обработку, анализ медицинской информации, математическое моделирование, распознавание объектов на изображении, патологий, помощь в выборе наиболее оптимального метода диагностики или лечения.

Использование ВНГ в сочетании с информационной СППР при диагностике и лечении гарантирует правильность постановки диагноза и грамотное лечение пациентов с проблемами головокружения.

Однако следует отметить недостатки систем ВНГ ввиду их чрезвычайной дороговизны. Медицинские учреждения зачастую просто не в состоянии оснастить ими диагностические кабинеты.

В связи с этим по-прежнему остро стоят проблемы технического решения диагностики вестибулярного аппарата и необходимости в современном и недорогом оборудовании. Перспективным в решении данного вопроса является разработка систем для визуализации нистагма на базе доступной видеоаппаратуры (веб-, фото- и видеокамер), которая может использоваться как отдельно, так и быть встроена в мобильный телефон, ноутбук или другие устройства [21]. При разработке подобных систем используют специализированные библиотеки, в которых реализованы методы компьютерного зрения. Однако алгоритмы, используемые для анализа движений глаз, требуют дальнейшего совершенствования.

Использование информационных систем визуализации и анализа нистагма может значительно оптимизировать и существенно ускорить процесс дифференциальной диагностики вестибулярных нарушений, автоматизировав его и добавив возможность прослеживать динамику развития заболевания с помощью современных программных средств. Актуальным остается вопрос создания недорогой и эффективной системы визуализации с возможностью детального анализа движений глаз для диагностики, экспертизы и оценки состояния человека с использованием доступных аппаратных и программных средств.

Список литературы

1. Оториноларингология : национальное руководство / Под ред. В. Т. Пальчуна. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 954 с.

2. Лихачев, С. А. Современные технологии диагностики вестибулярной дисфункции в неврологической практике / С. А. Лихачев, О. А. Аленикова // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 34 – 39.
3. Электроокулография [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.psychodic.ru/e/elektrookulografiya.html> (дата обращения: 30.05.2018).
4. Барабанщиков, В. А. Методы окулографии в исследовании познавательных процессов и деятельности / В. А. Барабанщиков, М. М. Милад. – М. : Институт психологии РАН, 1994. – 88 с.
5. Бабияк, В. И. Клиническая оториноларингология : руководство для врачей / В. И. Бабияк, Я. А. Накатис. – СПб. : Гиппократ, 2005. – 800 с.
6. Мачалов, А. С. Функциональное состояние среднего и внутреннего уха у больных нейросенсорной тугоухостью после кохлеарной имплантации : дис. ... канд. мед. наук : 14.01.03 / Мачалов Антон Сергеевич. – М., 2015. – 139 с.
7. Репин, Д. С. Телемедицина : состояние и направление развития/ Д. С. Репин // *Информатизация образования и науки*. – 2017. – № 2 (34). – С. 90 – 100.
8. Фролов, С. В. Тенденции развития телемедицинских технологий в Российской Федерации / С. В. Фролов, М. С. Фролова // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2005. – Т. 11, № 2А. – С. 328 – 340.
9. Фролов, С. В. Телемедицина – ключ к повышению качества здравоохранения / С. В. Фролов, М. С. Фролова // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2005. – № 1. – С. 61 – 63.
10. Видеодиагностика вестибулярного аппарата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.vdvs.ru/products/vng/vng.htm> (дата обращения: 30.05.2018).
11. Тест спонтанного нистагма [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.vdvs.ru/info/tests/nystagmus.htm> (дата обращения: 30.05.2018).
12. Дистанционная видеонистагмография : методика и области применения / А. Н. Пашинин [и др.] // *Российская оториноларингология*. – 2014. – № 4 (71). – С. 85 – 87.
13. Сучалкина, А. Ф. Математическое моделирование двухфазных, нистагменного типа, движений глаз : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.01 / Сучалкина Анна Федоровна. – М., 2014. – 164 с.
14. Штефанова, О. Ю. Математическое моделирование и оценка качества системы зрительной ориентации в горизонтальной плоскости : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.01 / Штефанова Ольга Юрьевна. – М., 2011. – 179 с.
15. Дорошенко, Н. Э. Современные методы исследования вестибулярной функции у больных с кохлеовестибулопатией / Н. Э. Дорошенко, Д. П. Денисов, И. Л. Лазаревич // *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. – 2013. – № 1. – С. 48 – 52.
16. Литвин, А. А. Системы поддержки принятия решений в диагностике и лечении острого панкреатита / А. А. Литвин, О. Ю. Реброва // *Проблемы здоровья и экологии*. – 2016. – № 2 (48). – С. 10 – 17.
17. Литвин, А. А. Инфицированный панкреонекроз : компьютерное прогнозирование, профилактика, диагностика и хирургическое лечение : дис. ... д-ра мед. наук : 03.01.09 ; 14.01.17 / Литвин Андрей Антонович. – М., 2015. – 346 с.
18. Кобринский, Б. А. Системы поддержки принятия решений в здравоохранении и обучении / Б. А. Кобринский // *Врач и информационные технологии*. – 2010. – № 2. – С. 39 – 45.
19. Симанков, В. С. Системный анализ и современные информационные технологии в медицинских системах поддержки принятия решений / В. С. Симанков, А. А. Халафян. – М. : Бином, 2009. – 362 с.

20. Дюк, В. А. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях / В. А. Дюк, В. Л. Эмануэль. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

21. Онлайн диагностика болезней Альцгеймера и Паркинсона по движению глаз [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.eyemove.ru/faq> (дата обращения: 30.05.2018).

Modern Differential Diagnostic Systems for Vestibular Disorders

A. V. Gorbunov¹, A. V. Neprokin¹, E. N. Tugolukov², V. S. Egorov³

*Departments of Biomedical Engineering (1),
Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing (2),
Tambov Center for New Information Technologies (3),
TSTU, Tambov, Russia; alexey.gorbunov@mail.ru*

Keywords: vestibular disorders; VNG; differential diagnosis; nystagmus imaging system; DSS.

Abstract: This study is devoted to the analysis of the methods used for the differential diagnosis of vestibular disorders. Visualization of nystagmus is one of the types of diagnostic examinations that are widely used in neurological and otorhinolaryngology practices. This paper examines the existing information systems for analyzing and supporting decision-making in the diagnosis and treatment of vestibular disorders. The features of the software implementation of systems for visualization and analysis of nystagmus are considered. As a result of the analysis, the advantages and disadvantages of existing methods and further prospects for the development of visualization complexes and decision support systems in the treatment and diagnostic process are described.

References

1. Pal'chun V.T. [Ed.] *Otorinolaringologiya: natsional'noye rukovodstvo* [Otorhinolaryngology: national leadership], Moscow: GEOTAR-Media, 2009, 954 p. (In Russ.)
2. Likhachev S.A., Alenikova O.A. [Modern technologies for diagnosing vestibular dysfunction in neurological practice], *Annaly klinicheskoy i eksperimental'noy nevrologii* [Annals of Clinical and Experimental Neurology], 2011, vol. 5, no. 2, pp. 34-39. (In Russ.)
3. <http://www.psyhodic.ru/e/elektrookulografiya.html> (accessed 30 May 2018).
4. Barabanshchikov V.A., Milad M.M. *Metody okulografii v issledovanii poznavatel'-nykh protsessov i deyatel'nosti* [Oculography methods in the study of cognitive processes and activities], Moscow: Institut psikhologii RAN, 1994, 88 p. (In Russ.)
5. Babiyak V.I., Nakatis Ya.A. *Klinicheskaya otorinolaringologiya: rukovodstvo dlya vrachev* [Clinical otolaryngology: a guide for physicians], St. Petersburg: Gippokrat, 2005, 800 p. (In Russ.)
6. Machalov A.C. *PhD Dissertation (Medical)*, Moscow, 2015, 139 p. (In Russ.)
7. Repin D.S. [Telemedicine: state and direction of development], *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [// Informatization of education and science], 2017, no. 2 (34), pp. 90-100. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Frolov S.V., Frolova M.S. [Trends in the development of telemedicine technologies in the Russian Federation], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2005, vol. 11, no. 2A, pp. 328-340. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Frolov S.V., Frolova M.S. [Telemedicine – the key to improving the quality of healthcare], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2005, no. 1, pp. 61-63. (In Russ., abstract in Eng.)
10. <http://www.vdvs.ru/products/vng/vng.htm> (accessed 30 May 2018).
11. <http://www.vdvs.ru/info/tests/nystagmus.htm> (accessed 30 May 2018).
12. Pashchinin A.N., Voronov V.A., Demidenko D.Yu., Levin S.V., Kuz'min D.M. [Remote videonystagmography: methods and applications], *Rossiyskaya otorinolaringologiya* [Russian otorhinolaryngology], 2014, no. 4 (71), pp. 85-87. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Suchalkina A.F. *PhD Dissertation (Physical and Mathematical)*, Moscow, 2014, 164 p. (In Russ.)
14. Shtefanova O.Yu. *PhD Dissertation (Physical and Mathematical)*, Moscow, 2011, 179 p. (In Russ.)
15. Doroshchenko N.E., Denisov D.P., Lazarevich I.L. [Modern methods of investigating vestibular function in patients with cochleostomy vesicle], *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik* [Kremlin medicine. Clinical Herald], 2013, no. 1, pp. 48-52. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Litvin A.A., Rebrova O.Yu. [Decision support systems in the diagnosis and treatment of acute pancreatitis], *Problemy zdorov'ya i ekologii* [Problems of health and ecology], 2016, no. 2 (48), pp. 10-17. (In Russ.)
17. Litvin A.A. *PhD Dissertation (Medical)*, Moscow, 2015, 346 p. (In Russ.)
18. Kobrinskiy B.A. [Decision Support Systems in Health Care and Training], *Vrach i informatsionnyye tekhnologii* [Doctor and Information Technologies], 2010, no. 2, pp. 39-45. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Simankov V.S., Khalafyan A.A. *Sistemnyy analiz i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii v meditsinskikh sistemakh podderzhki prinyatiya resheniy* [System analysis and modern information technologies in medical decision-making support systems], Moscow: Binom, 2009, 362 p. (In Russ.)
20. Dyuk V.A., Emanuel' V.L. *Informatsionnyye tekhnologii v mediko-biologicheskikh issledovaniyakh* [Information technologies in biomedical research], St. Petersburg: Piter, 2003, 528 p. (In Russ.)
21. <http://www.eyemove.ru/faq> (accessed 30 May 2018).

Moderne Systeme der Differentialdiagnose der vestibulären Störungen

Zusammenfassung: Die vorliegende Studie ist der Analyse der Methoden zur Differentialdiagnose von vestibulären Störungen gewidmet. Die Visualisierung von Nystagmus ist eine der Arten diagnostischer Untersuchungen, die in neurologischen und Hals-Nasen-Ohren-Praxen weit verbreitet sind. In dieser Arbeit sind die vorhandenen Informationssysteme zur Analyse und Unterstützung der Entscheidungsfindung bei der Diagnose und Behandlung von vestibulären Störungen untersucht. Die Besonderheiten der Software-Implementierung von Systemen zur Visualisierung und Analyse von

Nystagmus sind betrachtet. Als Ergebnis der durchgeführten Analyse sind die Vor- und Nachteile der bestehenden Methoden sowie weitere Perspektiven für die Entwicklung von Visualisierungskomplexen und Entscheidungsunterstützungssystemen im Behandlungs- und Diagnoseprozess aufgezeigt.

Systèmes modernes du diagnostic différentiel des troubles vestibulaires

Résumé: La présente étude porte sur l'analyse des méthodes utilisées pour le diagnostic différentiel des troubles vestibulaires. La visualisation de nystagmus est un type du diagnostic, assez largement utilisé dans les pratiques neurologiques et otorhinolarhingologiques. Sont examinés les systèmes d'information existants pour l'analyse le traitement des troubles vestibulaires. Sont envisagés les caractéristiques de la mise en œuvre des systèmes de visualisation et d'analyse nystagmus. Sont mis en relief les avantages et les inconvénients des méthodes existantes et les perspectives du développement des systèmes d'imagerie et d'appui à la prise de décisions dans le processus du diagnostic et du traitement.

Авторы: *Горбунов Алексей Викторович* – доктор медицинских наук, профессор кафедры «Биомедицинская техника»; *Непрокин Алексей Владимирович* – магистрант; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Егоров Владимир Сергеевич* – соискатель, Тамбовский центр новых информационных технологий, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Е. И. Алгазин

*Кафедра «Электроника и электротехника»,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, Россия; evgeniialgazin@gmail.com*

Ключевые слова: электрическая цепь, аperiodический режим, колебательный разряд конденсатора, собственное время электрической цепи.

Аннотация: Предложена временно-энергетическая модель цепи R–L–C с заряженным конденсатором до напряжения U_0 . На ее основе предложено описание режимов функционирования электрических цепей автоматики в области времени. Для каждого режима получены свойственные этому режиму наборы собственных чисел и собственных векторов метрического тензора, составленного из матрицы описания цепи R–L–C в области времени. Проведена интерпретация базиса собственных векторов и соответствующих им собственных чисел.

Введение

При составлении степенного алгоритмического уравнения корни в области времени не удовлетворяют решению характеристического уравнения, полученного на основе дифференциального уравнения, описывающего исследуемую цепь. Также корни характеристического уравнения при переходе к постоянной времени не являются решениями степенного алгебраического уравнения в области времени [1].

В статье проанализированы режимы работы цепей R–L–C. Если прежние подходы и методы позволяли получить описание режимов работы электрических цепей на основе анализа корней степенного алгебраического уравнения, то в данной работе представлена временно-энергетическая модель цепи R–L–C без источника питания и описаны элементы данной модели. Такой подход позволяет оценить состояние электрической цепи в области времени.

Постановка задачи

Рассмотрим электрическую цепь из последовательного соединения R–L–C элементов без источника питания. Конденсатор до момента коммутации заряжен до напряжения U_0 [2]. После коммутации необходимо рассмотреть два режима в области времени: аperiodический и колебательный. Для этого необходимо предложить способ оценки состояния электрической цепи в области времени, основанный на временно-энергетической модели цепи R–L–C без источника питания. На основе предложенной временно-энергетической модели перейти к тензорному описанию реакции цепи R–L–C на наличие энергии в цепи в области времени. На основе тензорного описания получить набор собственных чисел и соответствующих им собственных векторов с последующей интерпретацией полученных результатов.

Пути решения

Предложена геометрическая интерпретация временно-энергетической модели, по сути отображающая реакцию цепи R–L–C без источника питания с предварительно заряженным конденсатором (рис. 1).

Рассмотрен режим колебательного разряда конденсатора как наиболее сложный. Будем полагать, что положительное направление оси времени соответствует передаче энергии в конденсатор. Все значения времени нормированы на T_0 – собственное время цепи, то есть время, пока в системе R–L–C есть энергия.

Для аналитического описания временно-энергетической модели используется представление временных векторов в виде

$$t(E) = \sum_{i=1}^N t_{i\bar{\Psi}} \bar{\Psi}_i(E), i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где $t(E)$ – значение координаты времени в зависимости от энергии E ; $t_{i\bar{\Psi}}$ – матрица-строка коэффициентов разложения; $\bar{\Psi}_i(E)$ – используемое преобразование.

Представим выходной вектор времени в виде

$$t_{\text{вых}}(E) = \sum_{i=1}^N t_{i\bar{\Psi}} T [\bar{\Psi}_i(E)] = \sum_{i=1}^N t_{i\bar{\Psi}} \varphi_i(E), \quad (2)$$

где T – линейный оператор, описывающий преобразование $\bar{\Psi}_i(E)$ в $\varphi_i(E)$.

В нашем случае, когда базисные функции $\bar{\Psi}_i(E)$ отличаются только сдвигом, матрица, соответствующая линейному оператору T , будет иметь ленточную теплицеву структуру

$$T = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \dots & t_N & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & t_1 & t_2 & \dots & t_N & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & t_1 & t_2 & \dots & t_N \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица T , по сути, является матрицей, описывающей поведение электрической цепи. Вектор времени $t_1, t_2, \dots, t_N$ является реакцией на воздействие энергии,

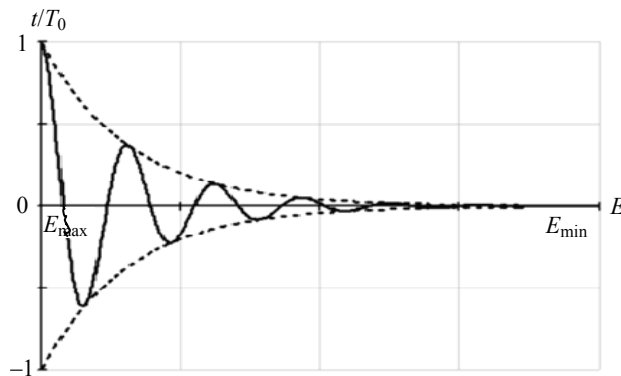


Рис. 1. Геометрическая интерпретация временно-энергетической модели R–L–C цепи без источника питания

запасенной в виде заряда в конденсаторе емкостью C . Эта реакция рассматривается в области времени.

Метрический тензор будет равен

$$Z = TT^T. \quad (4)$$

Полученные для Z наборы собственных чисел и собственных векторов имеют следующий физический смысл: собственные числа матрицы метрического тензора задают на гиперплоскости представления временно-энергетической модели, линейные масштабы вдоль направлений ее собственных векторов.

Собственный вектор с наибольшим собственным числом вносит наибольший вклад в описание временно-энергетической модели матрицей T и соответствующего этой модели вектора времени.

Результаты

По нашему условию период колебаний энергии и период колебаний параметра процесса совпадают между собой. Рассмотрим вначале колебательный режим.

Пусть сопротивление цепи $R = 2$ Ом, емкость $C = 1$ Ф, индуктивность $L = 6$ Гн, напряжение предварительно заряженного конденсатора $U_0 = 100$ В.

Для указанных параметров цепи R – L – C значения корней характеристического уравнения равны:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \quad (5)$$

$$p_1 = -0,166 + 0,37j; p_2 = -0,166 - 0,37j,$$

где j – мнимая единица.

Поскольку два корня являются комплексно-сопряженными, в цепи будет колебательный режим

$$\alpha_1 = \frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_1^2}, \quad (6)$$

где α_1 – декремент затухания; ω_0 – резонансная частота, являющаяся собственной частотой незатухающих колебаний; $\omega_{св}$ – угловая частота собственных затухающих или свободных колебаний контура.

Тогда период собственных или свободных колебаний контура определяется по формуле

$$T_{св} = \frac{2\pi}{\omega_{св}}. \quad (7)$$

Период колебаний энергии равен

$$E_{св} = E(0) - E(T_{св}), \quad (8)$$

где $E(T_{св}) = E_C(T_{св}) + E_L(T_{св}) + E_R(T_{св})$, $E_C(T_{св})$ – энергия конденсатора в момент $T_{св}$; $E_L(T_{св})$ – энергия индуктивности в момент $T_{св}$; $E_R(T_{св})$ – энергия потерь за время $0 \dots T_{св}$.

Для колебательного режима элемент матрицы T описывается следующим образом

$$tk_i^{(1)}(E) = T_0 e^{-\frac{\alpha(E_{\max} - i\Delta E)}{E_1}} \cos\left(2\pi \frac{\alpha(E_{\max} - i\Delta E)}{E_1}\right), \quad (9)$$

где T_0 – собственные колебания цепи R–L–C; α – коэффициент затухания; $E_{\max}$ – максимальное значение энергии в цепи; ΔE – шаг убывания энергии от максимального значения к минимальному; E_1 – период колебания энергии в цепи.

Для аperiodического режима элемент матрицы T описывается следующим образом

$$ta_i^{(1)}(E) = T_0 e^{-\frac{\alpha(E_{\max} - i\Delta E)}{E_1}}. \quad (10)$$

В обоих случаях нормируем на T_0 .

Для аperiodического режима $R = 2 \text{ Ом}$, $C = 1 \text{ Ф}$, $L = 0,25 \text{ Гн}$, $U_0 = 100 \text{ В}$.

Для второго случая элемент матрицы T (колебательный режим) представлен уравнением

$$tk_i^{(2)}(E) = T_0 e^{\left(1 - \frac{E_{\max}}{E_{\max} - i\Delta E + 1} - \frac{E_{\min}}{E_{\max} - i\Delta E + 1}\right)} \cos\left(2\pi \frac{\alpha(E_{\max} - i\Delta E)}{E_1}\right); \quad (11)$$

аperiodический режим

$$ta_i^{(2)}(E) = T_0 e^{\left(1 - \frac{E_{\max}}{E_{\max} - i\Delta E + 1} - \frac{E_{\min}}{E_{\max} - i\Delta E + 1}\right)}. \quad (12)$$

На рисунке 2 приведены геометрические интерпретации временно-энергетических моделей R–L–C цепи без источника питания при колебательном и аperiodическом режимах для первого и второго случаев, где $tk_i^{(1)}$, $ta_i^{(1)}$ и $tk_i^{(2)}$, $ta_i^{(2)}$ – колебательные и аperiodические режимы соответственно для первого и второго случаев, представленные аналитическими выражениями (9) – (12).

Результаты моделирования в виде значения первого (максимального) собственного числа и соответствующего ему первого собственного вектора сведены в табл. 1.

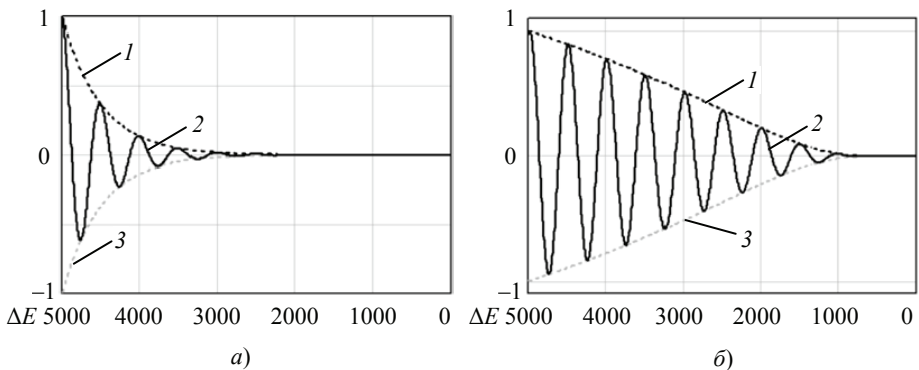


Рис. 2. Геометрические интерпретации временно-энергетической модели R–L–C цепи без источника питания для первого (а) и второго (б) случаев колебательного и аperiodического режимов:

а: $1 - ta_i^{(1)}$; $2 - (-ta_i^{(1)})$; $3 - tk_i^{(1)}$; б: $1 - ta_i^{(2)}$; $2 - (-ta_i^{(2)})$; $3 - tk_i^{(2)}$

Таблица 1

Результаты моделирования в виде значения первого (максимального) собственного числа и соответствующего ему первого собственного вектора

Собст- венное число	Собственный вектор									
	Колебательный режим (9)									
1,512	−0,274	−0,215	−0,208	0,511	0,274	−0,274	−0,511	0,208	0,215	0,274
Апериодический режим (10)										
2,349	0,16	0,251	0,325	0,377	0,404	0,404	0,377	0,325	0,251	0,16
Колебательный режим (11)										
6,731	−0,329	−0,235	0,192	0,483	0,258	−0,258	−0,483	−0,192	0,235	0,329
Апериодический режим (12)										
16,71	0,212	0,272	0,323	0,362	0,382	0,382	0,362	0,323	0,272	0,212

На основании результатов моделирования видно, что амплитуда и знак отсчета времени собственного вектора указывают на величину и направление перемещения энергии между емкостью и индуктивностью для каждого текущего значения энергии за определенное время до ее полного исчерпания.

Выводы

Нормированный вектор времени $t_1, t_2, \dots, t_N$ адекватно описывает реакцию R–L–C цепи в области времени при наличии в ней энергии, запасенной в реактивных элементах.

Достоинства временно-энергетической модели состоят в наглядности ее геометрической интерпретации и простоте аналитического описания. Кроме того, временно-энергетическая модель позволяет использовать инструмент собственных векторов, что дает дополнительную информацию об изучаемой цепи R–L–C, то есть расширяет и дополняет анализ состояния цепи R–L–C.

Предложенные в обоих случае модели позволяют с достаточной точностью оценить процессы, происходящие в R–L–C цепи без источника питания.

Список литературы

1. Алгазин, Е. И. Энергетический критерий устойчивости линейных систем автоматики / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 210 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215

2. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учебное пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Брославский. – М. : Высшая школа, 1977. – 312 с.

Analysis of the State of Linear Automation Systems

E. I. Algazin

Department of Electronics and Electrical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia; evgeniialgazin@gmail.com

Keywords: electric circuit; aperiodic mode; oscillatory discharge of a capacitor; proper time of an electrical circuit.

Abstract: A time-energy model of the R–L–C circuit with a charged capacitor up to a voltage of U_0 is proposed. On its basis, a description of the modes of operation of electrical circuits of automation in the time domain is proposed. For each mode, sets of eigenvalues and eigenvectors of the metric tensor made up of the R–L–C circuit description matrix in the time domain, characteristic of this mode, are obtained. The interpretation of the basis of eigenvectors and the corresponding eigenvalues is carried out.

References

1. Algazin Ye.I. [Energy criterion for the stability of linear automation systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 210-215, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.210-215 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Veselovskiy O.N., Broslavskiy L.M. *Osnovy elektrotekhniki i elektrotekhnicheskkiye ustroystva radioelektronnnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Basics of Electrical Engineering and Electrotechnical Devices of Electronic Equipment: a textbook for universities], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)

Analyse des Zustands linearer Automatisierungssysteme

Zusammenfassung: Es ist ein zeitlich energetisches Modell der RLC-Kette mit einem geladenen Kondensator bis zur Spannung U_0 vorgeschlagen. Auf dessen Grundlage sind die Funktionsweisen der elektrischen Automatisierungsschaltungen im Zeitbereich beschrieben. Für jeden Modus sind bestimmte Sätze von Eigenwerten und Eigenvektoren des metrischen Tensors erhalten, der aus der Matrix der Beschreibung der RLC-Kette im Zeitbereich zusammengestellt ist. Die Interpretation der Basis von Eigenvektoren und der entsprechenden Eigenwerte ist durchgeführt.

Analyse de l'état des systèmes linéaires d'automatisation

Résumé: Est proposé le modèle temporaire énergétique du circuit R–L–C avec le condensateur chargé jusqu'à la tension U_0 . A sa base, est proposée une description des modes du fonctionnement des circuits électriques de l'automatisation dans la zone temporelle. Pour chaque régime, sont obtenus des ensembles de nombres et de vecteurs de tenseur métrique propres à ce mode de la matrice de la description du circuit R–L–C dans la zone de temps. Est effectuée l'interprétation de la base de ses propres vecteurs et des propres nombres correspondants.

Автор: Алгазин Евгений Игоревич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

Рецензент: Разинкин Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы радиотехники», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, Россия.

**THE EFFECT OF WATER CONTENT, pH, SALINITY
AND TEMPERATURE ON THE STABILITY AND SURFACE
TENSION OF RUSSIAN URALS CRUDE OIL EMULSION**

M. Arroussi¹, J. Mensah², A. Arroussi^{3,4}

*Centre for Colloid Chemistry Department of Chemical and Environmental
Process Engineering, Budapest University of Technology and Economics (1),
Budapest, Hungary; arroussimed01@gmail.com;*

*Department of Inorganic Chemistry and Environment,
University of Abou Bakr Belkaid (3), Chetouane, Tlemcen, Algeria;
Laboratory of Materials Science, University of Ahmed Draya (4), Adrar, Algeria*

Keywords: crude oil; emulsion; stability; film; test-bottle; water droplet.

Abstract: The effect of pH, salinity and temperature on stability and surface tension of Russian Urals crude oil-water emulsions were investigated. Emulsions were prepared by mixing distilled water and Russian crude oil (1/3) volume ratio with three different buffered solutions of pH 2.00, 4.00 and 7.00. The stability of the emulsions and their surface tension were measured. Five aqueous solutions of NaCl (concentrations 0.570, 1.407, 1.711, 3.080 and 4.106 mol/l, respectively) were mixed with the crude oil and volume fraction 1/4 (water/oil) to make emulsions, another five aqueous solutions for the crude oil (1.50g, 2.50g, 3.50g, 4.50g and 5.50g of NaCl) were prepared. Surface tension of the emulsions and that of the crude oil and stability of emulsions were measured. In order to avoid distillation of the light components from our close measuring vessel, temperatures 20.01, 25.05, 29.01, 31.50 and 35.05 °C were applied. Surface tension of crude oil and that of an emulsion of 3/1 (oil/water) volume fraction were measured. Surface tensions of crude oil, and emulsion decrease as the temperature increases, but the surface tension of crude oil and emulsion increased as the salinity (concentration NaCl) as well as the pH value in the range (from 2.00 to 7.00) increases. On the other hand, the results of emulsions stability show that the stability of emulsions decreases both with increasing temperature and (NaCl) salt concentration, also, as the water fraction increases, the emulsion stability decreases. For pH, it was found that there is unstable emulsion formed at pH=7.00 and a very stable emulsion formed at pH = 2.00.

1. Introduction

Nowadays, separation of water-in-crude oil emulsions is a great challenge and considered as one of the important studies which, have long been of interest not only for engineers but for scientists as well [1, 2]. Many problems associated with lifting and crude oil production are due to the presence of water-in-crude oil (W/O) emulsion, which usually causes severe problems like the corrosion of equipment systems (reactors, columns, mixer, balloon, ...), decreasing the activity of the catalyst and other

environmental problems [3 – 6]. During the last sixteen years, many investigations have been under-taken to improve the resolution of these emulsions through, the combination of thermal and chemical treatments in order to provide high efficiency during the processing [5].

The formation of water-oil emulsion occurs during the refining stage of oil production [5]. Thus, it becomes necessary to separate water from crude oils due to economic and operation condition reasons [5, 6]. Water/crude oil emulsions have to be broken down in order to reduce the highest amount of water content in crude oils (demulsified) [6].

Therefore, it is necessary to determine and know the characteristics of the crude oil emulsion for a better understanding of the mechanisms responsible for the stabilization of these emulsions and to achieve high performance for the phase separation process of these emulsions [5 – 7]. Much attention is devoted to the stabilization mechanism and the factors that affect this process [6, 8].

It is believed that, the presence of surface active species which exist naturally in crude oils might be one of the main reasons for the stability of water-in-crude oil emulsions. Among these surface active species can be cited resins, asphaltenes and fatty acids [5, 8]. These substances can form an interfacial film, surrounding water droplets. The accumulation of these substances at the water-oil interface could inhibit the coalescing of the droplets and hinder the separation of the two phases [4, 5, 9]. It is common sense that asphaltenes are one of the major surfactants which stabilize the emulsion and most of the time the resins and fatty acids, could not produce high stable emulsions alone [8, 10]. Therefore, in many cases and in the presence of the asphaltene, they may connect to the asphaltene molecules which would affect emulsion stability [10]. Basically, the formation of the film depends on the concentration of resin, aromatic rings and the polar groups present in crude oil [11] as well as the inorganic solids which improve emulsion stability, due to their abilities to constitute films around the droplets and prevent them from touching each other [12, 13]. It is known that, the asphaltenes are the most polar fraction of the crude oils due to their structure which allows them to act as natural emulsifiers [8, 14, 15] through, the aggregation of many other molecules [16].

Usually, the interfacial film created between the two phases is not monomolecular but it is formed as a result of asphaltene droplets accumulation [8]. For that reason, removing the asphaltenes on flocculation level of the crude oil might improve the stability of water-in-oil emulsion [17]. The interfacial films have a resistance against deformation and compression which hinder droplets to touch each other and prevent coalescence [5, 18].

Based on knowledge of the interfacial film, there are many factors that can affect the emulsion stability; including, water-pH, temperature, droplet size and other chemical additives [8, 19 – 21]. Several authors point out the fact that, as the crude oil origin change, a multitude of the factors affecting the stability of crude oil/water emulsions effects show different behaviors [16, 22 – 24]. For example, the study which was conducted at Venezuelan crude oil/water interface shows that the pH has great influence on the asphaltenes interfacial properties and that at high or low pH [25]. The last study which was about the effects of water content, pH, temperature and salinity on the stability of crude oil emulsions under microwave method discovered that the emulsions which contain high water contents, achieved a high-performance rate of demulsification process but, this does not occur at high salt and pH contents simultaneously [8, 21].

During oil production, demulsification is considered as an important process in which the crude oil emulsion is broken down into oil and water phases. Generally, the demulsification process occurs in three steps that would affect the rate of breakdown processes in emulsions. These are flocculation, coalescence, and phase separation respectively [8, 26, 27]. The flocculation of water droplets of the internal phase

flocculate in order to form large groups of clusters, but these droplets still do not achieve coalescence. Next step is coalescence in which two or more clusters fuse together to form very large droplets where the interface is ruptured. During phase separation, large drops sink due to the gravity which leads to the breakdown of the emulsion [8, 27, 28].

Several methods are used to determine the emulsion stability. The standard method of water content measurement is Karl Fischer titration [5]. Other methods like bottle test [8, 33] distillation, microwave radiation, chemicals additives, centrifugation [29, 30, 37] and even optical microscopy [8, 28, 31, 34] are used. Not mentioning that the accuracy of distillation and optical microscopy is dubious; all these methods give a value separated from the rest of the variables while surface tension varies continuously with them. For that reason, a bottle and surface tension methods have been used for this work. The bottle test is the simplest and most common method used for lab-scale where varying amounts of chemical compounds are added to several tubes that have the same amounts of emulsion system [32]. A lot of studies have been taken recently regarding the use of bottle tests, in particular, where electrorheology and bottle tests show a similar result with optical microscopy when the effect of salinity on water-in-crude-oil emulsion was studied. They all detect that emulsion is much more stable at the lower ionic force of the aqueous phase [33, 34].

The aim of this work conducted is to investigate the effect of water content, pH, salinity and temperature on water-in-oil emulsion stability and its surface tension.

2. Experimental

2.1. Materials.

The Russian Urals crude oil was used in this study. Urals oil is a mix of high-sulfur crude oil from Urals-Volga region and light sweet crudes from West Siberia. The general characterizations of Russian Urals oil are summarized in Table 1 as determined by the laboratory of the refinery company. All the chemical substances used in this study were produced by Sigma Company with purity percentage (> 98 %). OriginPro software was used to analyze and convert the data into graphs in addition to the Microsoft Excel for the calculation of the averages and standard deviation.

2.2. Preparation of the emulsion.

Russian Urals crude oil and demineralized distilled water were mixed together to make emulsions with a known volume fraction. Emulsions were made by mechanical agitation: an electric mixer (Ultra Turrax T 25 basic, IKAWerke) with 2000 rpm at room temperature. During the mixing, a cylindrical metal vessel (diameter 55 mm, height 135 mm) was used in order to hold the samples. Water or an aqueous solution of given salinity or buffered pH and crude oil were mixed thoroughly for 15 minutes. Emulsions were separated with the aid of a separating funnel.

Table 1

General characteristics of Russian Urals crude oil

Characteristics	Value
Density (20°C gm/cm ³)	0.870
Salt content (NaCl) mg/l	17.3
Total acid number (mg KOH/1g)	0.39
Water content, %	0.1
Paraffin content, %	6

2.2.1. Effect of water content.

Water content in w/o emulsion has great influence on the emulsion stability. Asphaltene and resin are of the factors that affect the stability of crude oil emulsions, but the water content makes the emulsion system much more complicated. It is important to understand that, the external pressure of the oil phase exceeds the internal pressure of water droplets when an extremely small amount of water content is remaining in the system [35 – 37]. This would enhance the emulsion stability [36]. In order to investigate the effect of water content, five samples 55/45, 65/35, 75/25, 85/15 and 90/10 oil/water volume fractions were mixed and stability was investigated. Three parallel measurements of stability test were performed for each sample.

2.2.2. Effect of pH.

Emulsions (3/1 v/v) (oil-water) were made with three different buffered solutions of pH 2.00, 4.00 and 7.00 (± 0.01 at 25 $^{\circ}\text{C}$). pH meter – Model IN-112 device was used to check and control the pH values. Stability of the emulsions and their surface tensions were measured. For the surface tension, six parallel measurements were required in order to increase the resolution of the results and decrease the standard deviation of the measurements. On the other hand, three parallel measurements of stability test were carried out for each pH sample.

2.2.3. Effect of salt concentration.

Balance type sartorius balance Cubis was used to measure the exact masses of sodium chloride (0.50g, 1.00g, 1.50g, 2.70g and 3.60g) and then five aqueous solutions of NaCl (concentrations 0.570, 1.407, 1.711, 3.080 and 4.106 mol/l, respectively) were mixed with Russian Urals crude oil with volume fraction 15 ml /45 ml (water/oil) to make emulsions. Another five aqueous solutions of the crude oil (1.50g, 2.50g, 3.50g, 4.50g and 5.50g) were prepared. Surface tension of the emulsions, that of the crude oil and stability of emulsions were measured.

2.2.4. Effect of temperature.

One of the difficulties of this measurement is the control of the temperature. For that reason, thermostat machine type; Huber GmbH. MPC 1O4 was used to heat up the samples and control temperatures simultaneously. In order to avoid distillation of the light components from our close measuring vessel, temperatures 20.01, 25.05, 29.01, 31.50 and 35.05 $^{\circ}\text{C}$ were respectively applied. Surface tension of crude oil and that of an emulsion of 45/15 (oil/water) volume fraction were measured.

2.3. Determination of interfacial tension.

Du Noüy ring and Wilhelmy plate are the most commonly used methods for the determination of interfacial tension. Contrary to the study [6] which used Du Noüy ring test, the surface tension of solution was measured according to ASTM standard method with Wilhelmy balance made by Bioforce. A thoroughly cleaned platinum plate of known weight (19.80 $\times$ 9.81 $\times$ 0.19 mm) is touched to the surface of the liquid, and due to surface tension, its apparent weight changes. The balance which is an electromagnetic one; needs a warming up period of one hour and calibration with two wires of known weight, and, in addition, a calibrating measurement with clean water is needed. Six parallel measurements were performed for each sample and then the average was calculated.

2.4. Determination of stability.

Emulsion stability was characterized by separation time in a tube where the volume of the oil phase (normalized to the oil volume applied in emulsion making) could be measured as time proceeded which occurs due to the gravity (bottle test) [8, 37]. In a regular, W/O emulsion, unstable emulsion or low stable emulsion occurs at a large amount of water separated from the system [8] that, typically might take place at high water content [37]. Three parallel measurements were carried out in the same manner for each sample and then the average was taken.

3. Results and discussion

3.1. Effect of water content.

It is clear from the measurement results which can be seen in fig 1 that, as the water fraction increases, the emulsion stability decreases. The emulsion sample that contains a lower amount of water content has achieved the highest stability rate, where it is noted at the sample (90/10; oil/water) volume fractions. On the other hand, according to the sample (45/55; oil/water) volume fractions, the lowest emulsion stability or the unstable emulsion occurred at a high amount of the water content in the system. These results contribute to the studies [31, 35, 36] that found in cases of low water content, the internal pressure of water droplets was lesser than the external pressure of the oil phase which would improve the stability of the emulsion due to the mechanical properties of the film (Stiffness of the interfacial film). On the other hand, as the water fraction increases, the internal pressure becomes higher and higher than the external pressure of the water, which leads indirectly to the extension of water droplets [37]. Basically, damage of the interface films occurs at a certain point of the energy level repulsion which depends on the internal and external pressure of both phases (water and oil) simultaneously. Increase the water fraction of the emulsion system leads in increasing of water droplets coalescence rate [37].

Figure 1 shows another strong relationship that, the emulsion stability rate does not increase by double when the water content fraction gets double charged in the emulsion system. During 80 minutes, the rate separation of the oil phase for the water-oil emulsion sample (10ml/90ml; v/v) reached 49 %, while it achieved only 56 % at the water-oil emulsion sample (25ml/75ml; v/v). This behavior of the emulsion probably occurs due to the limit stability of Urals Russian crude oils.

3.2. Effect of pH.

The results presented in Figs 2 and 3, obviously indicate that the pH has great influence on the emulsion stability which increases with decreasing pH of aqueous phase between the range (pH = 2 – 7). During 50 minutes, the separated volume fraction for emulsion sample pH = 7 reached 90 %. Whilst during same time, the emulsion sample with pH = 4 had achieved 64 % as a rate separation of the oil phase. On the other hand, the most stable emulsion occurred at the sample with pH = 2 which showed a high stability even after more than eight weeks (see Fig. 2). Hence, Figs 2 and 3 show that, there is unstable emulsion formed at pH = 7.00 and a very stable emulsion formed at pH = 2.00. These results seem identical to those obtained by [8], who found that the lower stable Algerian crude oil emulsion formed at the weakly acid medium, while this result specifies the pH values where the very stable emulsion formed at the highly acid medium.

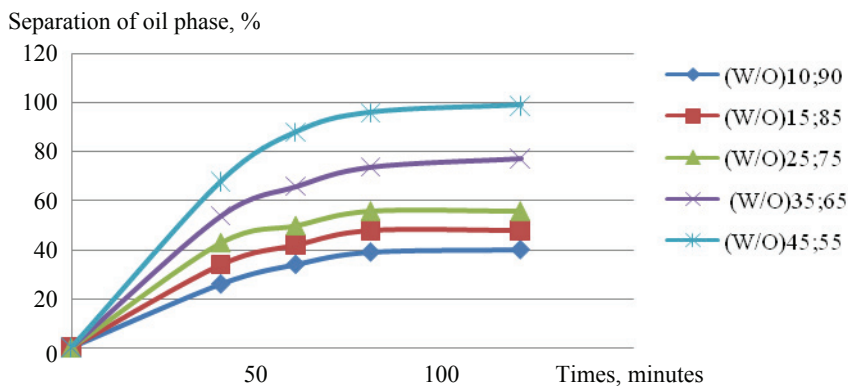


Fig. 1. Effects of the water fraction on kinetic (W/O) emulsion stability

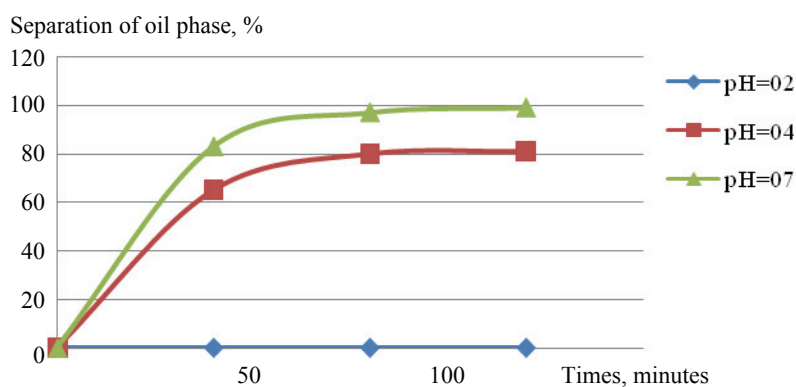


Fig. 2. Effect of different pH on the kinetic (W/O) emulsion stability



Fig. 3. Emulsion samples with different pH (pH = 7, 04 and 02) after 20 minutes, 90 minutes and more than eight weeks respectively (from left to the right)

Behavior of the interfacial film occurs due to repulsive forces [8, 16]. This result has been confirmed indirectly by the ones shown in Fig. 4 where the surface tension of emulsion increased as the pH value in the range (2.00 – 7.00) increased.

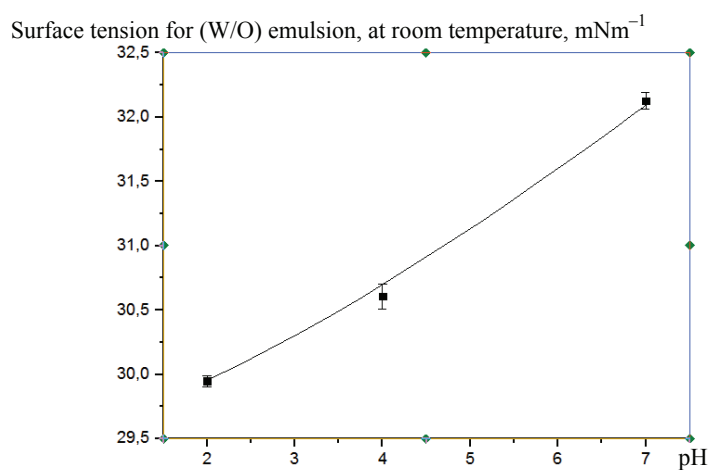


Fig. 4. Effect of water pH on the surface tension of (W/O) emulsion, at room temperature

3.3. Effect of salt concentration.

It can be pointed out from Fig. 5 that the stability of emulsions decreases with increasing (NaCl) salt concentration. During 80 minutes, the sample with 0.570 mol/l concentration of NaCl formed relatively a high stable emulsion with 54 % as separation rate of the oil phase, whilst the lowest stable emulsion occurs at the sample that contains the highest amount of salt concentration 4.106 mol/l when separated volume fraction achieved 98 %. Basically, emulsions can be stabilized through the repulsive charges on the surfaces of the discontinuous phase [22] and based on the theory of ions diffusion, increasing the salt concentration of the water-in-oil emulsion leads to increases of internal ionic force [38, 39] and might reduce the thickness of the interfacial layer of the emulsion system [39].

In order to confirm the previous results, it was necessary to evaluate the surface tension of emulsion and from experimental results, it was found that surface tension of emulsion increased as the salinity (concentration NaCl) increased, as shown in Fig 6. The emulsion samples with the lowest salt concentrations 0 and 0.570 mol/l respectively indicated the lowest surface tensions 28.49 mNm^{-1} and 28.97 mNm^{-1} . Furthermore, the highest surface tension 37.53 mNm^{-1} were measured at the emulsion sample which contains the highest salt concentration of NaCl 4.106 mol/l.

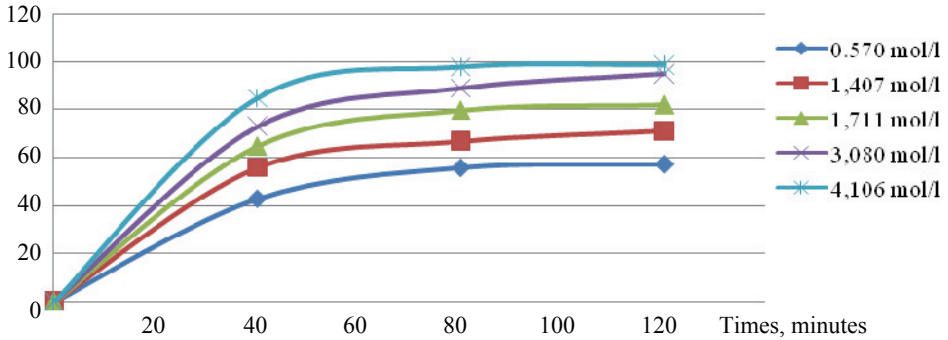


Fig. 5. Effect different salt concentrations on (W/O) emulsion stability

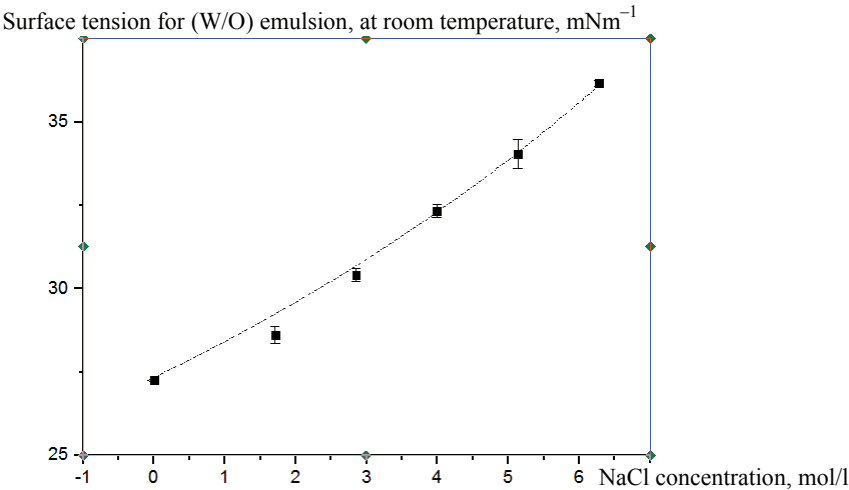


Fig. 6. Effect of salt concentrations on the surface tension of (W/O) emulsion, at room temperature

It is interesting to mention that, our finding is similar to [5]. Generally, increasing salt concentration leads to enhanced mechanical properties of the interfacial film that may hinder droplets to coalesce due to its relative resistance against deformation [5]. Also, high salt concentration may attribute to increasing intermolecular attractions which might lead to a decrease in the probability of molecules colliding with each other.

3.4. Effect of temperature.

Experimental results in Figs 7 and 8 show that surface tension of the emulsion and crude oil decrease as the temperature increases. In this regard, lowest emulsion surface tension 23.73 mNm^{-1} were measured at the temperature 35.5°C which considered the highest temperature for the evaluation in order to avoid distillation of the light components from emulsion system, whilst the highest interfacial tension 29.62 mNm^{-1} was found at the lowest temperature of 21.01°C . This behavior occurs because of increasing temperature which results in increased kinetic energy of the molecules and decreases cohesive forces.

According to Figs 7 and 8 and based on the complicated correlation between emulsion stability, surface tension and temperature as well as previous results published in the literature [37, 39], it can be concluded out that the stability of the emulsion decreases as temperature increases due to the low stability of interfacial tension at high temperature.

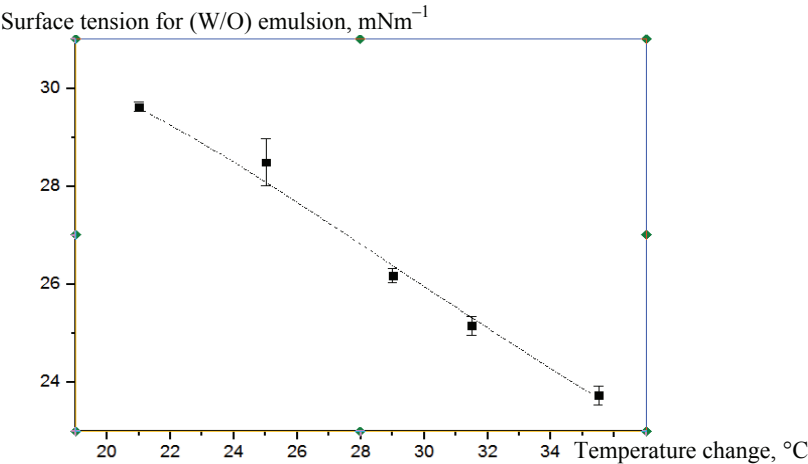


Fig. 7. Effect of temperature on the surface tension of (W/O) emulsion

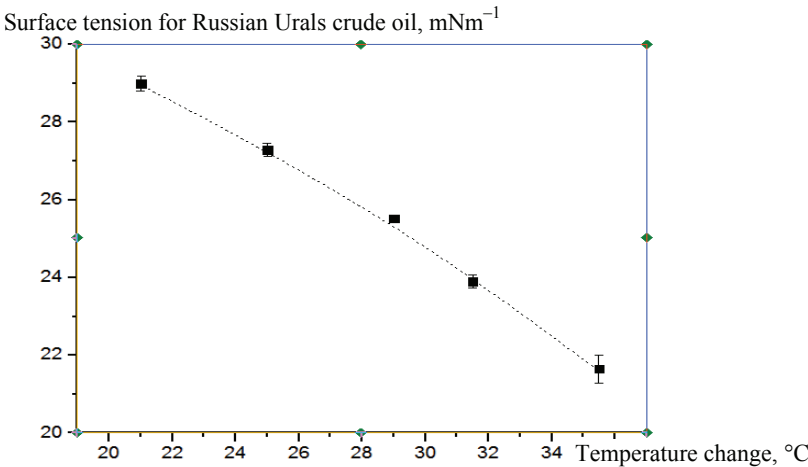


Fig. 8. Effect of temperature on the surface tension of Russian Urals crude oil

Conclusion

The results were found according to the graphs. Surface tension of crude oil, and emulsion decrease as the temperature increases, but the surface tension of crude oil and emulsion increased as the salinity (concentration NaCl) as well as the pH value in the range (from 2.00 to 7.00) increase. It is interesting that surface tension of the emulsion in two cases (temperature and salt concentration) was relatively higher than the surface tension of the Russian Urals crude oil itself.

The results of emulsions stability show that the stability of emulsions decreases both with increasing temperature and (NaCl) salt concentration, also, as the water fraction increases the emulsion stability decreases.

For the pH, it was found that there is unstable emulsion formed at pH = 7.00 and a very stable emulsion formed at pH = 2.00. These observations can strongly enhance the efficiency of emulsification process for the production of Russian Urals crude oils.

References

1. Yang X., Verruto V.J., Kilpatrick P.K. Dynamic Asphaltene–Resin Exchange at the Oil/Water Interface: Time-Dependent W/O Emulsion Stability for Asphaltene/Resin Model Oils, *Energy Fuels*, 2007, no. 21, pp. 1343-1349.
2. Dicharry C., Arla D., Sinquin A., Gracia A., Bouriat P. Stability of water/crude oil emulsions based on interfacial dilatational rheology, *J. Colloid Interface Sci.*, 2006, no. 297, pp. 785-791.
3. Ortiz D.P., Baydak E.N., Yarranton H.W. Effect of surfactants on interfacial films and stability of water-in-oil emulsions stabilized by asphaltenes, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, no. 351, pp. 542-555.
4. Peña A.A., Hirasaki G.J., Miller C.I.A. Chemically Induced Destabilization of Water-in-Crude Oil Emulsions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, vol. 44, no. 5, pp. 1139-1149.
5. Alves D.R., Carneiro J.S.A., Oliveira I.F., Façanha F.Jr., Santos A.F., Dariva Cl., Franceschi E., Fortuny M. Influence of the salinity on the interfacial properties of a Brazilian crude oil–brine systems, *J. Fuel*, 2014, no. 118, pp. 21-26.
6. Nour A.H., Yunus R.M., Anwaruddin H. Water-in-Crude Oil Emulsions: Its Stabilization and Demulsification, *Journal of Applied Sciences*, 2007, no. 7, pp. 3512-3517.
7. Aske N., Orr R., Sjöblom J., Kallevik H., Oye G. Interfacial properties of watercrude oil systems using the oscillating pendant drop. Correlations to asphaltene solubility by near infrared spectroscopy, *J. Dispersion Sci. Technol.*, 2004, vol. 25, no. 3, pp. 263-275.
8. Daaou M., Bendedouch D. Water pH and surfactant addition effects on the stability of an Algerian crude oil emulsion, *Journal of Saudi Chemical Society*, 2012, no. 16, pp. 333-337.
9. Sams G.W., Zaouk M. Emulsion Resolution in Electrostatic Processes, *J. Energy Fuels*, 2000, no. 14, pp. 31-37.
10. Lee R.F. Agents which promote and stabilize water-in-oil emulsions, *Spill Science and Technology Bulletin*, 1999, no. 5, pp. 117-126.
11. Mclean J., Kilpatrick P.J. Effects of asphaltene solvency on stability of water-in-crude-oil emulsions, *Colloid Interface Sci.*, 1997, no. 189, pp. 242-253.
12. Sztukowski D., Yarranton H. Oilfield solids and water-in-oil emulsion stability, *J. Colloid Interface Sci.*, 2005, no. 285, pp. 821-833.
13. Yan N., Gray M., Masliyah J. On water-in-oil emulsions stabilized by fine solids, *Colloids Surf. A*, 2001, no. 193, pp. 97-107.
14. Strausz O.P., Mojelsky T.W., Lown E.M. The molecular structure of asphaltene: an unfolding story, *Fuel*, 1992, no. 71, pp. 1355-1363.

15. Daaou M., Bendedouch D., Bouhadda Y., Vernex-Loiset L., Modaressi A., Rogalski M. Explaining the flocculation of Hassi Messaoud asphaltenes in terms of structural characteristics of monomers and aggregates, *Energy Fuels*, 2009, no. 23, pp. 5556-5563.
16. McLean J.D., Kilpatrick P.K. Effects of asphaltene aggregation in model heptane-toluene mixtures on stability of water-in-oil emulsions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997, no. 196, pp. 23-34.
17. Sztukowski D.M., Jafari M., Alboudwarej H., Yarranton H.W. Asphaltene self-association and water-in-hydrocarbon emulsions, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, no. 265, pp. 179-186.
18. Rondón M., Pereira J.C., Bouriat P., Graciaa A., Lachaise J., Salager J.L. Breaking of water-in-crude-oil emulsions. 2. Influence of asphaltene concentration and diluent nature on demulsifier action, *Energy Fuels*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 702-707.
19. Nour A.H., Suliman A., Hadow M.M. Stabilization Mechanisms of Water-in-Crude Oil Emulsions, *Journal of Applied Sciences*, 2008, no. 8, pp. 1571-1575.
20. Poteau S., Argillier J.F., Langevin D., Pincet F., Perez E. Influence of pH on stability and dynamic properties of asphaltenes and other amphiphilic molecules at the oil-water interface, *Energy Fuels*, 2005, no. 19, pp. 1337-1341.
21. Fortuny M., Oliveira C.B.Z., Melo R.L.F.V., Nele M., Coutinho R.C.C., Santos A.F. Effect of salinity, temperature, water content, and pH on the microwave demulsification of crude oil emulsions, *Energy Fuels*, 2007, no. 21, pp. 1358-1364.
22. Strassner J.E. Effect of pH on interfacial films and stability of crude oil-water emulsions, *Journal of Petroleum Technology*, 1968, vol. 20, no. 3, pp. 303-312.
23. Mollakhalili M.N., Mohammadifar M.A., Naseri A. Effective Factors on the Stability of Oil-in-Water Emulsion Based Beverage: A Review, *Journal of Food Quality and Hazards Control*, 2014, no. 1, pp. 67-71.
24. Hajivand P., Vaziri A. Optimization of demulsifier formulation for separation of water from crude oil emulsions, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 32, no. 1, pp. 107-118.
25. Poteau S., Argillier J.F., Langevin D., Pincet F., Perez E. Influence of pH on stability and dynamic properties of asphaltenes and other amphiphilic molecules at the oil-water interface, *Energy Fuels*, 2005, no. 19, pp. 1337-1341.
26. Graham B.F., May E.F., Trengove R.D. Emulsion inhibiting components in crude oils, *Energy Fuels*, 2008, no. 22, pp. 1093-1099.
27. Pawignya H., Kusworo T.D., Pramudono P. Kinetic Modeling of Flocculation and Coalescence in the System Emulsion of Water-Xylene-Terbutyl Oleyl Glycosides, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2019, vol. 14, no. 1, pp. 60-68.
28. Wang X.Y., Alvarado V.J. Direct current electrorheological stability determination of water-in-crude oil emulsions, *Journal of Physical Chemistry B*, 2009, no. 113, pp. 13811-13816.
29. Abdurahman N.H., Yunus R.M., Azhari N.H., Said N., Hassan Z. The Potential of Microwave Heating in Separating Water-in-Oil (w/o), *Journal Energy Procedia*, 2017, vol. 138, pp. 1023-1028.
30. Graham D.E., Stockwell A., Thompson D.G., Odgen P.H. [Ed.] Chemical demulsification of produced crude oil emulsions. In: Chemicals in the Oil Industry, London: Royal Society of Chemistry, 1983, pp. 73-91.
31. Xu B., Kang W., Wang X., Meng L. Influence of Water Content and Temperature on Stability of W/O Crude Oil Emulsion, *Petroleum Science and Technology*, 2013, vol. 31, no. 10, pp. 1099-1108.
32. Al-Sabagh A.M., Kandile N.G., El-Ghazawy R.A., El-Din M.R.N. Synthesis and evaluation of some new demulsifiers based on bisphenols for treating water-in-crude oil emulsions, *Egyptian Journal of Petroleum*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 67-77.

33. Wang X.Y., Brandvik A., Alvarado V.J. Probing interfacial water-in-crude oil emulsion stability controls using electrorheology, *Energy Fuels*, 2010, vol. 24, no. 12, pp. 6359-6365.
34. Moradi M., Alvarado V., Huzurbazar S. Effect of salinity on water-in-crude oil emulsion: evaluation through drop-size distribution proxy, *Energy Fuels*, 2011, no. 25, pp. 260-268.
35. Al-Sabagh A.M., Zaki N.N. Efficiency of polyalkylphenols-polyalkylenepolyamines-formaldehyde ethoxylates as de-emulsifiers for water-in-crude oil-emulsions, *Tenside Surfactants and Detergents*, 1997, vol. 34, no. 1, pp. 12-17.
36. De Gennes P.G., Taupin C. Microemulsions and the flexibility of oil/water interfaces, *J. Phys. Chem.*, 1982, vol. 86, no. 13, pp. 2294-2304.
37. Al-Sabagh A.M., Kandile N.G., El-Din Noor M.R. Functions of Demulsifiers in the Petroleum Industry, *Separation Science and Technology*, 2011, vol. 46, no. 7, pp. 1144-1163.
38. Mohamed A.M.O., El Gamal M., Zekri A.Y. Effect of salinity and temperature on water cut determination in oil reservoirs, *J. of Petroleum Science and Engineering*, 2003, vol. 40, no. 3-4, pp. 177-188.
39. Nour A.H., Yunus R.M. Stability Investigation of Water-in-Crude Oil Emulsion, *Journal of Applied Sciences*, 2006, vol. 6, no. 14, pp. 2895-2900.
-

Влияние содержания воды, pH, солености и температуры на стабильность и поверхностное натяжение российской нефти марки Urals

М. Аррусс¹, Ж. Менсах², А. Аррусс^{3,4}

*Центр коллоидной химии кафедры химического и экологического
технологического проектирования (1), кафедра неорганической
и аналитической химии (2), Будапештский университет технологий
и экономики, Будапешт, Венгрия; arroussimed01@gmail.com;
кафедра неорганической химии и окружающей среды (3),
Университет имени Абу Бакр Белкайд, Шетуан, Тлемсен, Алжир;
лаборатория материаловедения (4), Университет
имени Ахмеда Драи, Адрар, Алжир*

Ключевые слова: сырая нефть; эмульсия; стабильность; пленка; испытательная бутылка; капля воды.

Аннотация: Исследовано влияние уровня pH, солености и температуры на стабильность и поверхностное натяжение нефтяных и водонефтяных эмульсий, полученных с использованием российской нефти марки Urals. Эмульсии получены путем смешивания дистиллированной воды и российской сырой нефти в объемном соотношении 1/3 с тремя различными забуферированными растворами с уровнем pH 2,00, 4,00 и 7,00, соответственно. Проведены измерения стабильности эмульсий и их поверхностного натяжения. Для получения эмульсий пять водных растворов хлорида натрия (с концентрациями 0,570, 1,407, 1,711, 3,080 и 4,106 моль/л, соответственно) смешивали с сырой нефтью в соотношении 1/4 (вода/нефть); также получены пять водных растворов для сырой нефти (содержащие 1,50 г, 2,50 г, 3,50 г, 4,50 г и 5,50 г натрия хлорида, соответственно). Проведены измерения поверхностного натяжения эмульсий и сырой нефти, а также ста-

бильности эмульсий. Чтобы избежать отгонки легких компонентов из нашего близкого измерительного сосуда, применялись температуры 20,01, 25,05, 29,01, 31,50 и 35,05 ° С. Измерено поверхностное натяжение сырой нефти и эмульсии с объемной долей 3/1 (масло/вода). Наблюдалось поверхностное натяжение сырой нефти и эмульсии с увеличением температуры, но при этом поверхностное натяжение сырой нефти и эмульсии также увеличивалось по мере увеличения солёности (концентрации хлорида натрия), увеличивались значения pH в диапазоне 2,00...7,00. С другой стороны, результаты испытаний стабильности эмульсий показали, что она уменьшается как с увеличением температуры, так и концентрации соли (хлорид натрия), при этом, с увеличением доли воды, стабильность эмульсии уменьшается. Обнаружено, что существует нестабильная эмульсия, образованная при pH = 7,00, и очень стабильная – при pH = 2,00.

Список литературы

1. Yang, X. Dynamic Asphaltene–Resin Exchange at the Oil/Water Interface : Time-Dependent W/O Emulsion Stability for Asphaltene/Resin Model Oils / X. Yang, V. J. Verruto, P. K. Kilpatrick // *Energy Fuels*. – 2007. – No. 21. – P. 1343 – 1349.
2. Stability of Water/Crude Oil Emulsions Based on Interfacial Dilatational Rheology / C. Dicharry [et al.] // *J. Colloid Interface Sci.* – 2006. – No. 297. – P. 785 – 791.
3. Ortiz, D. P. Effect of Surfactants on Interfacial Films and Stability of Water-in-Oil Emulsions Stabilized by Asphaltenes / D. P. Ortiz, E. N. Baydak, H. W. Yarranton // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2010. – No. 351. – P. 542 – 555.
4. Peña, A. A. Chemically Induced Destabilization of Water-in-Crude Oil Emulsions / A. A. Peña, G. J. Hirasaki, Cl. A. Miller // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2005. – Vol. 44, No. 5. – P. 1139 – 1149.
5. Influence of the Salinity on the Interfacial Properties of a Brazilian Crude Oil–Brine Systems / D. R. Alves [et al.] // *J. Fuel*. – 2014. – No. 118. – P. 21 – 26.
6. Nour, A. H. Water-in-Crude Oil Emulsions : Its Stabilization and Demulsification / A. H. Nour, R. M. Yunus, H. Anwaruddin // *Journal of Applied Sciences*. – 2007. – No. 7. – P. 3512 – 3517.
7. Interfacial Properties of Watercrude Oil Systems Using the Oscillating Pendant Drop. Correlations to Asphaltene Solubility by Near Infrared Spectroscopy / N. Aske [et al.] // *J. Dispersion Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 25, No. 3. – P. 263 – 275.
8. Daaou, M. Water pH and Surfactant Addition Effects on the Stability of an Algerian Crude Oil Emulsion / M. Daaou, D. Bendedouch // *Journal of Saudi Chemical Society*. – 2012. – No. 16. – P. 333 – 337.
9. Sams, G. W. Emulsion Resolution in Electrostatic Processes / G. W. Sams, M. Zaouk // *J. Energy Fuels*. – 2000. – No. 14. – P. 31 – 37.
10. Lee, R. F. Agents Which Promote and Stabilize Water-in-Oil Emulsions / R. F. Lee // *Spill Science and Technology Bulletin*. – 1999. – No. 5. – P. 117 – 126.
11. Mclean, J. Effects of asphaltene solvency on stability of water-in-crude-oil emulsions / J. Mclean, P. J. Kilpatrick // *Colloid Interface Sci.* – 1997. – No. 189. – P. 242 – 253.
12. Sztukowski, D. Oilfield solids and water-in-oil emulsion stability / D. Sztukowski, H. Yarranton // *J. Colloid Interface Sci.* – 2005. – No. 285. – P. 821 – 833.
13. Yan, N. On water-in-oil emulsions stabilized by fine solids / N. Yan, M. Gray, J. Masliyah // *Colloids Surf. A*. – 2001. – No. 193. – P. 97 – 107.
14. Strausz, O. P. The Molecular Structure of Asphaltene : an Unfolding Story / O. P. Strausz, T. W. Mojelsky, E. M. Lown // *Fuel*. – 1992. – No. 71. – P. 1355 – 1363.
15. Explaining the Flocculation of Hassi Messaoud Asphaltenes in Terms of Structural Characteristics of Monomers and Aggregates / M. Daaou [et al.] // *Energy Fuels*. – 2009. – No. 23. – P. 5556 – 5563.

16. McLean, J. D. Effects of Asphaltene Aggregation in Model Heptane–Toluene Mixtures on Stability of Water-in-Oil Emulsions / J. D. McLean, P. K. Kilpatrick // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1997. – No. 196. – P. 23 – 34.
17. Asphaltene Self-Association and Water-in-Hydrocarbon Emulsions / D. M. Sztukowski [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2003. – No. 265. – P. 179 – 186.
18. Breaking of Water-in-Crude-Oil Emulsions. 2. Influence of Asphaltene Concentration and Diluent Nature on Demulsifier Action / M. Rondón [et al.] // *Energy Fuels*. – 2007. – Vol. 22, No. 2. – P. 702 – 707.
19. Nour, A. H. Stabilization Mechanisms of Water-in-Crude Oil Emulsions / A. H. Nour, A. Suliman, M. M. Hadow // *Journal of Applied Sciences*. – 2008. – No. 8. – P. 1571 – 1575.
20. Influence of pH on Stability and Dynamic Properties of Asphaltenes and Other Amphiphilic Molecules at the Oil–Water Interface / S. Poteau [et al.] // *Energy Fuels*. – 2005. – No. 19. – P. 1337 – 1341.
21. Effect of Salinity, Temperature, Water Content, and pH on the Microwave Demulsification of Crude Oil Emulsions / M. Fortuny [et al.] // *Energy Fuels*. – 2007. – No. 21. – P. 1358 – 1364.
22. Strassner, J. E. Effect of pH on Interfacial Films and Stability of Crude Oil–Water Emulsions / J. E. Strassner // *Journal of Petroleum Technology*. – 1968. – Vol. 20, No. 3. – P. 303 – 312.
23. Mollakhalili, M. N. Effective Factors on the Stability of Oil-in-Water Emulsion Based Beverage : A Review / M. N. Mollakhalili, M. A. Mohammadifar, A. Naseri // *Journal of Food Quality and Hazards Control*. – 2014. – No. 1. – P. 67 – 71.
24. Hajivand, P. Optimization of demulsifier formulation for separation of water from crude oil emulsions / P. Hajivand, A. Vaziri // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. – 2015. – Vol. 32, No. 1. – P. 107 – 118.
25. Influence of pH on Stability and Dynamic Properties of Asphaltenes and Other Amphiphilic Molecules at the Oil–Water Interface / S. Poteau [et al.] // *Energy Fuels*. – 2005. – No. 19. – P. 1337 – 1341.
26. Graham, B. F. Emulsion Inhibiting Components in Crude Oils / B. F. Graham, E. F. May, R. D. Trengove // *Energy Fuels*. – 2008. – No. 22. – P. 1093 – 1099.
27. Pawignya, H. Kinetic Modeling of Flocculation and Coalescence in the System Emulsion of Water-Xylene-Terbutyl Oleyl Glycosides / H. Pawignya, T. D. Kusworo, P. Pramudono // *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*. – 2019. – Vol. 14, No. 1. – P. 60 – 68.
28. Wang, X. Y. Direct Current Electrorheological Stability Determination of Water-in-Crude Oil Emulsions / X. Y. Wang, V. J. Alvarado // *Journal of Physical Chemistry B*. – 2009. – No. 113. – P. 13811 – 13816.
29. The Potential of Microwave Heating in Separating Water-in-Oil (w/o) / N. H. Abdurahman [et al.] // *J. Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 138. – P. 1023 – 1028.
30. Chemical Demulsification of Produced Crude Oil Emulsions / D. E. Graham [et al.] // In: *Chemicals in the Oil Industry*. – London : Royal Society of Chemistry, 1983. – P. 73 – 91.
31. Influence of Water Content and Temperature on Stability of W/O Crude Oil Emulsion / B. Xu [et al.] // *Petroleum Science and Technology*. – 2013. – Vol. 31, No. 10. – P. 1099 – 1108.
32. Synthesis and evaluation of some new demulsifiers based on bisphenols for treating water-in-crude oil emulsions / A. M. Al-Sabagh [et al.] // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2011. – Vol. 20, No. 2. – P. 67 – 77.
33. Wang, X. Y. Probing Interfacial Water-in-Crude Oil Emulsion Stability Controls Using Electrorheology / X. Y. Wang, A. Brandvik, V. J. Alvarado // *Energy Fuels*. – 2010. – Vol. 24, No. 12. – P. 6359 – 6365.

34. Moradi, M. Effect of Salinity on Water-in-Crude Oil Emulsion : Evaluation Through Drop-Size Distribution Proxy / M. Moradi, V. Alvarado, S. Huzurbazar // *Energy Fuels*. – 2011. – No. 25. – P. 260 – 268.
35. Al-Sabagh, A. M. Efficiency of Polyalkylphenols-Polyalkylenepolyamines-Formaldehyde Ethoxylates as de-Emulsifiers for Water-in-Crude Oil-Emulsions / A. M. Al-Sabagh, N. N. Zaki // *Tenside Surfactants and Detergents*. – 1997. – Vol. 34, No. 1. – P. 12 – 17.
36. De Gennes, P. G. Microemulsions and the Flexibility of Oil/Water Interfaces / P. G. De Gennes, C. Taupin // *J. Phys. Chem.* – 1982. – Vol. 86, No. 13. – P. 2294 – 2304.
37. Al-Sabagh, A. M. Functions of Demulsifiers in the Petroleum Industry / A. M. Al-Sabagh, N. G. Kandile, M. R. El-Din Noor // *Separation Science and Technology*. – 2011. – Vol. 46, No. 7. – P. 1144 – 1163.
38. Mohamed, A. M. O. Effect of Salinity and Temperature on Water Cut Determination in Oil Reservoirs / A. M. O. Mohamed, M. El Gamal, A. Y. Zekri // *J. of Petroleum Science and Engineering*. – 2003. – Vol. 40, No. 3-4. – P. 177 – 188.
39. Nour, A. H. Stability Investigation of Water-in-Crude Oil Emulsion / A. H. Nour, R. M. Yunus // *Journal of Applied Sciences*. – 2006. – Vol. 6, No. 14. – P. 2895 – 2900.
-

Einfluss von Wassergehalt, pH-Wert, Salzgehalt und Temperatur auf Stabilität und Oberflächenspannung der russischen Erdöl Marke Ural

Zusammenfassung: In der Arbeit ist der Einfluss von pH-Wert, Salzgehalt und Temperatur auf die Stabilität und Oberflächenspannung von Öl- und Öl-Wasser-Emulsionen untersucht, die unter Verwendung des russischen Erdöls Marke Ural erhalten sind. Emulsionen wurden durch Mischen von destilliertem Wasser und russischem Rohöl in einem Volumenverhältnis von 1/3 mit drei verschiedenen gepufferten Lösungen mit einem pH von 2,00, 4,00 bzw. 7,00 erhalten. Die Stabilität der Emulsionen und ihre Oberflächenspannung sind gemessen worden. Um Emulsionen zu erhalten, wurden fünf wässrige Lösungen von Natriumchlorid (mit Konzentrationen von 0,570, 1,407, 1,711, 3,080 bzw. 4,106 mol/l) mit Rohöl in einem Verhältnis von 1/4 (Wasser / Öl) gemischt. Es wurden auch fünf wässrige Lösungen für Rohöl erhalten (die 1,50 g, 2,50 g, 3,50 g, 4,50 g bzw. 5,50 g Natriumchlorid enthielten). Die Oberflächenspannung der Emulsionen, des Rohöls, sowie der Emulsionsstabilität wurden gemessen. Um das Ablösen von leichten Bestandteilen aus dem nahen Messgefäß zu vermeiden, wurden die Temperaturen von 20,01, 25,05, 29,01, 31,50 und 35,05 ° C verwendet. Es wurde die Oberflächenspannung des Rohöls und der Emulsion mit einem Volumenanteil 3/1 (Öl / Wasser) gemessen. Es wurde die Oberflächenspannung des Rohöls und der Emulsion mit zunehmender Temperatur beobachtet, aber die Oberflächenspannung des Rohöls und der Emulsion stieg auch mit zunehmendem Salzgehalt (Natriumchlorid-Konzentration) und es gab einen Anstieg der pH-Werte im Bereich (von 2,00 bis 7,00). Andererseits zeigten die Ergebnisse von Emulsionsstabilitätstests, dass die Stabilität von Emulsionen sowohl mit zunehmender Temperatur als auch bei Salzkonzentration (Natriumchlorid) abnimmt, während mit zunehmendem Wassergehalt die Stabilität der Emulsion abnimmt. Bezüglich des pH-Werts wurde festgestellt, dass bei pH = 7,00 eine instabile Emulsion und bei pH = 2,00 eine sehr stabile Emulsion gebildet wird.

Influence de la teneur en eau, pH, de la salinité et de la température sur la stabilité et la tension superficielle du pétrole de la marque russe Urals

Résumé: Les effets du pH, de la salinité et de la température sur la stabilité et la tension superficielle des émulsions eau-huile brutes de l'Oural russe ont été étudiés. Les émulsions ont été obtenues en mélangeant de l'eau distillée et du pétrole brut russe dans un rapport volumétrique 1/3 avec trois solutions différentes avec des niveaux de pH de 2,00, 4,00 et 7,00, respectivement. Sont prises des mesures de la stabilité des émulsions et leur état superficiel. Pour recevoir des émulsions, cinq solutions aqueuses de chlorure de sodium (avec des concentrations de 0,570, 1,407, 1,711, 3,080 et 4,106 mol/l, respectivement) ont été mélangées avec du pétrole brut dans un rapport de 1/4 (eau/pétrole); sont obtenues cinq solutions aqueuses de pétrole brut (contenant 1,50 g, 2,50 g, 3,50 g, 4,50 g et 5,50 g de chlorure de sodium, respectivement). Est mesurée la tension supérieure des émulsions et du pétrole brut, ainsi que de la stabilité des émulsions. A été observée la tension superficielle du pétrole brut et de l'émulsion avec une augmentation de la température, mais la tension superficielle du pétrole brut et de l'émulsion a également augmenté avec l'augmentation de la salinité (concentration de chlorure de sodium) et une augmentation des valeurs de pH dans la gamme (de 2,00 à 7,00). D'autre part, les résultats des essais de stabilité des émulsions ont montré que la stabilité des émulsions diminuait à la fois avec l'augmentation de la température et de la concentration de sel (chlorure de sodium), tandis que, avec l'augmentation de fraction d'eau, la stabilité de l'émulsification diminuait. En ce qui concerne pH, a été constaté qu'il existe une émulsion instable formée avec pH = 7,00 et une émulsion très stable formée avec pH = 2,00.

Авторы: *Аррусси Мохаммед* – сотрудник Центра коллоидной химии кафедры химического и экологического технологического проектирования; *Менсах Жошуа* – магистрант кафедры неорганической и аналитической химии, Будапештский университет технологий и экономики, г. Будапешт, Венгрия; *Аррусси Абделаиз* – профессор кафедры неорганической химии и окружающей среды, Университет имени Абу Бакр Белкайд, Шетуан, Тлемсен, Алжир; лаборатория материаловедения, Университет имени Ахмеда Драи, Адрар, Алжир.

Рецензент: *Леонтьева Альбина Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТРУБ В ДВУХТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов,
Д. О. Смольская, Д. М. Баранов

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
г. Волгоград, Россия; natasha292009@yandex.ru*

Ключевые слова: амортизационные отчисления; гидравлическое сопротивление; двухтрубный теплообменник; диаметр труб; мощность; оборотные средства; производительность; энергозатраты.

Аннотация: Типовой алгоритм расчета двухтрубного теплообменника, связанный с технологическими параметрами в зависимости от производительности и диаметра труб дополнен расчетами экономических показателей, связанных с энергозатратами на перекачивание газов или жидкости, амортизационными отчислениями за капитальные затраты и оборотными средствами за ремонт и обслуживание насоса или компрессора и самого двухтрубного теплообменника. Приведены результаты расчетов для системы нагревания дутьевого воздуха дымовыми газами.

Введение

Один из основных типов промышленных теплообменников оборудования, после наиболее распространенных кожухотрубных, – двухтрубный теплообменник или теплообменник типа «труба в трубе» [1, 2]. Их основной недостаток, связанный с высокой удельной металлоемкостью, то есть массой металла на квадратный метр теплообменной поверхности, нивелируется заменой металлической наружной трубы, поверхность которой не участвует в теплообмене, на легкие пластмассовые трубы, тоже касающиеся калачей и колен, соединяющих прямолинейные плети этих труб на поворотах между собой. В последнее время удается нивелировать и другой недостаток двухтрубных теплообменников: сложность очистки от термических загрязнений наружной теплопередающей поверхности центральной трубы, когда вместо неразборных обычно сварных конструкций стали применять разборные конструкции, где обеспечиваются разъемные фланцевые соединения наружной и центральной труб, калачи (колена) выполнены телескопическими или из гофрированных гибких труб (рис. 1) [3 – 6]. Кроме того, это позволяет отказать от установки компенсаторов температурных напряжений при больших разностях температур горячего и холодного теплоносителей, движущихся в межтрубном пространстве и центральной трубе, поверхность внутреннего калача может использоваться как дополнительная теплообменная поверхность. Разработаны и новые методы очистки теплообменных поверхностей двухтрубных теплообменников [7 – 15].

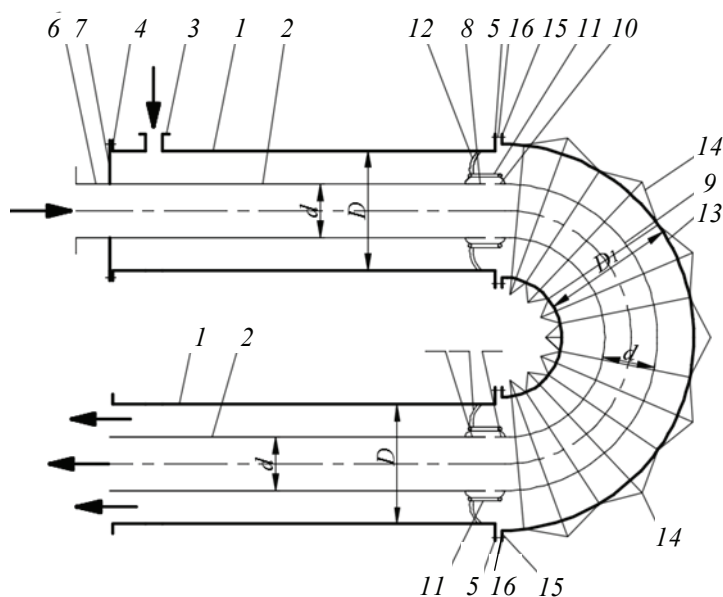


Рис. 1. Конструкция теплообменника, выполненная из гофрированных гибких труб:
 1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3, 6 – патрубки; 4, 5, 7, 15 – неразъемные фланцы; 8, 10 – резьбовые соединения; 9 – калач; 11 – муфта; 12 – упругие цилиндрические пластины; 13 – колено, выполненное в виде гофрированной трубы; 14 – гофра; 16 – болтовое соединение

Цель работы – дополнение типового алгоритма расчета двухтрубного теплообменника [16 – 18] формулами для расчета технико-экономических показателей, в частности зависимости общей стоимости годовых затрат на электроэнергию, амортизационных отчислений за капитальные затраты (стоимость насосов или компрессоров и самого двухтрубного теплообменника и их монтаж в единую технологическую линию) и оборотных средств за ремонт и обслуживание от диаметра центральной трубы.

Кроме того, в типовом алгоритме расчетов нивелированы разрывы зависимостей чисел Нуссельта на границах ламинарного и переходного режимов, а также переходного и турбулентного с помощью соединяющего данные границы непрерывной ломаной линией алгебраического выражения

$$a + b(Re - Re_g),$$

где a , b – коэффициенты корреляции; Re – число Рейнольдса; Re_g – гидромеханическое число Рейнольдса.

Алгоритм расчета двухтрубного теплообменника

Укрупненно представим алгоритм следующим образом.

1. Задаются исходные и справочные данные двухтрубного теплообменника, предназначенного для нагрева дутьевого воздуха дымовыми газами (горячий теплоноситель в межтрубном пространстве, холодный теплоноситель – в центральной трубе) (табл. 1).

2. Рассчитываются параметры, не зависящие от внутреннего диаметра центральной трубы: физические параметры (вязкость, плотность обеих сред, средняя движущая сила, средние температуры холодного и горячего теплоносителей, расход горячего теплоносителя, числа Прандтля).

Таблица 1

**Исходные и справочные данные, расчетные технологические
и техникоэкономические параметры двухтрубного теплообменника**

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
<i>Исходные данные</i>			
Массив внутренних диаметров центральной трубы, в которой движется нагреваемая жидкость или газ	м	d_v	Задан в программе
Массив толщины стенки труб		$\delta_{ст}$	
Производительность по нагреваемому воздуху	кг/ч	G	250
Начальная температура нагреваемой жидкости	°C	t_n	20
Конечная температура нагреваемой жидкости		t_k	120
Начальная температура горячего теплоносителя (дымовых газов)		$t_{д.н}$	320
Конечная температура горячего теплоносителя (дымовых газов)		$t_{д.к}$	160
Плотность дымовых газов при нормальных условиях (0 °C и $p = 1,033$ атм.)	кг/м ³	$\rho_{д0}$	1,32
Плотность дымовых газов для нагреваемого воздуха (0 °C)		ρ_0	1,29
Коэффициент объемного расширения горячего теплоносителя	1/°C	ν_d	0,0036
Коэффициент объемного расширения холодного теплоносителя		ν	0,0036
Вязкость горячего теплоносителя при 0 °C	Па·с	$\mu_{д0}$	$1,88 \cdot 10^{-5}$
Вязкость холодного теплоносителя при 0 °C		μ_0	$1,94 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент вязкости для горячего теплоносителя	1/°C	a_d	0,00133
Коэффициент вязкости для холодного теплоносителя		a	0,0013
Коэффициент теплопроводности горячего теплоносителя (дымовых газов)	Вт/(м·K)	λ_d	0,038
Коэффициент теплопроводности холодного теплоносителя		λ_s	0,036
Теплоемкость горячего теплоносителя	Дж/(кг·K)	$c_{рд}$	1040
Теплоемкость холодного теплоносителя		c_d	1020
Давление рабочее в межтрубном пространстве	ата	p_d	1,033
Давление рабочее в центральной трубе		p_s	1,033
Теплопроводность материала труб	Вт/(м·K)	λ_w	46,2
Термическое сопротивление ржавчины, накипи, солевого камня и других отложений	$(\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}))^{-1}$	r_s	0,0004
Число параметров в массиве рассчитываемых диаметров труб	—	n	18
Коэффициент гидравлического сопротивления по длине внутренней трубы (турбулентный режим)		λ_m	0,033

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Коэффициент гидравлического сопротивления для наружной трубы (выбирается в зависимости от Рейнольдса автоматически): $Re < 2300$, $\lambda = 64 / Re$; $Re < 10000$, $\lambda = 0,316/Re^{0,25}$	—	λ_{∂}	0,033
Коэффициент полезного действия насоса или компрессора		к.п.д.	0,5
Стоимость кВт/ ч электроэнергии	р./ (кВт·ч)	C_e	3
Амортизационные отчисления за капитальные затраты, приходящиеся на 1 м длины и 1 м диаметра труб в год	р./ (м ² ·год)	A_k	4500
Амортизационные отчисления оборотных средств за ремонт и эксплуатацию	р./ (м ² ·год)	$A_{o.c}$	5350
Доля местных сопротивлений в коленах при повороте потоков и в патрубках	—	Δp_m	0,23
Число рабочих суток за год	сутки/год	n_p	300
Расчетные параметры			
Средняя движущая сила	°C	Δt_{cp}	168,2
Средняя температура холодного теплоносителя		Δt_s	70
Средняя температура горячего теплоносителя		$\Delta t_{дs}$	238,2
Вязкость холодного теплоносителя при средней температуре и давлении в центральной трубе	Пас	μ	$1,78 \cdot 10^{-5}$
Вязкость горячего теплоносителя (дымовых газов) при средней температуре в межтрубном пространстве		μ_d	$2,58 \cdot 10^{-5}$
Плотность холодного теплоносителя при средней температуре и давлении в центральной трубе	кг/м ³	ρ	1,027
Плотность горячего теплоносителя (дымовых газов) при средней температуре и давлении в межтрубном пространстве		ρ_d	0,705
Число Прандтля для холодного теплоносителя	—	Pr	0,5
Число Прандтля для горячего теплоносителя		Pr_d	0,71
Расчетные параметры для оптимального диаметра трубопровода, соответствующие минимуму суммарных затрат в год на электроэнергию, амортизацию и оборотные средства			
Оптимальный диаметр внутренней трубы	м	d_B	0,055
Наружный диаметр внутренней трубы		$d_{B.H}$	0,061
Толщина внутренней трубы		δ_s	0,003
Внутренний диаметр наружной трубы		d_H	0,116
Эквивалентный диаметр межтрубного пространства		$d_{\text{э.д}}$	0,055
Площадь сечения межтрубного пространства	м ²	S_{∂}	0,00762
Число Рейнольдса для холодного теплоносителя	—	Re	$9,05 \cdot 10^4$
Число Рейнольдса для горячего теплоносителя		Re_d	$1,22 \cdot 10^5$
Скорость средняя холодного теплоносителя в центральной трубе	м/с	ϑ_s	28,5
Скорость средняя горячего теплоносителя в межтрубном пространстве		ϑ_{∂}	8,16

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Температура на наружной поверхности центральной трубы	°C	x	106,1
Температура на внутренней поверхности центральной трубы		t_x	104,5
Число Грасгофа для горячего теплоносителя в межтрубном пространстве	–	Gr_d	$5,76 \cdot 10^5$
Число Грасгофа для холодного теплоносителя в центральной трубе		Gr	$6,77 \cdot 10^5$
Число Нуссельта для горячего теплоносителя		Nu_d	38,5
Число Нуссельта для холодного теплоносителя		Nu	155,4
Коэффициент теплоотдачи для горячего теплоносителя в межтрубном пространстве	$Вт/(м^2 \cdot К)$	α_d	26,7
Коэффициент теплоотдачи для холодного теплоносителя в центральной трубе		α	101,7
Удельная тепловая мощность для горячего теплоносителя	$Вт/м^2$	q_d	3520
Удельная тепловая мощность для холодного теплоносителя		q_s	3510
Средняя удельная тепловая мощность		q	3515
Площадь теплоотдачи	$м^2$	F_r	2,01
Коэффициент теплопередачи	$Вт/(м^2 \cdot К)$	k_t	20,9
Расход горячего теплоносителя в межтрубном пространстве	кг/ч	G_d	158
Расчетный коэффициент линейного сопротивления внутренней трубы	–	λ	0,033
Расчетный коэффициент для межтрубного пространства		$\lambda_{ад}$	
Гидравлическое сопротивление во внутренней трубе	Па	Δp	2800
Гидравлическое сопротивление для межтрубного пространства		Δp_g	163
Общее гидравлическое сопротивление	ата	Δp_0	0,0366
Мощность насосов или компрессоров	кВт	N_0	0,48
Годовые затраты на электроэнергию	р./год	$C_э$	$10,4 \cdot 10^3$
Годовые затраты на амортизационные отчисления		$C_{а.к}$	$8,51 \cdot 10^3$
Годовые затраты на оборотные средства		$C_{о.с}$	$10,1 \cdot 10^3$
Общие годовые затраты		C_0	$29,1 \cdot 10^3$
Доля стоимости электроэнергии	–	O_e	0,36
Доля стоимости амортизации на капитальные затраты		$O_{а.к}$	0,29
Доля стоимости оборотных средств		$O_{о.с}$	0,35

3. Для каждого из последовательно выбираемых из заданного массива внутренних диаметров центральной трубы d_v рассчитываются геометрические характеристики наружной трубы и межтрубного пространства, гидромеханические числа Рейнольдса и скорости обоих теплоносителей, безразмерные параметры Грасгофа (для ламинарных потоков), средние температуры на наружной и внутренней поверхностях центральной трубы с учетом предварительных расчетов чисел Нуссельта (в зависимости от режимов течения), коэффициентов теплоотдачи и удельных тепловых мощностей, уравниванием последних методом половинного

деления при варьировании температуры в пределах между средними температурами горячего и холодного теплоносителя, коэффициент и поверхность теплопередачи с выходом на длину труб l_r .

4. Далее для рассчитанных d_b и длины l_r определяют гидравлические сопротивления обеих труб, необходимую мощность насосов или компрессоров, общие годовые затраты на электроэнергию, амортизационные отчисления на капитальные затраты и оборотные средства, годовые суммарные затраты для данного d_b и доли каждой из составляющих вышеназванных затрат в общих годовых затратах.

5. Затем выбирается из массива следующий диаметр d_b и расчеты по шагам $2 \div 4$ повторяются. Результаты сводятся в общую таблицу зависимости основных параметров: общей годовой стоимости, мощности, гидравлического сопротивления и длины от диаметра d_b . Расчеты прекращаются после того, как очередное значение суммарных годовых затрат становится больше предыдущего.

Отметим, что внутри расчетов по шагу 3 в формулы зависимости числа Нуссельта от числа подобия еще входит геометрическое сопротивление длины трубы и ее внутреннего диаметра d_b , что требует дополнительного цикла по предварительному заданию длины и сравнению ее с расчетной l_r до их уравнивания.

Результаты расчетов для оптимального внутреннего диаметра центральной трубы

В таблице 1 представлены исходные и справочные данные и расчетные параметры двухтрубного теплообменника, в котором нагревается дутьевой воздух, движущийся в центральной трубе, дымовыми газами, движущимся противотоком в межтрубном пространстве. Результаты расчетов приведены для оптимального внутреннего диаметра центральной трубы, соответствующего минимальным суммарным годовым расходам $C_{об}$. В таблице 2 показаны основные технологические,

Таблица 2

Зависимости основных технико-экономических параметров двухтрубного теплообменника от разных внутренних диаметров центральной трубы

Наименование параметра	Величина параметра						
Внутренний диаметр центральной трубы d_b , м	0,030	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060
Общее гидравлическое сопротивление Δp_0 , ата	0,481	0,252	0,142	0,085	0,055	0,037	0,025
Мощность компрессоров или воздуходувок N_0 , кВт	6,4	3,3	1,9	1,1	0,73	0,48	0,34
Годовые затраты на электроэнергию $C_э \cdot 10^{-4}$, р./год	13,7	7,2	4,04	2,43	1,57	1,04	0,726
Годовые затраты на амортизационные отчисления $C_{а.к} \cdot 10^{-4}$, р./год	0,3	0,4	0,493	0,594	0,727	0,851	1,0
Годовые затраты на оборотные средства $C_{о.с} \cdot 10^{-4}$, р./год	0,357	0,475	0,586	0,708	0,864	1,01	1,19
Общие годовые затраты, $C_o \cdot 10^{-4}$, р./год	14,4	8	5,12	3,74	3,16	2,91	2,92
Длина труб l_r , м	7,06	8,00	8,73	9,45	10,33	11,06	11,89

геометрические и экономические параметры двухтрубного теплообменника в котором дутьевой воздух нагревается в центральной трубе дымовыми газами, движущимися противотоком в межтрубном пространстве в зависимости от разных внутренних диаметров данной трубы.

Анализ полученных результатов

Из результатов расчетов, представленных в табл. 1 (для оптимального диаметра $d_b = 0,055$) и табл. 2, очевидно, что с ростом внутреннего диаметра центральной трубы длина труб увеличивается в 1,5 раза. Общие годовые затраты снижаются почти в 5 раз, и если при малых диаметрах труб более 90 % общих затрат приходится на электроэнергию, то при оптимальном диаметре эта доля снижается до 35 %; 65 % приходится на амортизационные отчисления и оборотные средства. Оба газа движутся в турбулентном режиме со скоростями 8...20 м/с и общее гидравлическое сопротивление не превышает 0,5 атм.

Заключение

Предлагаемый алгоритм расчета двухтрубного теплообменника позволяет рассчитывать технологические, геометрические и технико-экономические показатели с выходом на оптимальные геометрические размеры обеих труб, позволяющие минимизировать суммарные годовые затраты на электроэнергию, амортизационные отчисления за капитальные затраты и оборотные средства за ремонт и обслуживание.

Список литературы

1. Машины и аппараты химических производств : учебник для вузов / А. С. Тимонин [и др.] ; под общей ред. А. С. Тимонина. – Калуга : Ноосфера, 2014. – 856 с.
2. ТУ 3612-014-00220302-99. Теплообменники «труба в трубе». Технические условия. – Взамен ТУ 26-02-1023-87, ТУ 26-02-1066-88, АТК 24.202.03-90, АТК 24.202.07-90 ; введ. 1999-10-01 ; отм. 01.01.2018. – М. : ОАО «ВНИИ Нефтемаш», 1999. – 109 с.
3. Полезная модель к пат. № 130379 РФ, МПК F28F 1/00. Теплообменник «труба в трубе» / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина, Б. А. Дулькин, Л. В. Кетат, Т. А. Кузнецова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2013103932/06 ; заявл. 29.01.2013 ; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. – 8 с.
4. Полезная модель к пат. № 154481 РФ, МПК F28F 1/00, F28D 7/10. Теплообменник «труба в трубе» / Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, П. С. Васильев, С. А. Анцыперов, А. В. Маринин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2014145530/06 ; заявл. 12.11.2014 ; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. – 8 с.
5. Полезная модель к пат. № 169822 РФ, МПК F28D 7/10, F28F 9/04. Теплообменник «труба в трубе» / В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Прохоренко, А. В. Маринин, М. С. Семененко ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2016121063 ; заявл. 27.05.2016 ; опубл. 03.04.2017, Бюл. № 10. – 9 с.
6. Полезная модель к пат. № 181266 РФ, МПК F28D 7/10, F28D 7/06. Теплообменник «труба в трубе» / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Прохоренко, М. В. Гончаров, А. А. Остапенко ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2017145809 ; заявл. 25.12.2017 ; опубл. 09.07.2018, Бюл. № 19. – 7 с.

7. Голованчиков, А. Б. Перспективные устройства для очистки теплообменных поверхностей : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2014. – 64 с.

8. Полезная модель к пат. № 104099 РФ, МПК В08В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, Л. С. Рева, Н. А. Дулькина, С. Б. Воронцова, С. Л. Рева, П. С. Васильев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010144723/05 ; заявл. 01.11.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13. – 6 с.

9. Полезная модель к пат. № 109675 РФ, МПК В08В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, Н. А. Дулькина, В. А. Панов, Л. С. Рева, С. Л. Рева ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011124488/05 ; заявл. 16.06.2011 ; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30. – 7 с.

10. Полезная модель к пат. № 114889 РФ, МПК В08В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, Л. С. Рева, Н. А. Дулькина, С. Б. Воронцова, С. Л. Рева, П. С. Васильев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011146514/05 ; заявл. 16.11.2011 ; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11. – 7 с.

11. Полезная модель к пат. № 149630 РФ, МПК В08В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, Н. А. Дулькина, С. Р. Коломиец, Д. Р. Коломиец, Д. С. Мурзенков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2014116298/05 ; заявл. 22.04.2014 ; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 7 с.

12. Абразивная гранула с положительной плавучестью / С. Б. Воронцова [и др.] // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2014. – №1 (128). – С. 94 – 97.

13. Полезная модель к пат. № 117328 РФ, МПК В08В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова, М. П. Купцов, О. В. Затыкин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2012104218/04 ; заявл. 07.02.2012 ; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. – 7 с.

14. Полезная модель к пат. № 128840 РФ, МПК В08В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, М. Е. Кисиль, Д. А. Павлов, Д. С. Мурзенков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2012136402/05 ; заявл. 24.08.2012 ; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16. – 7 с.

15. Полезная модель к пат. № 152751 РФ, МПК В08В 9/023, F28G 13/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, Н. А. Дулькина, С. Р. Коломиец, Д. Р. Коломиец, С. А. Анцыперов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2014144865/05 ; заявл. 06.11.2014 ; опубл. 20.06.2015, Бюл. № 17. – 6 с.

16. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.

17. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике : монография / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2015. – 160 с.

18. Голованчиков, А. Б. Моделирование и расчет технологических параметров и геометрических размеров теплообменного оборудования : монография / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, С. А. Анцыперов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2016. – 160 с.

Determination of Optimum Pipe Diameter in a Two-Pipe Heat Exchanger

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, N. A. Merentsov,
D. O. Smolskaya, D. M. Baranov

*Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production,
Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia; natasha292009@yandex.ru*

Keywords: depreciation; hydraulic resistance; twin tube heat exchanger; pipe diameter; power; working capital; performance; energy costs.

Abstract: A typical algorithm for calculating a two-pipe heat exchanger based on process parameters, depending on performance and pipe diameter is supplemented by calculations of economic indicators depending on energy consumption for pumping gases or liquids, depreciation charges for capital costs and working capital for repair and maintenance of the pump or compressor and the two-pipe heat exchanger itself. The results of calculations for the system for heating the blast air with smoke gases are given.

References

1. Timonin A.S., Baldin B.G., Borshchev V.Ya., Gusev Yu.I. *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: uchebnyk dlya vuzov* [Machines and apparatuses of chemical plants: a textbook for universities], Kaluga: Noosfera, 2014, 856 p. (In Russ.)
2. TU 3612-014-00220302-99. *Teploobmenniki «truba v trube». Tekhnicheskiye usloviya* [Heat exchangers "pipe in pipe". Technical conditions], Moscow: OAO "VNII Neftemash", 1999, 109 p. (In Russ.)
3. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A., Dul'kin B.A., Ketat L.V., Kuznetsova T.A. *Teploobmennik «truba v trube»* [Heat exchanger "pipe in pipe"], Russian Federation, 2013, Utility model 130379. (In Russ.)
4. Reva L.S., Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Vasil'yev P.S., Antsyperov S.A., Marinin A.V. *Teploobmennik «truba v trube»* [Heat exchanger "pipe in pipe"], Russian Federation, 2015, Utility model 154481. (In Russ.)
5. Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Prokhorenko N.A., Marinin A.V., Semenenko M.S. *Teploobmennik «truba v trube»* [Heat exchanger "pipe in pipe"], Russian Federation, 2017, Utility model 169822. (In Russ.)
6. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Prokhorenko N.A., Goncharov M.V., Ostapenko A.A. *Teploobmennik «truba v trube»* [Heat exchanger "pipe in pipe"], Russian Federation, 2018, Utility model 181266. (In Russ.)
7. Golovanchikov A.B., Vorontsova S.B. *Perspektivnyye ustroystva dlya ochistki teploobmennyykh poverkhnostey: uchebnoye posobiye* [Promising devices for cleaning heat-transfer surfaces: a tutorial], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2014, 64 p. (In Russ.)
8. Golovanchikov A.B., Reva L.S., Dul'kina N.A., Vorotneva S.B., Reva S.L., Vasil'yev P.S. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2011, Utility model 104099. (In Russ.)
9. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A., Panov V.A., Reva L.S., Reva S. L. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2011, Utility model 109675. (In Russ.)

10. Golovanchikov A.B., Reva L.S., Dul'kina N.A., Vorotneva S.B., Reva S.L., Vasil'yev P.S. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2012, Utility model 114889. (In Russ.)
11. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A., Kolomiyets S.R., Kolomiyets D.R., Murzenkov D.S. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2015, Utility model 149630. (In Russ.)
12. Vorotneva S.B., Golovanchikov A.B., Kolomiyets S.R., Kolomiyets D.R. [Abrasive granule with positive buoyancy], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Volgograd State Technical University], 2014, no.1 (128), pp. 94-97. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A., Aristova Yu.V., Kuptsov M.P., Zatyamin O.V. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2012, Utility model 117328. (In Russ.)
14. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Kisil' M.Ye., Pavlov D.A., Murzenkov D.S. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2013, Utility model 128840. (In Russ.)
15. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Dul'kina N.A., Kolomiyets S.R., Kolomiyets D.R., Antsyperov S.A. *Ustroystvo dlya ochistki naruzhnoy poverkhnosti trub* [A device for cleaning the outer surface of pipes], Russian Federation, 2015, Utility model 152751. (In Russ.)
16. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and tasks for the course of processes and devices of chemical technology], Moscow: Al'yans, 2013, 576 p. (In Russ.)
17. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B. *Modelirovaniye gidrodinamicheskikh i teplovykh protsessov v dvukhtrubnom teploobmennike: monografiya* [Modeling hydrodynamic and thermal processes in a two-pipe heat exchanger: monograph], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2015, 160 p. (In Russ.)
18. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B., Antsyperov S.A. *Modelirovaniye i raschet tekhnologicheskikh parametrov i geometricheskikh razмеров teploobmennogo oborudovaniya: monografiya* [Modeling and calculation of technological parameters and geometric dimensions of heat exchange equipment: monograph], Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2016, 160 p. (In Russ.)

Bestimmung des optimalen Rohrdurchmessers in einem Doppelrohrwärmetauscher

Zusammenfassung: Der typische Algorithmus zur Berechnung eines Zwei-Rohr-Wärmetauschers, der mit technologischen Parametern in Abhängigkeit von der Leistung und Rohrdurchmesser verbunden ist, ist durch Berechnungen der Wirtschaftsindikatoren im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch zum Pumpen von Gasen oder Flüssigkeiten, Abschreibungssummen für Kapitalkosten und Betriebskapital für Reparatur und Wartung der Pumpe oder des Kompressors und des Zweirohrwärmetauschers selbst ergänzt. Die Ergebnisse der Berechnungen für das System zur Erwärmung der Verbrennungsluft mit Rauchgasen sind angegeben.

Détermination du diamètre optimal des tubes dans l'échangeur de chaleur à deux tubes

Résumé: L'algorithme typique du calcul de l'échangeur de chaleur à deux tubes est complété par les calculs des indicateurs économiques associés avec les coûts énergétiques pour le pompage de gaz ou de liquide, les frais d'amortissement pour les dépenses en capital et les fonds de roulement pour la réparation et l'entretien de la pompe ou du compresseur et de l'échangeur de chaleur à deux tubes lui-même. Sont cités les résultats des calculs pour le système du chauffage de l'air soufflé par des gaz de combustion.

Авторы: *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Прохоренко Наталья Андреевна* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Смольская Дарья Олеговна* – студент; *Баранов Даниил Михайлович* – студент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.

Рецензент: *Гермашев Илья Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Фундаментальной информатики и оптимального управления», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия.

УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПРОМЫВНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА ПИГМЕНТОВ АЛОГО, ЖЕЛТОГО И ОРАНЖЕВОГО

Н. В. Алексеева¹, В. Ю. Литницкий¹, А. Я. Куликов²

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1); ПАО «Пигмент» (2), г. Тамбов, Россия;
alexejew.nadja@gmail.com*

Ключевые слова: водный раствор; концентрация; пермеат; пигмент; производительность модуля; разделение; ультрафильтрация.

Аннотация: Проведен анализ технологии производства пигментов алого Ж, желтого кроющего 2 «З» и оранжевого Ж на ПАО «Пигмент». Рассмотрена задача уменьшения количества сточных вод путем очистки промывных вод технологической линии и возврата очищенной воды в производство. Большую часть сточных вод производства пигментов представляют собой промывные воды со стадии промывки суспензии, содержащие в своем составе неорганические водорастворимые и органические нерастворимые компоненты. В настоящее время неорганические компоненты удаляются из промывных вод с помощью обратноосмотического разделения. Возникает необходимость предварительной подготовки промывных вод перед обратноосмотическим разделением в целях удаления органических компонентов. Для этого исследован процесс ультрафильтрационного разделения водных растворов, содержащих органические компоненты – пигменты алый, желтый или оранжевый. Разработана лабораторная установка и проведены экспериментальные исследования зависимости проницаемости и селективности мембран от расхода исходной смеси и рабочего давления. Предложены рекомендации для проведения процесса предварительного ультрафильтрационного разделения.

Развитие промышленных предприятий, увеличение объемов производства и расширение номенклатуры производимой продукции неизменно влечет за собой увеличение объемов образующихся отходов. Проблеме очистки жидких отходов производства – сточных вод посвящено много исследований [1 – 4]. Большое количество проведенных работ обусловлено широким спектром количественного и качественного состава сточных вод. Каждое конкретное предприятие характеризуется своими уникальными сточными водами. Часто по составу сточных вод можно определить предприятие, откуда они были сброшены.

Наиболее опасными с точки зрения загрязнения окружающей среды являются химические производства, к которым относится тамбовское предприятие ПАО «Пигмент». Основными продуктами данного предприятия являются красители и пигменты, производство которых характеризуется большим количеством потребляемой воды и сливаемых сточных вод. Организация процесса очистки сточных вод с последующим возвратом очищенной воды в производство позволит сократить водопотребление предприятия и уменьшить количество сбрасываемых сточных вод.

Таблица 1

Водопотребление стадии промывки производства пигментов

Пигмент	Наименование компонента	Масса, кг	Количество вещества, моль	Объем, дм ³ (л)
Алый Ж	Суспензия пигмента	40 652,6	3,3637	40 000,0
	Вода на промывку	150 000,0		150 000,0
Желтый кроющий 2 «З»	Суспензия пигмента	40 913,0	2,84	40 000,0
	Вода на промывку	67 035,0		67 035,0
Оранжевый Ж	Суспензия пигмента	30 868,7	1,5084	29 900...30 000
	Вода на промывку	18 420,4		18 420,4

Анализ технологии производства пигментов представлен в табл. 1. Значительное количество воды потребляется на стадии промывки суспензии. Полученные промывные воды представляют собой водные растворы солей – побочных продуктов стадии синтеза и пигментов, прошедших через фильтрующие элементы. Очистка этих вод и возврат их в производство позволило бы предприятию уменьшить расходы на воду и сократить объемы стоков.

В производстве пигментов состав питающей воды должен соответствовать артезианской [5]. Для получения воды такого качества используется обратноосмотическая очистка, требующая предварительной подготовки промывных вод [6]. Целью предварительной обработки является удаление из водных растворов крупных молекул пигментов, присутствие которых в растворе снижает эффективность обратноосмотического разделения.

На рисунке 1 представлены структурные формулы исследуемых пигментов. Очевидно, что молекулярные массы исследуемых пигментов превосходят

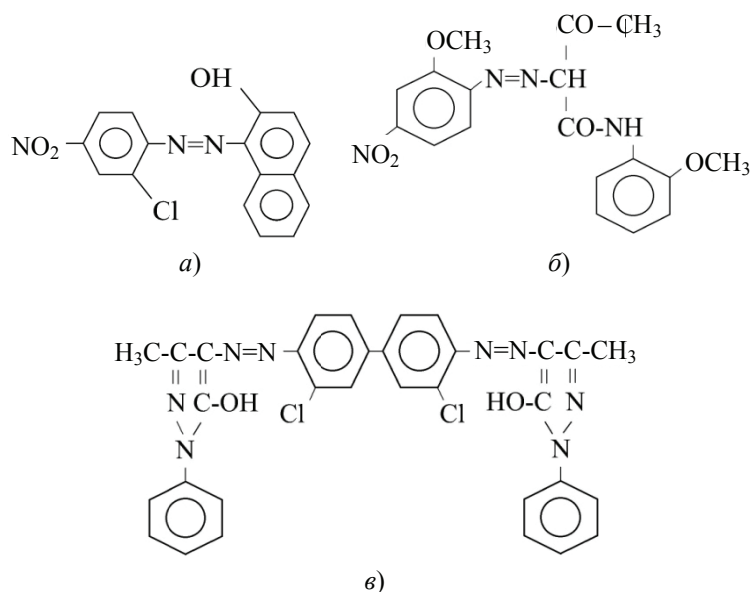


Рис. 1. Структурные формулы пигментов:

а – пигмент алый Ж (эмпирическая формула $C_{16}H_{10}O_3N_3Cl$; молярная масса 327,5 кг/кмоль); б – пигмент желтый кроющий 2 «З» (эмпирическая формула $C_{18}H_{18}N_4O_6$; молярная масса 386,0 кг/кмоль); в – пигмент оранжевый Ж (молярная масса 623,0 кг/кмоль)

300 кг/кмоль, что позволяет использовать в качестве предварительной обработки ультрафильтрационную очистку на трубчатых элементах типа БТУ 05/2 производства компании «Владипор».

Для приготовления модельного раствора промывных вод суспензия пигмента разводилась водой, отфильтровывалась на фильтровальной бумаге и затем к фильтрату добавлялась вода до содержания пигмента, соответствующего промышленным образцам.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной ультрафильтрационной установке, содержащей один трубчатый мембранный элемент типа БТУ 05/2, материал мембраны – ацетат целлюлозы – нанесен на внешнюю поверхность трубки.

Общий вид и схема экспериментальной установки показаны на рис. 2.

Исследуемый раствор из емкости 1 подается насосом 2 в мембранную ячейку 3. Расход подаваемого раствора контролируется с помощью ротаметра 4. Очищенная вода поступает в сборник пермеата 5. Регулировка расхода питающего раствора осуществляется с помощью вентиля 6, давления в мембранном модуле – вентилем 7. Для контроля рабочего давления установлен манометр 8. Мембранный модуль имеет стальной корпус из стали X18H10T, внутри которого устанавливается трубчатая мембрана с наружным и внутренним диаметрами соответственно 10 и 6 мм и длиной 1000 мм. Один конец мембраны закрывается заглушкой, второй – устанавливается неподвижно в резиновой втулке и уплотняется поджатием втулки крышкой с клапаном для отвода пермеата.

Измерение концентрации пигмента в растворе осуществляется на фотоэлектрическом колориметре-нефелометре ФЭК-56М с точностью до $0,5 \cdot 10^{-9}$ кг пигмента/кг раствора.

В ходе проведения экспериментов исследовалось влияние рабочего давления и расхода исходного раствора на проницаемость и селективность мембранного модуля. Проницаемость оценивалась по объему V полученного пермеата в единицу времени, селективность – по концентрации пигмента C в полученном растворе. Рабочее давление изменялось в диапазоне 0,1...0,4 МПа, расход питающего раствора 0,035...0,11 л/с, что соответствует скорости движения разделяемого раствора в мембранном модуле 6,6...20,75 см/с. В результате проведенных исследований получены зависимости, представленные на рис. 3, из которых видно, что увеличение рабочего давления в модуле ведет к увеличению проницаемости модуля и уменьшению селективности. Увеличение расхода исходной смеси $V_{исх}$ приводит к снижению проницаемости и селективности

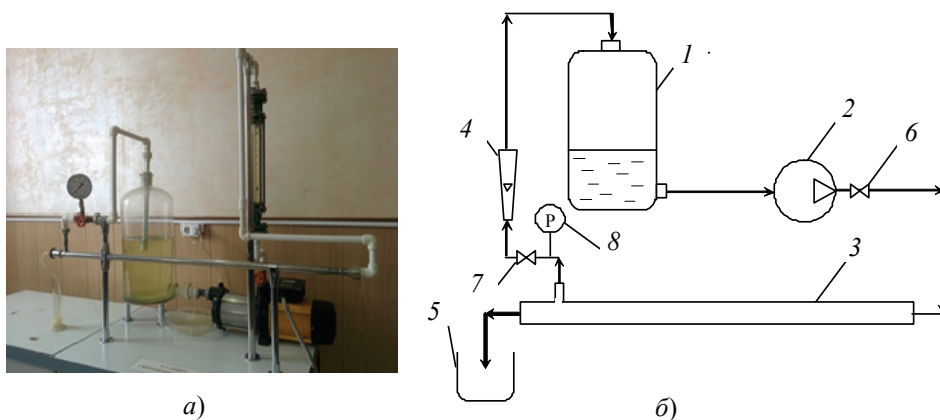


Рис. 2. Общий вид (а) и схема (б) экспериментальной установки

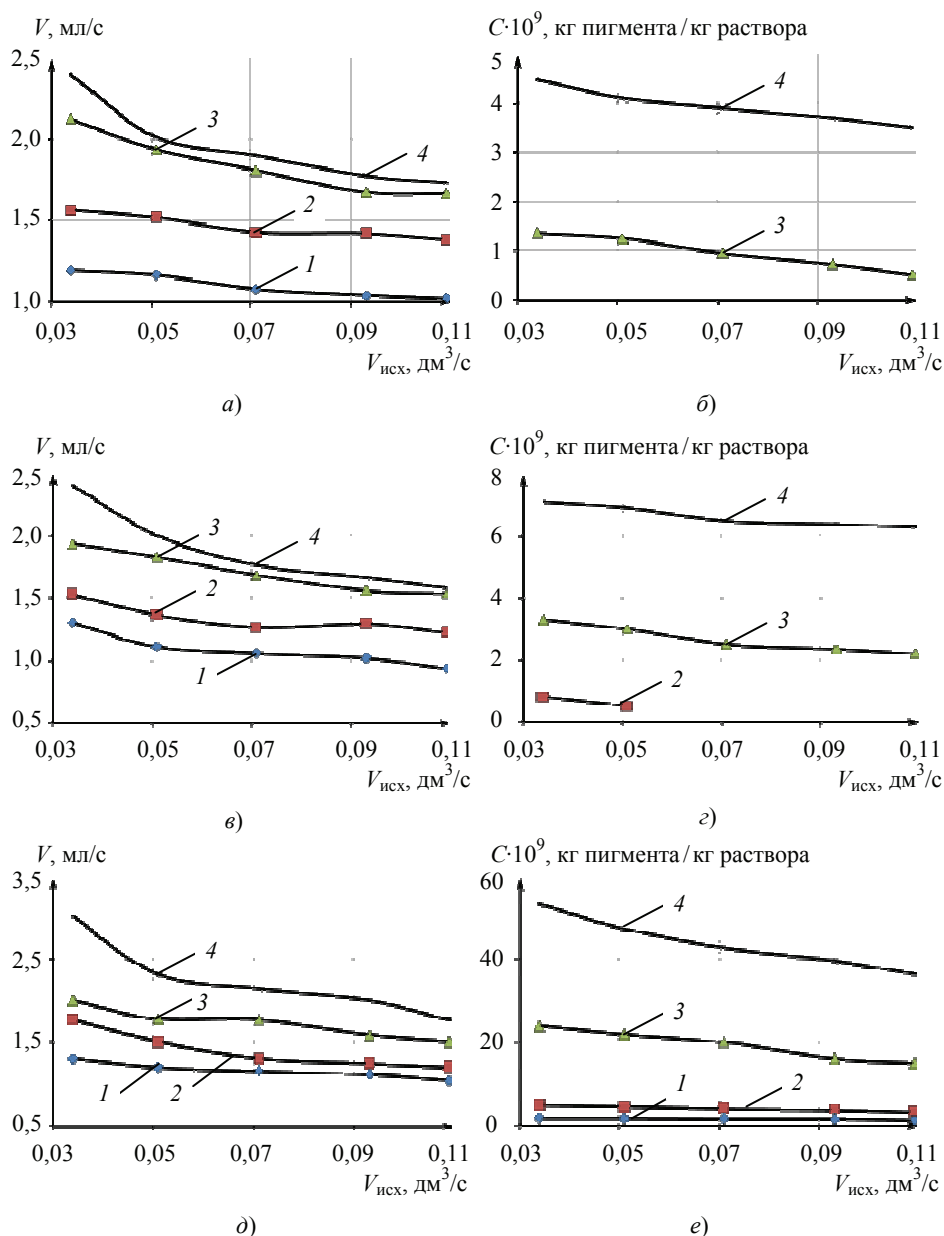


Рис. 3. Количество (а, в, д) и концентрация (б, г, е) пермеата в зависимости от расхода исходного раствора, содержащего пигменты оранжевый (а, б), желтый (в, г), алый (д, е) при различном рабочем давлении:
 1 – 0,1 МПа; 2 – 0,2 МПа; 3 – 0,3 МПа; 4 – 0,4 МПа

мембранного элемента. Исследуемая область скоростей раствора соответствует переходному и турбулентному режиму течения раствора. Точка перехода из одного режима в другой наблюдается при расходе раствора 0,078 л/с.

Разделение раствора с пигментом оранжевым при давлении 0,1 и 0,2 МПа возможно с получением пермеата, не содержащего пигмент (пигмента в пермеате не обнаружен, кривые селективности для данных давлений отсутствуют). Раствор с пигментом желтым возможно полностью очищать от пигмента при давлении

0,1 МПа. При проведении разделения водного раствора, содержащего пигмент алый, результат полного удаления пигмента достигнут не был. Таким образом, для проведения предварительной очистки при максимальной производительности и отсутствии пигментов в пермеате на ультрафильтрационной мембране типа БТУ 05/2 следует проводить процесс при следующих условиях:

- $P = 0,2$ МПа (пигмент оранжевый Ж);
- $P = 0,1$ МПа (пигмент желтый кроющий);
- для разделения раствора пигмента алого Ж исследуемая мембрана не подходит и следует использовать другой тип мембран.

Полученные результаты можно объяснить различием в размере молекул пигмента. Пигмент алый Ж среди исследуемых имеет самую низкую молекулярную массу (327,5 кг/кмоль), а следовательно, и размер молекулы, сопоставимый с размером пор ультрафильтрационной мембраны. Для получения положительного результата очистки промывных вод производства пигмента алого Ж следует использовать мембраны с меньшим размером пор – нанофильтрационные.

Список литературы

1. Исследование процесса очистки сточных вод на ПАО «Пигмент» / Т. А. Сухорукова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 129 – 134. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134
2. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях / О. А. Абоносимов [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655
3. Абоносимов, Д. О. Применение мембранных технологий в очистке сточных вод гальванопроизводств / Д. О. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 306 – 313.
4. Рудобашта, С. П. Экспериментальное исследование процесса мембранной дистилляции при опреснении морской воды / С. П. Рудобашта, С. Ю. Махмуд / Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 108 – 112.
5. ГОСТ 30813–2002 Вода и водоподготовка. Термины и определения. – Введ. 2004-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 22 с.
6. Исследование кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения слабоминерализованных растворов сточных вод / А. М. Акулиничев [и др.] // Вестн. Тамб. ун-та. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 3. – С. 941 – 943.

Ultrafiltration Separation of Washing Water for Production of Scarlet, Yellow and Orange Pigments

N. V. Alekseeva¹, V. Yu. Litnitsky¹, A. Ya. Kulikov²

*Department of Technological processes, devices and technosphere safety, TSTU (1);
Pigment PJSC (2), Tambov, Russia; alexejewa.nadja@gmail.com*

Keywords: water solution; concentration; permeate; pigment; module performance; separation; ultrafiltration.

Abstract: The analysis of the technology of production of pigment scarlet Zh, yellow tinctorial 2Z and orange Zh at Pigment PJSC was carried out. The task of reducing the amount of wastewater by cleaning the washing water of the process line

and returning the treated water to production is considered. Most of the wastewater from the production of pigments is washing water from the stage of washing the suspension. Washing waters contain inorganic water-soluble components and organic insoluble components.

Currently, inorganic components are removed from the washing water by means of inter-osmotic separation. There is a need for preliminary preparation of washing water before reverse osmosis separation to remove organic components. To this end, the process of ultrafiltration separation of aqueous solutions containing organic components – scarlet, yellow or orange pigments — was investigated. A laboratory installation was developed and experimental studies of the dependence of permeability and selectivity on membranes on the flow rate of the initial mixture and the operating pressure were carried out. Recommendations for the process of preliminary ultrafiltration separation are proposed.

References

1. Sukhorukova T.A., Borshchev V.Ya., Mikhaylova L.G., Mikhaylova Ye.G., Osipov N.N. [Study of the process of wastewater treatment at Pigment PJSC], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 129-134, doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.129-134 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependences and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at enterprises], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [Application of membrane technologies in sewage treatment of galvanic production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Rudobashta S.P., Makhmud S.Yu. [Experimental investigation of the membrane distillation process in the desalination of seawater], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2010, vol. 53, no. 1, pp. 108-112. (In Russ.)
5. GOST 30813–2002. *Voda i vodopodgotovka. Terminy i opredeleniya* [Water and water treatment. Terms and Definitions], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2002, 22 p. (In Russ.)
6. Akulinichev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Krasnova A.V. [Investigation of the kinetic coefficients of the reverse osmosis separation of low-mineralized wastewater solutions], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki* [Tambov University Bulletin. Series: Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, no. 3, pp. 941-943. (In Russ., abstract in Eng.)

Ultrafiltration-Trennung der Waschwässer bei der Herstellung von scharlachroten, gelben oder orangefarbenen Pigmenten

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Produktionstechnologie von scharlachroten Zh, gelben 2Z und orangefarbenen Zh Pigmenten auf PAG Pigment durchgeführt. Die Aufgabe, die Abwassermenge zu reduzieren, ist durch die Reinigung des Waschwassers der Prozesslinie und Rückführung des raffinierten Wassers in die

Produktion in Betracht gezogen. Das meiste Abwasser bei der Herstellung der Pigmente ist das Waschwasser aus der Stufe der Spülung der Suspension. Waschwässer enthalten in ihrer Zusammensetzung anorganische wasserlösliche Bestandteile und organische unlösliche Bestandteile. Derzeit werden anorganische Bestandteile mittels osmotischer Trennung aus dem Waschwasser entfernt. Es besteht die Notwendigkeit, das Waschwasser vor der umkehrosmotischen Trennung mit dem Ziel der Entfernung der organischen Bestandteile vorzubereiten. Zu diesem Zweck wurde der Prozess der Ultrafiltrationstrennung von wässrigen Lösungen mit organischen Bestandteilen – scharlachroten, gelben oder orangefarbenen Pigmenten - untersucht. Es ist eine Laboranlage entwickelt und experimentelle Untersuchungen zur Abhängigkeit der Permeabilität und Selektivität von Membranen von dem Verbrauch des Ausgangsgemisches und dem Betriebsdruck durchgeführt. Empfehlungen für das Verfahren der vorläufigen Ultrafiltrationstrennung sind vorgeschlagen.

Séparation par ultra filtration des eaux de lavage de la production des pigments pourpres, jaunes et orange

Résumé: Est effectuée une analyse de la technologie de production des pigments pourpres J, jaunes couvrants 23 et orange J à l'entreprise «Pigment». Est examinée la question de la réduction de la quantité des eaux usées par le traitement des eaux de lavage et le retour de l'eau purifiée dans la production. La plupart des eaux usées de la production des pigments sont des eaux de lavage de l'étape du lavage de la suspension. Les eaux de lavage contiennent dans leur composition des composants hydrosolubles inorganiques et des composants insolubles organiques. À l'heure actuelle, les composants inorganiques sont retirés de l'eau de lavage par la séparation par osmose inverse. Il est nécessaire de préparer les eaux de lavage avant la séparation par osmose inverse afin d'éliminer les composants organiques. Pour cela, le processus de séparation par ultrafiltration des solutions aqueuses contenant des composants organiques – pigments pourpres, jaunes et orange a été étudié. Est élaborée une installation de laboratoire; sont citées les études expérimentales de la fonction de la perméabilité et de la sélectivité. Des recommandations ont été formulées pour le processus la séparation par ultrafiltration.

Авторы: *Алексеева Надежда Вячеславовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Литницкий Вячеслав Юрьевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Куликов Алексей Яковлевич* – главный инженер по промышленной безопасности и охране окружающей среды ПАО «Пигмент», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЬ-ФОСФОРНЫХ СПЛАВОВ

Ю. А. Стекольников¹, Н. Ю. Стекольников¹,
В. В. Емцев², Э. М. Санников²

*Кафедра химии и биологии,
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет
им. И. А. Бунина», (1), г. Елец, Липецкая обл., Россия; chemic57@mail.ru;
кафедра эксплуатации транспортных и технологических машин,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет
имени императора Петра I» (2), г. Воронеж, Россия*

Ключевые слова: гальванопокрытия; оптимизация состава трехкомпонентного сплава; ремонт деталей; сернокислый электролит; сплавы Fe – Ni, Fe–Ni–P.

Аннотация: Направленное формирование покрытий Fe – Ni и Fe – Ni – P на восстанавливаемой поверхности ремонтируемых деталей позволит получать поверхностные слои с высокими физико-механическими свойствами при осаждении на постоянном токе в сернокислом электролите. Решающее влияние на функциональные свойства покрытий оказывает концентрация фосфора в сплаве. Применение аскорбиновой кислоты позволило получить требуемый химический состав. Микротвердость покрытия Fe – Ni – P достигает величины 8,2 ГПа, что позволяет рекомендовать их в качестве ремонтных покрытий при восстановлении изношенных деталей в размер сельскохозяйственных машин.

Введение

В настоящее время гальванические покрытия широко используются при восстановлении в размер изношенных деталей сельскохозяйственных машин, однако, им не всегда возможно найти замену. При этом толщина наносимого металла может варьироваться от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Технологии осаждения позволяют наносить покрытия с заранее заданными физико-механическими свойствами, используя стационарные и нестационарные методы осаждения. Гальваническое осаждение железа и сплавов на его основе Fe – Ni и Fe–Ni–P дает возможность быстро и недорого восстанавливать дефектные места изношенных деталей сельскохозяйственных машин, при необходимости с последующей механической или слесарной обработкой в целях восстановления посадок сопряженных деталей, устранения овальностей, конусности и обеспечения требуемой чистоты обработки поверхности [1, 2].

Постановка задачи

При разработке процессов электроосаждения двух- и трехкомпонентных сплавов возникают многофакторные задачи, которые можно решать, используя статистический метод планирования эксперимента, разработанный Боксом и Уилсоном [3 – 6].

Теоретические предпосылки не позволяют заранее определять условия осаждения сплавов заданного состава. Подобные задачи решают эмпирическим путем на основе экспериментальных работ, изучая зависимость состава покрытий от условий осаждения. На основе статистических методов, проводится количественная оценка по влиянию условий осаждения и составов электролитов на составы сплавов, что позволяет минимизировать объем экспериментальных исследований.

Методы математической статистики в гальванотехнике [7] обычно применяются для решения следующих задач:

1. Создание математической модели связи условий электроосаждения с содержанием компонентов в покрытиях.
2. Оптимизация в сплаве максимального содержания одного из компонентов.

Результаты и обсуждения

Для решения первой задачи получают интерполяционную формулу связи основных факторов электроосаждения с составом железо-никельного покрытия.

Для электроосаждения сплава выбран электролит, содержащий с вариацией следующие компоненты, г/л: серную кислоту H_2SO_4 ($\text{pH} = 1,0 - 0,6$) – 350...400; сернокислое железо $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 150...350; никель сернокислый NiSO_4 – 10...75; аскорбиновую кислоту $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ – 3...7. X_1 – плотность тока, $\text{A}/\text{дм}^2$; X_2 – pH электролита; X_3 , X_4 – концентрации сернокислого железа и аскорбиновой кислоты в электролите, г/л; Использован подход, аналогичный представленному в работе [7]. Параметром оптимизации являлось процентное содержание никеля в осадке Y . Температура электролита 40...50 С. На основе предварительных опытов выбраны интервалы варьирования факторов таким образом, чтобы значения параметров оптимизации находились в области 10 – 30 % никеля. Условия опытов, матрица планирования и результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Каждое значение параметра оптимизации $\bar{Y}$ является средним из трех параллельных определений.

Из экспериментальных данных найдены следующие значения коэффициентов регрессии и ошибок в их определении:

$$\begin{array}{lll} b_0 = 77,370 & b_{12} = 0,225 & s^2 \{ \bar{Y} \} = 0,72 \\ b_1 = 6,587 & b_{13} = 1,850 & s \{ b \} = 0,22 \\ b_2 = 0,438 & b_{14} = 0,075 & \\ b_3 = -6,760 & b_{23} = 0,725 & \\ b_4 = 0,938 & b_{24} = 0,075 & \\ & b_{34} = 0,425 & \end{array}$$

Расчеты доверительных интервалов с помощью t -критериев показали, что для уровня значимости 0,02 значимыми оценками оказались коэффициенты регрессии основных эффектов и эффектов взаимодействия концентрации сернокислого железа в электролите со всеми факторами, находящиеся в пределах $\pm 0,25$.

Уравнение регрессии имеет вид

$$Y = 50,4 + 6,6X_1 + 0,45X_2 - 12,8X_3 + 0,59X_4 + 1,79X_1X_3 + 0,73X_2X_3 + 0,34X_3X_4 \quad (1)$$

Уравнение (1) адекватно представляет экспериментальные данные, величина F -критерия равна 0,9.

Таблица 1

Матрица планирования и результаты экспериментов
при осаждении Fe–Ni сплава

Факторы	Кодированные значения					
	X_1	X_2	X_3	X_4	$\bar{Y}$	
Основной уровень Интервал варьирования Верхний уровень Нижний уровень	–					
Опыты:						
1	–1	–1	–1	–1	79,4	
2		+1	+1		61,1	
3			–1		78,7	
4		–1	+1		60,5	
5	+1		–1		88,4	
6			+1		76,0	
7	+1	–1	88,0			
8		+1	79,4			
9	–1	–1	–1	+1	79,9	
10		+1	+1		64,6	
11			–1		79,6	
12		–1	+1		62,5	
13	+1		–1		90,0	
14			+1		78,8	
15	+1	–1	89,1			
16		+1	82,0			

В таблице 2 приведены значения процентного содержания никеля в осадке, рассчитанные по уравнению регрессии и полученные экспериментально. Проверка по t -критерию показала, что эти результаты значимо отличаются.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность предварительного расчета состава сплава.

Одним из вариантов использования выведенной формулы является расчет концентрации сернокислого железа в электролите, необходимой для получения электролитического осадка требуемого состава при определенных значениях плотности тока, кислотности электролита и концентрации аскорбиновой кислоты, обеспечивающих минимальное внутреннее напряжение осадка [7].

Таблица 2

Значения процентного содержания никеля в осадке

Кодированные значения факторов				Параметр оптимизации	
X_1	X_2	X_3	X_4	$\bar{Y}_{\text{расч}}$	$\bar{Y}_{\text{экс}}$
+1,0	0	+0,42	–0,50	31,3	31,7
–0,78	+0,75	+0,14	–0,50	21,0	22,5
–1,0	–1,0	–0,90	–1,0	28,5	27,7
+1,0	–1,0	+0,30	–1,0	31,0	29,6

Во второй части работы оптимизировались условия катодного процесса при электроосаждении сплава Fe – Ni – P, обеспечивающие введение в сплав максимально возможного количества фосфора при заданном составе электролита.

Электроосаждение проводилось в ультразвуковом поле частотой 22 Гц. В качестве анода использовалась сталь 3. Анализ состава осадков проводился фотокolorиметрически. Состав электролита, г/л: серная кислота H₂SO₄ (рН = 1,0 – 0,6) – 350...400; сернокислое железо FeSO₄·7H₂O – 150...350; никель сернокислый NiSO₄ – 10...75; гипофосфит натрия Na(PH₂O₂) – 5...15; аскорбиновая кислота C₆H₈O₆ – 3...7.

В качестве независимых переменных выбраны следующие факторы: X₁ – температура электролита, °С; X₂ – плотность тока, А /дм²; X₃ – рН электролита. Параметром оптимизации $\bar{Y}$ являлось содержание фосфора в покрытиях. Соответствующие экспериментальные данные представлены в табл. 3.

Ниже приведены величины коэффициентов регрессии и ошибок в их определении:

$$b_0 = 50,370$$

$$b_1 = 6,587$$

$$b_2 = 0,438$$

$$b_3 = -6,760$$

$$b_{12} = 0,225$$

$$b_{13} = 1,850$$

$$b_{23} = 0,725$$

$$s^2 \{ \bar{Y} \} = 0,4375$$

$$s \{ b \} = 0,234$$

Найденные значения коэффициентов регрессии позволяют предположить, что в условиях эксперимента наибольшее влияние на содержание фосфора в осадках оказывает величина плотности тока. При этом увеличение плотности тока способствует увеличению содержания фосфора в покрытиях. Некоторое влияние на состав осадков оказывают также изменения температуры, рН и величины эффекта взаимодействия температуры и рН электролита (b₁₃) [5].

Уравнение регрессии

$$Y = 3,5625 + 0,7125X_1 - 1,3875X_2 + 0,5375X_3.$$

Таблица 3

Условия, матрица планирования и результаты опытов
при осаждении сплава Fe–Ni–P

Факторы	Кодированные значения факторов			$\bar{Y}$
	X ₁	X ₂	X ₃	
Основной уровень	50	20	2,3	–
Интервал варьирования	10	10	0,2	
Верхний уровень	60	30	2,5	
Нижний уровень	40	10	2,1	
Опыты:				
1	1	–1	–1	4,0
2		+1	+1	1,2
3	–1	–1	–1	1,4
4			+1	4,8
5	+1	–1	–1	4,4
6			+1	6,6
7		+1	–1	2,3
8			+1	3,8

Таблица 4

Расчет крутого восхождения сплавов Fe – Ni – P

Факторы	X_1	X_2	X_3	$\bar{Y}$
X на интервал варьирования	7,125	–13,875	0,1075	–
Изменение X_i при изменении X_1 на 3,5	3,5	–6,815	0,053	
Округление	3,5	–5,0	0,1	
Опыты:				
1	63,5	15	2,4	5,3
2	70,5	10	2,5	9,6
3	–	5	2,6	Качественное покрытие

Расчет движения по градиенту показан в табл. 4. Экспериментально проведено три опыта крутого восхождения. Результаты первых двух опытов дали значения $\bar{Y}$, равные 5,3 и 9,6 %, что примерно соответствуют максимальному содержанию фосфора в осадках, полученных в первой серии опытов.

Из данных (см. табл. 4) следует, что для решения задачи можно применять крутое восхождение.

На основе полного факторного эксперимента опыта крутого восхождения с учетом априорной информации можно оптимизировать концентрацию фосфора в сплаве на уровне 5,3 – 9,6 %.

На основании полученных данных рекомендованы следующие технологические условия для содержания сплава Fe–Ni–P с повышенным содержанием фосфора из сернокислого электролита: $t = 47$ °C, pH = 0,9, при $D_k = 10$ А/дм², P = 5,3 %; при $D_k = 10$ А/дм², P = 9,6 %.

При увеличении содержания фосфора с 5,3 до 9,6 % микротвердость сплава Fe–Ni–P возрастает с 5,9 до 8,2 ГПа (измерения проведены на приборе ПМТ-3), что позволяет использовать покрытия сплавами Fe – Ni – P в технологии ремонта деталей сельскохозяйственных машин широкой номенклатуры.

Выводы

Использование сернокислого электролита с добавками аскорбиновой кислоты при варьировании плотности катодного постоянного тока ($t = 47$ °C) позволяет получать покрытия Fe – Ni – P с концентрацией фосфора 5,3 – 9,6 % с высокой микротвердостью, что позволяет рекомендовать их к использованию при восстановительном ремонте деталей сельскохозяйственных машин.

Список литературы

1. Применение электроосажденного Fe–Ni–P покрытия для восстановления деталей сельскохозяйственных машин / В. К. Астанин [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3 (28). – С. 295 – 300.
2. Восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники гальваническими покрытиями / Н. Ю. Стекольников [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 133. – С. 173 – 185. doi: 10.21515/1990-4665-133-016
3. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 280 с.

4. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М. : Статистика, 1974. – 192 с.
5. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
6. Рузинов, Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов / Л. П. Рузинов. – М. : Химия, 1972. – 200 с.
7. Оптимизация технологических процессов в гальванотехнике / А. М. Гинберг [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 128 с.
-

Rationale for Electrodeposition Iron-Nickel-Phosphorus Alloys

Yu. A. Stekolnikov¹, N. Yu. Stekolnikova¹,
V. V. Yemtsev², E. M. Sannikov²

*Department of Chemistry and Biology, I. A. Bunin Eleys State University (1),
Eleys, Lipetsk region, Russia; chemic57@mail.ru;*

*Department of Operation of Transport and Process Machines
Emperor Peter I Voronezh State Agrarian University (2), Voronezh, Russia*

Keywords: electroplating; optimization of a three-component alloy composition; repair of parts; sulfate electrolyte; Fe-Ni, Fe-Ni-R alloys.

Abstract: Guided formation of Fe-Ni and Fe-Ni-P coatings on the restored surface of the parts being repaired enables to obtain surface layers with high physical and mechanical properties during the deposition on direct current in the sulfate electrolyte. The phosphorus concentration in the alloy has a decisive influence on the functional properties of the coatings. The use of ascorbic acid made it possible to obtain the required chemical composition. The microhardness of the Fe-Ni-P coating reached a value of 8.2 GPa, which made it possible to recommend them as repair coatings when restoring worn parts to the size of agricultural machines.

References

1. Astanin V.K., Pukhov Ye.V., Stekol'nikov Yu.A., Yemtsev V.V. [The use of electrodeposited Fe–Ni–P coating for the restoration of parts of agricultural machines], *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2018, no. 3 (28), pp. 295-300. (In Russ.)
2. Stekol'nikova N.Yu., Stekol'nikov Yu.A., Astanin V.K., Yemtsev V.V., Sannikov E.M. [Restoration of worn parts of agricultural equipment by electroplated coatings], *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2017, no. 133, pp. 173-185, doi: 10.21515/1990-4665-133-016 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Adler Yu.P., Markova Ye.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning of an experiment when searching for optimal conditions], Moscow: Nauka, 1976, 280 p. (In Russ.)
4. Voznesenskiy V.A. *Statisticheskiye metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical Methods for Experiment Planning in technical and economic research], Moscow: Statistika, 1974, 192 p. (In Russ.)

5. Ivobotenko B.A., Il'inskiy N.F., Kopylov I.P. *Planirovaniye eksperimenta v elektromekhanike* [Planning of an experiment in electromechanics], Moscow: Energiya, 1975, 184 p. (In Russ.)

6. Ruzinov L.P. *Statisticheskiye metody optimizatsii khimicheskikh protsessov* [Statistical methods for optimization of chemical processes], Moscow: Khimiya, 1972, 200 p. (In Russ.)

7. Ginberg A.M., Granovskiy Yu.V., Fedotova N.Ya., Kalmutskiy V.S. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v gal'vanotekhnike* [Optimization of technological processes in electroplating], Moscow: Mashinostroyeniye, 1972, 128 p. (In Russ.)

Begründung der Prozesse der elektrochemischen Abscheidung Eisen-Nickel-Phosphor-Legierungen

Zusammenfassung: Die richtungsgebundene Schichtbildung von Fe-Ni und Fe-Ni-P auf der wiederherstellbaren Oberfläche der zu reparierenden Teile ermöglicht es, Oberflächenschichten mit hohen physikalischen und mechanischen Eigenschaften bei der Abscheidung bei Gleichstrom im schwefelsauren Zinnelektrolyt zu erhalten. Die Phosphorkonzentration in der Legierung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionseigenschaften der Beschichtungen. Die Verwendung von Ascorbinsäure ermöglichte es, die erforderliche chemische Zusammensetzung zu erhalten. Die Mikrohärtigkeit der Fe-Ni-P-Beschichtung erreicht einen Wert von 8,2 GPa, was es ermöglicht, sie als Reparaturbeschichtung bei der Wiederherstellung verschlissener Teile größtmäßig von Landmaschinen zu empfehlen.

Justification des procédés d'électrodéposition des alliages de fer-nickel-phosphore

Résumé: La formation directionnelle des revêtements Fe-Ni et Fe-Ni-P sur la surface restaurée des pièces réparées permettra de recevoir des couches superficielles avec des propriétés physico-mécaniques élevées lors du dépôt à courant continu dans l'électrolyte au sulfate. La concentration de phosphore dans l'alliage a un effet décisif sur les propriétés fonctionnelles des revêtements. L'utilisation de l'acide ascorbique a permis d'obtenir la composition chimique requise. La micro-dureté du revêtement Fe-Ni-P atteint une valeur de 8,2 KPa, ce qui permet de les recommander comme revêtements de réparation lors de la restauration des pièces usées dans les machines agricoles.

Авторы: *Стекольников Юрий Александрович* – кандидат химических наук, профессор кафедры химии и биологии; *Стекольников Наталья Юрьевна* – аспирант кафедры химии и биологии, ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина», г. Елец, Липецкая обл., Россия; *Емцев Виталий Валерьевич* – учебный мастер кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин; *Санников Эдуард Михайлович* – аспирант кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Россия.

Рецензент: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОЯВЛЕНИЯ И СОСТАВА ВЫСОЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

А. В. Рухов, А. А. Дегтярев, А. В. Тришина, А. В. Рухов

*Кафедра «Химия и химические технологии»;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; htov@mail.tambov.ru*

Ключевые слова: высолы; катализатор; кислоты; коагуляция; оптическая микроскопия; суспензия; цементно-стружечные плиты.

Аннотация: Предложен метод повышения качества цементно-стружечных плит, позволяющий идентифицировать и устранить образующиеся на них высолы, ухудшающие их декоративные качества.

Введение

Непрерывное развитие строительной области диктует потребность в современных и качественных материалах, которые должны отвечать требованиям технологичности [1], отраслевой применимости [2], экологической безопасности [3], эстетичности. Последний параметр нередко может играть ключевую роль при реализации строительных проектов. Рассмотрим данный аспект на примере цементно-стружечных плит (ЦСП).

Цементно-стружечные плиты, выпускаемые как готовый продукт, при эксплуатации на открытом воздухе, могут покрываться белым налетом, ухудшающим их эстетические качества [4]. Цель работы – установление состава данного налета, механизма появления и путей его устранения.

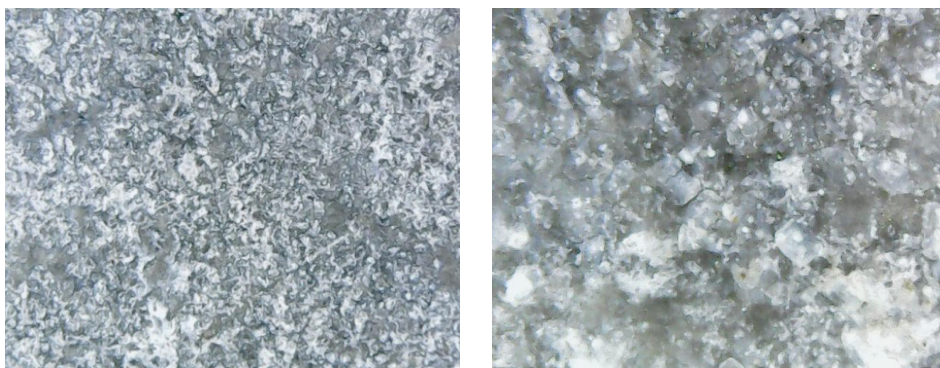
Результаты визуальных исследований

В качестве объекта исследования взят лист ЦСП размером 395×280 мм, окрашенный в объеме (железным шламом) и покрытый акриловым лаком FG 447, подвергавшийся воздействию атмосферной влаги в двух месяцев на испытательном полигоне.

Поверхность листа была неравномерно покрыта белым налетом. Неравномерность, вероятно, обусловлена установкой на лист элементов декора. При проведении пальцем налет легко стирался, оставляя следы на руках. Под элементами декора белый налет был более однородный и плотный. Обзор поверхности методом оптической микроскопии при разных значениях увеличения показал, что поверхность ЦСП покрыта белыми кристаллами, преимущественно правильной формы (рис. 1), которые равномерно распределены на поверхности серо-синеватого цвета.

Результаты анализа

При выявлении состава белого налета использовали приемы качественного химического анализа. С помощью скальпеля с поверхности собрали образец белого порошка в количестве порядка 150 мг, который разбавили 5-6 мл воды. Пробирку



а)

б)

Рис. 1. Общий вид поверхности ЦСП со следами белого налета при увеличении $\times 50$ (а) и $\times 500$ (б)

плотно закрыли резиновой пробкой и в течение 1 ч встряхивали с использованием лабораторного шейкера. Затем образец отстаивался в течение 30 мин. Осмотр показал, что исследуемый образец в своем составе содержит вещество, нерастворимое в воде при комнатной температуре.

Образец повторно перемешали до получения равномерной суспензии. Из пробирки отлили 0,5-1 мл суспензии в чашку Петри и добавили 1-2 капли 1Н соляной кислоты. Наблюдалась реакция с выделением газа. Соответственно, в результате контакта белого порошка с кислотой образовалось газообразное вещество или неустойчивое соединение, разлагающееся с выделением газа. Можно полагать, что исследуемый порошок является солью неустойчивой кислоты, например H_2CO_3 , H_2SO_3 , HNO_2 . Так как получаемый газ не имел характерного запаха, сделан вывод, что суспензия содержит нерастворимые карбонаты металлов.

Установление катиона проводилось по следующей методике:

- фильтрация через бумажный фильтр (красная лента);
- промывка получившегося осадка водой;
- смешение осадка и фильтрата с соляной кислотой.

Установлено, что только осадок вступает в реакцию с выделением газа. Таким образом, сделан вывод, что это нерастворимая соль угольной кислоты. Известны, как минимум 12 катионов в составе карбонатов, дающие нерастворимые в воде соли: Ba^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Ag^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} . В соответствии с составом портландцемента [5], наиболее вероятно присутствие катионов Ca^{2+} , Fe^{2+} .

Для исключения из рассмотрения ионов Fe^{2+} к продукту реакции суспензии с соляной кислотой добавляли 0,1 мл концентрированной азотной кислоты. Полученное вещество помещали в чашку Петри и оставляли на 3 ч, накрыв листом фильтровальной бумаги. После выдержки к раствору добавляли 1-2 капли тиоцианата калия. Визуальных изменений с раствором не происходило, что говорит об отсутствии ионов Fe^{2+} .

Таким образом установлено, что белый налет на поверхности ЦСП является высолами карбоната кальция CaCO_3 . Полученный результат исследования поверхности позволяет сделать вывод, что наблюдается специфический вид углекислой коррозии цементного камня, которая обусловлена присутствием в ЦСП жидкого натриевого стекла и смешанного оксида железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ в качестве красителя.

Локализация места образования карбоната кальция

Проведены дополнительные исследования для выяснения, протекает ли процесс углекислотной коррозии только на поверхности или также в объеме ЦСП. Небольшой участок ЦСП (15×15 мм) обработали разбавленной азотной кислотой, промыли водой до щелочной реакции поверхности ($\text{pH} \approx 8,5$) и высушили при температуре 80 °С в течение 3 ч. При помощи методов оптической микроскопии получили изображения обработанной поверхности (рис. 2).

После обработки поверхность приняла стеклоподобный вид, свидетельствующий о коагуляции и отверждении жидкого стекла (образование кремневой кислоты) во внешнем слое в присутствии ионов водорода. Смачивание обработанной поверхности ЦСП водой показало повторное появление кристаллов карбоната кальция. Изображение повторно выделившегося CaCO_3 , полученное методом оптической микроскопии при увеличении $\times 500$, представлено на рис. 3.

Далее на участке, обработанном кислотой, при помощи скальпеля сделали клиновидный надрез глубиной 2 мм. Внешний вид среза был чистым, не имеющим вкраплений. После помещения образца во влажную среду на поверхности среза появился белый налет. На рисунке 4 показаны изображения срезов, полученные методом оптической микроскопии.

Из представленных данных можно сделать вывод, что карбонат кальция не диффундирует из объема на поверхность, а образуется непосредственно на ней. При этом в порах ЦСП присутствует электролит с растворенными ионами кальция и кислотного остатка угольной кислоты, которые, после обработки азотной кислотой и промывки, мигрируют на поверхность и под слоем затвердевшего жидкого стекла вновь формируют карбонат кальция.

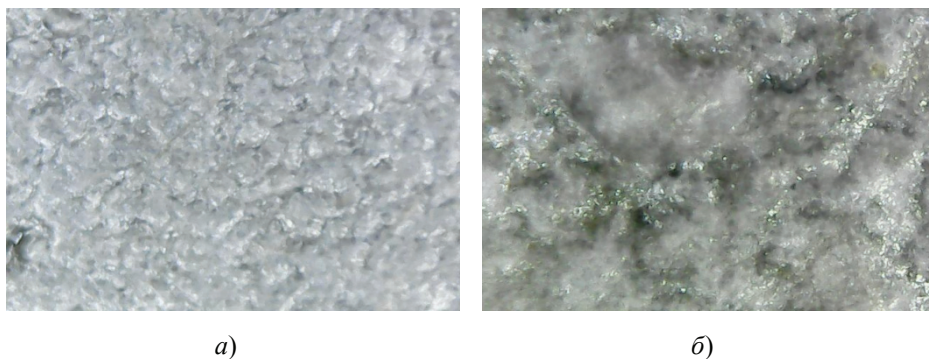


Рис. 2. Изображения поверхности образца ЦСП, обработанного азотной кислотой, при увеличении $\times 50$ (а) и $\times 500$ (б)

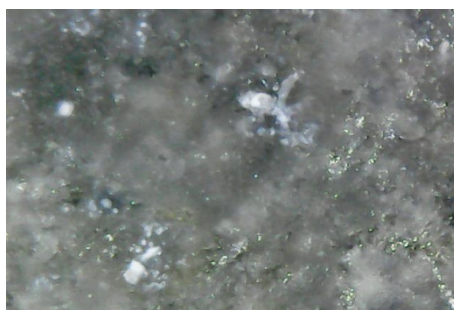


Рис. 3. Изображение поверхности ЦСП, обработанной азотной кислотой и помещенной во влажную среду

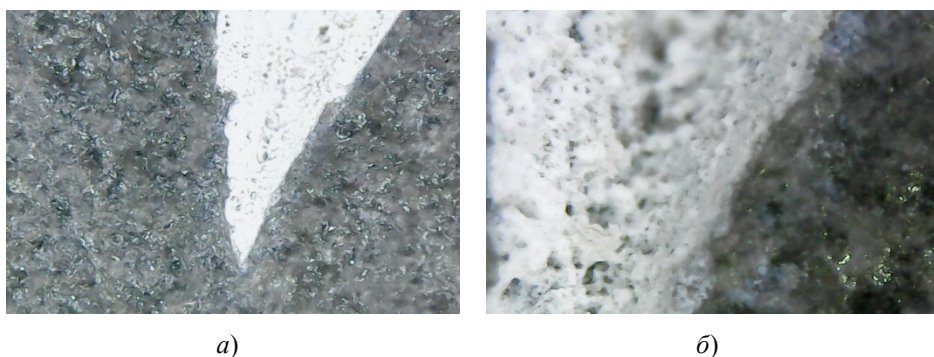


Рис. 4. Изображения среза образца ЦСП при увеличении $\times 50$ (а) и $\times 500$ (б)

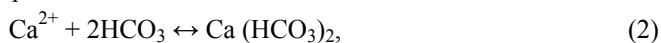
Определение основных физико-химических механизмов формирования карбоната кальция на поверхности ЦСП

Для образования карбоната кальция необходимо выполнение условия присутствия ионов кальция и карбонат-ионов или растворенного углекислого газа в растворе. Данные ионы могут быть получены как в результате одной реакции, например, взаимодействия гидроксида кальция с углекислым газом в присутствии воды, так и в результате независимых химических превращений. Анализ литературных источников позволил выделить следующие основные механизмы получения карбоната кальция.

1. В результате добавления в воду щелочного раствора кремниевой кислоты (в нашем случае натриевого жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$) образуются свободные гидроксил-ионы, способные реагировать с углекислым газом атмосферы [6]:



Гидрокарбонат-ион в результате реакции с катионом кальция может привести к образованию гидрокарбоната кальция



который в свою очередь при уменьшении влажности или повышении pH поверхности ЦСП диссоциирует до карбоната кальция, согласно реакции



2. Жидкое стекло, имеющее выраженные щелочные свойства, может непосредственно вступать в химическую реакцию с углекислым газом в присутствии воды [7]

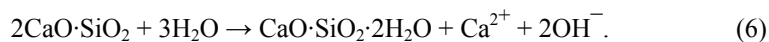


Таким образом, при наличии на поверхности неотвержденного жидкого стекла возможно формирование карбонат-ионов.

3. Образование ионов кальция в результате диссоциации портландита – выщелачивание компонента цементного камня в результате взаимодействия с водой, которое протекает в соответствии с химической реакцией [8]

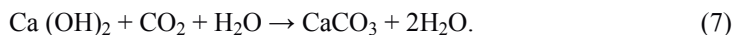


4. Источником ионов кальция также может являться каталитическая реакция гидратации белита $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, присутствующего в портландцементе в количестве порядка 15 – 30 % [5]



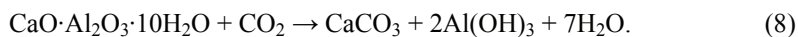
Катализатором в данной реакции выступают железный шлак и жидкое стекло [9]. Тот факт, что в представленном образце ЦСП помимо жидкого стекла содержится краситель на основе оксида железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, делает данный механизм весьма вероятным. Также возможно, что при нарушении технологии производства, характеризуемого уменьшением срока выдержки ЦСП до сушки, из листа удаляется вода, которая должна была пойти на гидратацию белита [5]. В результате $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ вступает в реакцию с углекислым газом и образуется CaCO_3 .

5. Также может наблюдаться классическая углекислая и углекислотная коррозия цементного камня, которая протекает без участия функциональных добавок ЦСП. Углекислая коррозия протекает в соответствии с уравнением реакции



Углекислотная коррозия протекает в соответствии с уравнением (2), то есть продуктом реакции является гидрокарбонат кальция [8]. Присутствие Na_2SO_4 и K_2SO_4 ускоряет углекислотную коррозию [10].

6. Образование на поверхности ЦСП карбоната кальция может быть результатом реакции углекислого газа с компонентами клинкера портландцемента, например



Данный процесс является маловероятным в виду высокой реакционной способности алюмината кальция, что приводит к резкому уменьшению его концентрации при затвердении цементной-стружечной смеси [11].

Выработка рекомендаций и определение направлений работ по уменьшению или исключению карбонатных загрязнений на поверхности ЦСП

Вопросами углекислой и углекислотной коррозий занимаются многие научные коллективы на протяжении нескольких столетий и однозначного универсального решения на настоящий момент не найдено. Это обусловлено сложностью и индивидуальной особенностью протекающих процессов, многообразием и нестабильностью состава клинкера. Поэтому для получения практического результата требуется проведение полноценного научного исследования для каждого случая [12]. Несмотря на вышесказанное, можно дать классификацию направлений решения задачи уменьшения или даже исключения образования карбоната кальция на поверхности ЦСП:

1. Увеличение продолжительности технологических операций выдержки готовой плиты для полного участия в процессе формирования цементного камня всех компонентов клинкера.

2. Исключение процессов образования CaCO_3 по механизмам, представленным в химических уравнениях (6) и (8).

3. Использование ускорителей формирования цементного камня (CaCl_2 , NaCl , FeCl_3 , AlCl_3 , K_2CO_3 , Na_2CO_3 , NaF , триэтаноламина, патоки, лигносульфанатов) для исключения процессов образования CaCO_3 по механизмам, представленным в химических уравнениях (6) и (8) [13].

4. Использование ускорителей твердения жидкого стекла (Na_2SiF_6 , сложных эфиров (например, глицеринтриацетата), тетрафурфурилоксилана, лигносульфанатов) для исключения процессов образования CaCO_3 , согласно химическим уравнениям (1) – (5) [14].

5. Применение защитных покрытий и пропиток (полимочевины, поливинилацетата, поливинилового спирта, полиуретана, полиакрилатов, алкидных смол

и т.д.) для предотвращения или затруднения доступа к поверхности углекислого газа и воды.

6. Уменьшение размера и количества пор цементного камня [14] для предотвращения диффузии ионов кальция к поверхности ЦСП.

Список литературы

1. Смирнова, Г. Е. Техническое регулирование в области строительных материалов / Г. Е. Смирнова, Н. С. Найденова, Х. А. Невмятуллина // Экономика строительства. – 2017. – № 2 (44). – С. 68 – 75.
2. Наумов, Ю. В. Подтверждение соответствия огнезащищенных строительных материалов требованиям пожарной безопасности / Ю. В. Наумов // Пожарная безопасность. – 2015. – № 1. – С. 80 – 83.
3. Стрельцов, С. В. Анализ требований систем экологической сертификации объектов строительства к строительным материалам / С. В. Стрельцов, Т. В. Носачева, А. Н. Сапрыкина // Материалы Национ. рос. конф. «Современные прикладные исследования», 19 – 21 апреля 2017 г., Шахты. – Шахты, 2017. – С. 186 – 189.
4. Волынский, В. Н. Технология древесных плит и композитных материалов : учеб.-справ. пособие / В. Н. Волынский. – СПб. : Лань, 2010. – 336 с.
5. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор. – М. : Мир, 1996. – 560 с.
6. Effect of Sal Perlalum-Water Glass on the Hydration Behavior of Alkali-Activated Slag Cements / W. Zhang [et al.] // Journal of Building Materials. – 2016. – No. 19 (5). – P. 803 – 809 and 831. doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.05.003.
7. ^{17}O NMR Evidence of Free Ionic Clusters $\text{Mn}^{2+} \text{CO}_3^{2-}$ in Silicate Glasses: Precursors for Carbonate-Silicate Liquids Immiscibility / Y. Morizet [et al.] // American Mineralogist. – 2017. – Vol. 102, No. 7. – P. 1561 – 1564. doi: 10.2138/am-2017-6133.
8. Шмитько, Е. И. Химия цемента и вяжущих веществ : учеб. пособие / Е. И. Шмитько, А. В. Крылова, В. В. Шаталова. – Воронеж : [б.и.], 2005. – 164 с.
9. Фиговский, О. Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокompозиционных материалов [Электронный ресурс] / О. Л. Фиговский, П. Г. Кудрявцев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 2. Режим доступа : http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_125_Figovsky.pdf_2448.pdf (дата обращения : 17.08.2018).
10. Рузавин, А. А. Применение метода ускоренной карбонизации в технологии бетонного производства / А. А. Рузавин // Вестн. Южно-Уральского гос. ун-та. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 72 – 75. doi: 10.14529/build170311.
11. Ярцев, В. П. Влияние зернового состава наполнителей из асбестоцементных отходов на физико-механические характеристики цементно-песчаного бетона / В. П. Ярцев, Е. И. Репина, В. В. Шеверда // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 165 – 171.
12. Yartsev, V. P. Durability and Strength Capacity of Asbestos-Cement Tubes / V. P. Yartsev, O. N. Kozhukhina, E. U. Belyakin // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 4. – С. 638 – 643.
13. The Role of Chemical Admixtures in the Formation of the Structure of cement Stone / V. Sopov [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 116, No. 01018. – 10 p. doi: 10.1051/matecconf/201711601018.
14. Термогравиметрические исследования фазовых превращений в цементных композициях на механоактивированном растворе силиката натрия / С. В. Федосов [и др.] // Вестник МГСУ. – 2014. – № 1. – С. 111 – 118.
15. Effect of Nonionic Surfactants on the State of Water in Cement Systems (by NMR Relaxation Data). 2. A Model of the Pore Space / V. N. Izmailova [et al.] // Коллоидный журнал. – 1998. – Т. 60, № 1. – С. 17 – 22.

A Study of the Mechanism of Origin and Composition of Efflorescence on the Surface of Cement Bonded Particle Boards

A. V. Rukhov, A. A. Degtyarev, A. V. Trishina, A. V. Rukhov

*Department of Chemistry and Chemical Technologies;
TSTU, Tambov, Russia; htov@mail.tambov.ru*

Keywords: efflorescence; catalyst; acids; coagulation; optical microscopy; suspension; cement bonded particle boards.

Abstract: A method to improve the quality of cement bonded particle boards is proposed. It allows identifying and eliminating the efflorescence deteriorating their decorative qualities.

References

1. Smirnova G.Ye., Naydenova N.S., Nevmyatullina Kh.A. [Technical regulation in the field of building materials], *Ekonomika stroitel'stva* [Economics of construction], 2017, no. 2 (44), pp. 68-75. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Naumov Yu. V. [Confirmation of the correspondence of fire-protected building materials to fire safety requirements], *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety], 2015, no. 1, pp. 80-83.
3. Strel'tsov S.V., Nosacheva T.V., Saprykina A.N. *Materialy Natsional'noy rossiyskoy konferentsii "Sovremennyye prikladnyye issledovaniya"* [Materials of the National Russian Conference "Modern Applied Research"], 19-21 April, 2017, g. Shakhty, 2017, pp. 186-189. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Volynskiy V.N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitnykh materialov : uchebno-spravochnoye posobiye* [Technology of wood-based panels and composite materials: a manual], St. Petersburg: Lan', 2010, 336 p.
5. Teylor X. *Khimiya tsementa* [Chemistry of cement], Moscow: Mir, 1996, 560 p.
6. Zhang W., Yang C., Yang K., Pan Q. [Effect of sal perlalum-water glass on the hydration behavior of alkali-activated slag cements], *Journal of Building Materials*, no. 19 (5), pp. 803-809 and 831, doi: 10.3969 / j.issn.1007-9629.2016.05.003.
7. Morizet Y., Florian P., Paris M., Gailllard F. [17O NMR evidence of free ionic clusters $Mn^{+} CO_3^{2-}$ in silicate glasses: Precursors for carbonate-silicate liquids immiscibility], *American Mineralogist*, 2017, vol. 102, no. 7, pp. 1561-1564, doi: 10.2138/am-2017-6133.
8. Shmit'ko Ye.I., Krylova A.V., Shatalova V.V. *Khimiya tsementa i vyazhushchikh veshchestv: uchebn. posobiye* [Chemistry of cement and binders: training. allowance], Voronezh, 2005, 164 p.
9. http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_125_Figovsky.pdf_2448.pdf (accessed 17 August 2018).
10. Ruzavin A.A. [Application of the method of accelerated carbonization in the technology of concrete production], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 72-75, doi: 10.14529/build170311. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Yartsev V.P., Repina Ye.I., Sheverda V.V. [Influence of the grain composition of fillers from asbestos-cement waste on the physical and mechanical characteristics of cement-sand concrete], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 165-171. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Yartsev V.P., Kozhukhina O.N., Belyakin E.U. [Durability and strength capacity of asbestos-cement tubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 4, pp. 638-643. (In Eng., abstract in Russ.)

13. Sopov V., Pershina L., Butskaya L., Latores E., Makarenko O. [The role of chemical admixtures in the formation of the structure of cement stone], *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 116, no. 01018, 10 p., doi: 10.1051/mateconf/201711601018.

14. Fedosov S.V., Akulova M.V., Slizneva T.Ye., Potemkina O.V. [Thermogravimetric studies of phase transformations in cement compositions on mechanically activated sodium silicate solution], *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2014, no. 1, pp. 111-118. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Izmailova V.N., Rodin V.V., Shchukin E.D., Yampol'skaya G.P., Nuss P.V., Ovchinniko, A.N., Tulovskaya Z.D. [Effect of nonionic surfactants on the state of water in cement systems (by NMR relaxation data). 2. A model of the pore space], *Коллоидный журнал* [Colloid Journal], 1998, vol. 60, no. 1, pp. 17-22. (In Eng.)

Untersuchung des Mechanismus des Auftretens und die Zusammensetzung der Auswitterungen auf der Oberfläche der Zementspanplatten

Zusammenfassung: Zur Qualitätsverbesserung von Zementspanplatten ist ein Verfahren vorgeschlagen, mit dessen Hilfe die darauf bildenden und ihre dekorativen Eigenschaften beeinträchtigenden Auswitterungen, sich erkennen und beseitigen lassen.

Étude du mécanisme de l'apparition de la composition des hautes terres sur la surface des dalles de ciment

Résumé: Est proposée une méthode pour l'amélioration de la qualité des dalles de ciment qui permet d'identifier et d'éliminer les salissures qui en résultent et qui dégradent leurs qualités décoratives.

Авторы: *Рухов Артём Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Дегтярев Андрей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Тришина Александра Викторовна* – магистрант; *Рухов Антон Викторович* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Карнушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**ОБ ИНТЕРПОЛЯЦИИ РЕШЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В СЛУЧАЕ
КРАТНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ КОРНЕЙ
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО МНОГОЧЛЕНА**

В. И. Фомин

*Кафедра «Техническая механика и детали машин»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; vasilyfomin@bk.ru*

Ключевые слова: интерполяционный многочлен Лагранжа; кратные комплексные корни; обобщенная формула Лейбница; фундаментальная система решений; характеристический многочлен.

Аннотация: Показано, как выбирать степень интерполяционного многочлена Лагранжа, чтобы проводить интерполяцию на данном промежутке с заданной точностью решений линейного однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами в случае кратных комплексных корней его характеристического многочлена.

Рассмотрим линейное однородное дифференциальное уравнение

$$y^{(m)}(x) + \sum_{i=1}^{m-1} a_i y^{(m-i)}(x) + a_m y(x) = 0 \quad (1)$$

с постоянными коэффициентами a_i ($1 \leq i \leq m$). Известно [1, с. 180], что общее решение уравнения (1) имеет вид $y(x) = C_1 y_1(x) + C_2 y_2(x) + \dots + C_m y_m(x)$, где $y_1(x), y_2(x), \dots, y_m(x)$ – фундаментальная система решений (**ФСР**) данного уравнения; $C_1, C_2, \dots, C_m$ – произвольные постоянные (свободные параметры). Фундаментальные системы решений уравнения (1) образуют решения из класса функций K , состоящего из функций следующего вида [1, с. 389]:

$$x^k \quad (k \geq 0); \quad (2)$$

$$e^{\alpha x}, \cos \beta x, \sin \beta x \quad (\alpha \neq 0, \beta \neq 0); \quad (3)$$

$$x^k e^{\alpha x}, x^k \cos \beta x, x^k \sin \beta x \quad (\alpha \neq 0, \beta \neq 0, k \geq 1); \quad (4)$$

$$x^k e^{\alpha x} \cos \beta x, x^k e^{\alpha x} \sin \beta x \quad (\alpha \neq 0, \beta \neq 0, k \geq 1). \quad (5)$$

В работе [2] показано, что вопрос об интерполяции решений уравнения (1) на отрезке $[a, b]$ некоторым многочленом $P_N(x)$ с заданной точностью δ сводится к задаче вида

H : для каждой отдельной функции $f(x) \in K$ нужно подобрать степень n интерполяционного многочлена Лагранжа $L_n(x)$ таким образом, чтобы $f(x) \approx L_n(x)$ на отрезке $[a, b]$ с заданной точностью $\delta_0 > 0$:

$$\|R_n\| \leq \delta_0, \quad (6)$$

где $R_n(x) = f(x) - L_n(x)$, $\|R_n\| = \max_{x \in [a, b]} |R_n(x)|$ (здесь и в дальнейшем используется норма $\|u\| = \max_{x \in [a, b]} |u(x)|$ пространства $C[a, b]$ непрерывных на отрезке $[a, b]$ функций $u = u(x)$).

Заметим, что решения вида (2), будучи многочленами, в интерполяции не нуждаются.

Для решения поставленной задачи H воспользуемся известной оценкой [3, с. 60]

$$\|R_n\| \leq \frac{\|f^{(n)}\| (b-a)^n 2^{1-2n}}{n!}. \quad (7)$$

Вначале находится производная $f^{(n)}(x)$. Затем указывается верхняя оценка для $\|f^{(n)}\|$, с помощью которой и неравенства (7) получают новую верхнюю границу для $\|R_n\|$. Тогда для выполнения неравенства (6) достаточно потребовать, чтобы эта новая верхняя граница для $\|R_n\|$ не превосходила δ_0 . Тем самым, будет указано условие на степень n интерполяционного многочлена Лагранжа $L_n(x)$, при выполнении которого поставленная задача интерполяции для взятой конкретной функции $f(x) \in K$ будет решена (естественно, следует выбирать минимальное значение n , удовлетворяющее указанному условию).

Для функций вида (3), (4) решение поставленной задачи не вызывает особых затруднений (при нахождении производной $f^{(n)}(x)$ для функций вида (4) используется формула Лейбница [4, с. 185]).

Изучим поставленную задачу для функций вида (5). Заметим, что для решений вида (5) уравнения (1) $1 \leq k \leq \frac{m}{2} - 1$ в случае четного m и $1 \leq k \leq \frac{m-1}{2} - 1$ в случае нечетного m . Это следует из того, что если $\alpha + i\beta$ – комплексный корень кратности r характеристического многочлена уравнения (1), то $\alpha - i\beta$ также является корнем кратности r этого многочлена [1, с. 403], и такая пара комплексно сопряженных корней порождает $2r$ вещественнозначных решений уравнения (1) вида $y = x^k e^{\alpha x} \cos \beta x$, $y = x^k e^{\alpha x} \sin \beta x$ ($0 \leq k \leq r-1$) из ФСР этого уравнения [1, с. 404].

При $k=1$ поставленная выше задача для функций вида (5) решена в работе [2]. Рассмотрим случай $k \geq 2$.

1. Решим задачу H для функции вида

$$f(x) = x^k e^{\alpha x} \cos \beta x \quad (8)$$

($\alpha \neq 0, \beta \neq 0$; $2 \leq k \leq \frac{m}{2} - 1$ в случае четного m ; $2 \leq k \leq \frac{m-1}{2} - 1$ в случае нечетного m).

Запишем функцию $f(x)$ в виде $f(x) = u(x) v(x) w(x)$, где $u(x) = x^k$, $v(x) = e^{\alpha x}$, $w(x) = \cos \beta x$. Используя обобщенную формулу Лейбница на случай трех сомножителей [5], получаем равенство

$$f^{(n)}(x) = \sum_{s=0}^n C_n^s u^{(n-s)} \sum_{l=0}^s C_s^l v^{(s-l)} w^{(l)}. \quad (9)$$

Формулу (9) можно записать в виде

$$\begin{aligned} f^{(n)}(x) = & u^{(n)} v w + u v^{(n)} w + u v w^{(n)} + u \sum_{l=1}^{n-1} C_n^l v^{(n-l)} w^{(l)} + \\ & + w \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s u^{(n-s)} v^{(s)} + v \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s u^{(n-s)} w^{(s)} + \sum_{s=2}^{n-1} C_n^s u^{(n-s)} \sum_{l=1}^{s-1} C_s^l v^{(s-l)} w^{(l)} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} f^{(n)}(x) = & u^{(n)} v w + u v^{(n)} w + u v w^{(n)} + \sum_{l=1}^{n-1} C_n^l u v^{(n-l)} w^{(l)} + \\ & + \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s u^{(n-s)} v^{(s)} w + \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s u^{(n-s)} v w^{(s)} + \sum_{s=2}^{n-1} C_n^s \sum_{l=1}^{s-1} C_s^l u^{(n-s)} v^{(s-l)} w^{(l)}. \quad (10) \end{aligned}$$

Используя свойства нормы $\|u + v\| \leq \|u\| + \|v\|$, $\|\lambda u\| = |\lambda| \|u\|$, получаем из равенства (10) оценку вида

$$\begin{aligned} \|f^{(n)}\| \leq & \|u^{(n)} v w\| + \|u v^{(n)} w\| + \|u v w^{(n)}\| + \sum_{l=1}^{n-1} C_n^l \|u v^{(n-l)} w^{(l)}\| + \\ & + \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s \|u^{(n-s)} v^{(s)} w\| + \sum_{s=1}^{n-1} C_n^s \|u^{(n-s)} v w^{(s)}\| + \sum_{s=2}^{n-1} C_n^s \sum_{l=1}^{s-1} C_s^l \|u^{(n-s)} v^{(s-l)} w^{(l)}\|. \quad (11) \end{aligned}$$

Заметим, что

$$u^{(i)}(x) = \begin{cases} A_k^i x^{k-i}, & 1 \leq i \leq k, \\ 0, & i > k; \end{cases} \quad (12)$$

$$v^{(i)}(x) = \alpha^i e^{\alpha x}, \quad i \in \mathbb{N}; \quad (13)$$

$$w^{(i)}(x) = \begin{cases} (-1)^q \beta^i \sin \beta x, & i = 2q - 1, \\ (-1)^q \beta^i \cos \beta x, & i = 2q. \end{cases} \quad (14)$$

Будем предполагать в дальнейшем, для определенности, что

$$n \geq k + 2. \quad (15)$$

В силу соотношений (12), (15) $u^{(n)}(x) = 0$, следовательно,

$$\|u^{(n)} v w\| = 0. \quad (16)$$

По формуле (12)

$$u^{(n-s)}(x) = \begin{cases} A_k^{n-s} x^{s+k-n}, & n-k \leq s \leq n-1, \\ 0, & s < n-k. \end{cases} \quad (17)$$

В силу равенств (16), (17) оценка (11) принимает вид

$$\|f^{(n)}\| \leq \|x^k v^{(n)} w\| + \|x^k v w^{(n)}\| + S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{l=1}^{n-1} C_n^l \|x^k v^{(n-l)} w^{(l)}\|; \\ S_2 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \|x^{s+k-n} v^{(s)} w\|; \\ S_3 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \|x^{s+k-n} v w^{(s)}\|; \\ S_4 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \sum_{l=1}^{s-1} C_s^l \|x^{s+k-n} v^{(s-l)} w^{(l)}\|. \end{aligned}$$

Преобразуем правую часть неравенства (18). Введем следующие обозначения для $j \in \mathbb{N}$:

$$\begin{aligned} P_{\alpha, \beta, j} &= \max_{x \in [a, b]} |x^j e^{\alpha x} \sin \beta x|; \\ Q_{\alpha, \beta, j} &= \max_{x \in [a, b]} |x^j e^{\alpha x} \cos \beta x|. \end{aligned}$$

В силу равенства (13) $x^k v^{(n)}(x) w(x) = \alpha^n x^k e^{\alpha x} \cos \beta x$, следовательно,

$$\|x^k v^{(n)} w\| = |\alpha|^n Q_{\alpha, \beta, k}. \quad (19)$$

В силу соотношения (14)

$$x^k v^{(n)}(x) w^{(n)}(x) = \begin{cases} (-1)^q \beta^n x^k e^{\alpha x} \sin \beta x, & n = 2q - 1, \\ (-1)^q \beta^n x^k e^{\alpha x} \cos \beta x, & n = 2q, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^k v w^{(n)}\| = \begin{cases} |\beta|^n P_{\alpha, \beta, k}, & n = 2q - 1, \\ |\beta|^n Q_{\alpha, \beta, k}, & n = 2q. \end{cases} \quad (20)$$

Преобразуем сумму S_1 . В силу равенств (13), (14)

$$x^k v^{(n-l)}(x) w^{(l)}(x) = \begin{cases} (-1)^r \alpha^{n-l} \beta^l x^k e^{\alpha x} \sin \beta x, & l = 2r - 1, \\ (-1)^r \alpha^{n-l} \beta^l x^k e^{\alpha x} \cos \beta x, & l = 2r, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^k v^{(n-l)} w^{(l)}\| = \begin{cases} |\alpha|^{n-l} |\beta|^l P_{\alpha, \beta, k}, & l = 2r - 1, \\ |\alpha|^{n-l} |\beta|^l Q_{\alpha, \beta, k}, & l = 2r. \end{cases} \quad (21)$$

Формула (21) является составной. Поэтому сумму S_1 надо представить в виде двух сумм, в одну из которых включить слагаемые с нечетными l , в другую слагаемые с четными l . Пределы суммирования в этих новых двух суммах будут определяться в зависимости от нечетности или четности n .

1.1. Пусть n нечетно (это означает, что при решении задачи H для функции вида (8) подбирается интерполяционный многочлен Лагранжа $L_n(x)$ нечетной степени).

Тогда, в силу равенства (21) сумма S_1 принимает вид

$$S_1 = \varphi_1(n, \alpha, \beta, k), \quad (22)$$

где

$$\varphi_1(n, \alpha, \beta, k) = P_{\alpha, \beta, k} \sum_{r=1}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2r-1} |\alpha|^{n-2r+1} |\beta|^{2r-1} + Q_{\alpha, \beta, k} \sum_{r=1}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2r} |\alpha|^{n-2r} |\beta|^{2r}. \quad (23)$$

Преобразуем сумму S_2 . В силу формулы (13)

$$x^{s+k-n} v^{(s)}(x) w(x) = \alpha^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \cos \beta x, \text{ следовательно, } \|x^{s+k-n} v^{(s)} w\| = |\alpha|^s Q_{\alpha, \beta, s+k-n}.$$

Тогда

$$S_2 = \varphi_2(n, \alpha, \beta, k), \quad (24)$$

где

$$\varphi_2(n, \alpha, \beta, k) = \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} |\alpha|^s Q_{\alpha, \beta, s+k-n}. \quad (25)$$

Преобразуем суммы S_3, S_4 . В силу равенства (14)

$$x^{s+k-n} v(x) w^{(s)}(x) = \begin{cases} (-1)^p \beta^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \sin \beta x, & s = 2p - 1, \\ (-1)^p \beta^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \cos \beta x, & s = 2p, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^{s+k-n} v w^{(s)}\| = \begin{cases} |\beta|^s P_{\alpha, \beta, s+k-n}, & s = 2p - 1, \\ |\beta|^s Q_{\alpha, \beta, s+k-n}, & s = 2p. \end{cases}$$

Представим сумму S_3 в виде двух сумм, в одну из которых включим слагаемые с нечетными s , в другую слагаемые с четными s . Пределы суммирования в этих новых двух суммах будут определяться в зависимости от четности или нечетности k .

1.1.1. Пусть n нечетно, k четно (следовательно, $n - k$ нечетно).

Тогда

$$S_3 = \varphi_3(n, \alpha, \beta, k), \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned}\varphi_3(n, \alpha, \beta, k) = & \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p-1} A_k^{n-2p+1} |\beta|^{2p-1} P_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} + \\ & + \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p} A_k^{n-2p} |\beta|^{2p} Q_{\alpha, \beta, 2p+k-n}.\end{aligned}\quad (27)$$

Преобразуем сумму S_4 . В силу формул (13), (14)

$$x^{s+k-n} v^{(s-l)}(x) w^{(l)}(x) = \begin{cases} (-1)^r \alpha^{s-l} \beta^l x^{s+k-n} e^{\alpha x} \sin \beta x, & l = 2r-1, \\ (-1)^r \alpha^{s-l} \beta^l x^{s+k-n} e^{\alpha x} \cos \beta x, & l = 2r, \end{cases}$$

следовательно,

$$\left\| x^{s+k-n} v^{(s-l)} w^{(l)} \right\| = \begin{cases} |\alpha|^{s-l} |\beta|^l P_{\alpha, \beta, s+k-n}, & l = 2r-1, \\ |\alpha|^{s-l} |\beta|^l Q_{\alpha, \beta, s+k-n}, & l = 2r. \end{cases}$$

Тогда

$$S_4 = \varphi_4(n, \alpha, \beta, k), \quad (28)$$

где

$$\begin{aligned}\varphi_4(n, \alpha, \beta, k) = & \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p-1} A_k^{n-2p+1} \left[P_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p-1}^{2r-1} |\alpha|^{2(p-r)} |\beta|^{2r-1} + \right. \\ & \left. + Q_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p-1}^{2r} |\alpha|^{2p-1-2r} |\beta|^{2r} \right] + \\ & + \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p} A_k^{n-2p} \left[P_{\alpha, \beta, 2p+k-n} \sum_{r=1}^p C_{2p}^{2r-1} |\alpha|^{2p-2r+1} |\beta|^{2r-1} + \right. \\ & \left. + Q_{\alpha, \beta, 2p+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p}^{2r} |\alpha|^{2(p-r)} |\beta|^{2r} \right].\end{aligned}\quad (29)$$

Из соотношений (18) – (20), (22), (24), (26), (28) получаем оценку вида

$$\left\| f^{(n)} \right\| \leq \Phi(n, \alpha, \beta, k), \quad (30)$$

где

$$\begin{aligned}\Phi(n, \alpha, \beta, k) = & |\alpha|^n Q_{\alpha, \beta, k} + |\beta|^n P_{\alpha, \beta, k} + \varphi_1(n, \alpha, \beta, k) + \\ & + \varphi_2(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_3(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_4(n, \alpha, \beta, k).\end{aligned}$$

Из оценок (7), (30) следует, что при нечетном n и четном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Phi(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (31)$$

1.1.2. Пусть n нечетно, k нечетно (следовательно, $n-k$ четно). Тогда

$$S_3 = \varphi_3^*(n, \alpha, \beta, k), \quad (32)$$

где $\varphi_3^*(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_3(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (27)), только нижний предел суммирования $p = \frac{n-k+1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $p = \frac{n-k}{2} + 1$, во второй на $p = \frac{n-k}{2}$. Сумма S_4 приводится к виду

$$S_4 = \varphi_4^*(n, \alpha, \beta, k), \quad (33)$$

где $\varphi_4^*(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_4(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (29)), только нижний предел суммирования $p = \frac{n-k+1}{2}$ в обеих внешних суммах надо заменить в первой сумме на $p = \frac{n-k}{2} + 1$, во второй на $p = \frac{n-k}{2}$. В силу соотношений (18) – (20), (22), (24), (32), (33) справедлива оценка вида

$$\|f^{(n)}\| \leq \Phi^*(n, \alpha, \beta, k), \quad (34)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi^*(n, \alpha, \beta, k) = & |\alpha|^n Q_{\alpha, \beta, k} + |\beta|^n P_{\alpha, \beta, k} + \varphi_1(n, \alpha, \beta, k) + \\ & + \varphi_2(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_3^*(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_4^*(n, \alpha, \beta, k). \end{aligned}$$

Из оценок (7), (34) следует, что при нечетном n и нечетном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Phi^*(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (35)$$

1.2. Пусть n четно (это означает, что при решении задачи H для функции вида (8) подбирается интерполяционный многочлен Лагранжа $L_n(x)$ четной степени).

Преобразуем правую часть неравенства (18). Для первого слагаемого справедливо равенство (19). В силу формулы (20)

$$\|x^k v w^{(n)}\| = |\beta|^n Q_{\alpha, \beta, k}. \quad (36)$$

Сумма S_1 имеет вид

$$S_1 = \varphi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (37)$$

где $\varphi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_1(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (23)), только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2}-1$. Сумма S_2 определяется формулой (24). Преобразуем суммы S_3, S_4 .

1.2.1. Пусть n четно, k четно (следовательно, $n-k$ четно). Тогда

$$S_3 = \varphi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (38)$$

где $\varphi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_3^*(n, \alpha, \beta, k)$, только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2}-1$. Сумма S_4 приводится к виду

$$S_4 = \varphi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (39)$$

где $\varphi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_4^*(n, \alpha, \beta, k)$, только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих внешних суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2}-1$. Из соотношений (18), (19), (24), (36) – (39) следует оценка вида

$$\|f^{(n)}\| \leq \Phi^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (40)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi^{**}(n, \alpha, \beta, k) = & (|\alpha|^n + |\beta|^n) Q_{\alpha, \beta, k} + \varphi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \\ & + \varphi_2(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \varphi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k). \end{aligned}$$

Из оценок (7), (40) следует, что при четном n и четном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Phi^{**}(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (41)$$

1.2.2. Пусть n четно, k нечетно (следовательно, $n-k$ нечетно). Тогда

$$S_3 = \varphi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (42)$$

где $\varphi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\varphi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k)$, только нижние пределы суммирования $p = \frac{n-k}{2} + 1$ в первой сумме и $p = \frac{n-k}{2}$ во второй сумме надо заменить в обеих суммах на $p = \frac{n-k+1}{2}$. Сумма S_4 приводится к виду

$$S_4 = \varphi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (43)$$

где $\Phi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\Phi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k)$, только нижние пределы суммирования $p = \frac{n-k}{2} + 1$ в первой внешней сумме и $p = \frac{n-k}{2}$ во второй внешней сумме надо заменить в обеих этих суммах на $p = \frac{n-k+1}{2}$. Из соотношений (18), (19), (24), (36), (37), (42), (43) получаем оценку вида

$$\|f^{(n)}\| \leq \Phi^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (44)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi^{***}(n, \alpha, \beta, k) = & \left(|\alpha|^n + |\beta|^n \right) \mathcal{Q}_{\alpha, \beta, k} + \Phi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \\ & + \Phi_2(n, \alpha, \beta, k) + \Phi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k) + \Phi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k). \end{aligned}$$

Из оценок (7), (44) следует, что при четном n и нечетном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Phi^{***}(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (45)$$

2. Решим задачу H для функции вида

$$f(x) = x^k e^{\alpha x} \sin \beta x \quad (46)$$

($\alpha \neq 0, \beta \neq 0$; $2 \leq k \leq \frac{m}{2} - 1$ в случае четного m ; $2 \leq k \leq \frac{m-1}{2} - 1$ в случае нечетного m).

Запишем функцию $f(x)$ в виде $f(x) = u(x) v(x) h(x)$, где $u(x) = x^k$, $v(x) = e^{\alpha x}$, $h(x) = \sin \beta x$. Для производной $f^{(n)}(x)$ справедлива оценка, аналогичная оценке (18):

$$\|f^{(n)}\| \leq \|x^k v^{(n)} h\| + \|x^k v h^{(n)}\| + T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (47)$$

где

$$\begin{aligned} T_1 &= \sum_{l=1}^{n-1} C_n^l \|x^k v^{(n-l)} h^{(l)}\|; \\ T_2 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \|x^{s+k-n} v^{(s)} h\|; \\ T_3 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \|x^{s+k-n} v h^{(s)}\|; \\ T_4 &= \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} \sum_{l=1}^{s-1} C_s^l \|x^{s+k-n} v^{(s-l)} h^{(l)}\|. \end{aligned}$$

Преобразуем правую часть неравенства (47). Заметим, что

$$h^{(i)}(x) = \begin{cases} (-1)^{q+1} \beta^i \cos \beta x, & i = 2q-1, \\ (-1)^q \beta^i \sin \beta x, & i = 2q. \end{cases} \quad (48)$$

В силу равенства (13) $x^k v^{(n)}(x) h(x) = \alpha^n x^k e^{\alpha x} \sin \beta x$, следовательно,

$$\|x^k v^{(n)} h\| = |\alpha|^n P_{\alpha, \beta, k}. \quad (49)$$

В силу соотношения (48)

$$x^k v(x) h^{(n)}(x) = \begin{cases} (-1)^{q+1} \beta^n x^k e^{\alpha x} \cos \beta x, & n = 2q-1, \\ (-1)^q \beta^n x^k e^{\alpha x} \sin \beta x, & n = 2q, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^k v h^{(n)}\| = \begin{cases} |\beta|^n Q_{\alpha, \beta, k}, & n = 2q-1, \\ |\beta|^n P_{\alpha, \beta, k}, & n = 2q. \end{cases} \quad (50)$$

Преобразуем сумму T_1 . В силу равенств (13), (48)

$$x^k v^{(n-l)}(x) h^{(l)}(x) = \begin{cases} (-1)^{r+1} \alpha^{n-l} \beta^l x^k e^{\alpha x} \cos \beta x, & l = 2r-1, \\ (-1)^r \alpha^{n-l} \beta^l x^k e^{\alpha x} \sin \beta x, & l = 2r, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^k v^{(n-l)} h^{(l)}\| = \begin{cases} |\alpha|^{n-l} |\beta|^l Q_{\alpha, \beta, k}, & l = 2r-1, \\ |\alpha|^{n-l} |\beta|^l P_{\alpha, \beta, k}, & l = 2r. \end{cases} \quad (51)$$

Представим сумму T_1 в виде двух сумм, в одну из которых включим слагаемые с нечетными l , в другую слагаемые с четными l . Пределы суммирования в этих новых двух суммах будут определяться в зависимости от нечетности или четности n .

2.1. Пусть n нечетно.

Тогда, в силу равенства (51) сумма T_1 принимает вид

$$T_1 = \psi_1(n, \alpha, \beta, k), \quad (52)$$

где

$$\psi_1(n, \alpha, \beta, k) = Q_{\alpha, \beta, k} \sum_{r=1}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2r-1} |\alpha|^{n-2r+1} |\beta|^{2r-1} + P_{\alpha, \beta, k} \sum_{r=1}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2r} |\alpha|^{n-2r} |\beta|^{2r}. \quad (53)$$

Преобразуем сумму T_2 . В силу формулы (13)

$$x^{s+k-n} v^{(s)}(x) h(x) = \alpha^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \sin \beta x,$$

следовательно,

$$\|x^{s+k-n} v^{(s)} h\| = |\alpha|^s P_{\alpha, \beta, s+k-n}.$$

Тогда

$$T_2 = \psi_2(n, \alpha, \beta, k), \quad (54)$$

где

$$\psi_2(n, \alpha, \beta, k) = \sum_{s=n-k}^{n-1} C_n^s A_k^{n-s} |\alpha|^s P_{\alpha, \beta, s+k-n}. \quad (55)$$

Преобразуем суммы T_3, T_4 . В силу равенства (48)

$$x^{s+k-n} \nu(x) h^{(s)}(x) = \begin{cases} (-1)^{p+1} \beta^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \cos \beta x, & s = 2p-1, \\ (-1)^p \beta^s x^{s+k-n} e^{\alpha x} \sin \beta x, & s = 2p, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^{s+k-n} \nu h^{(s)}\| = \begin{cases} |\beta|^s Q_{\alpha, \beta, s+k-n}, & s = 2p-1, \\ |\beta|^s P_{\alpha, \beta, s+k-n}, & s = 2p. \end{cases} \quad (56)$$

Представим сумму T_3 в виде двух сумм, в одну из которых включим слагаемые с нечетными s , в другую слагаемые с четными s . Пределы суммирования в этих новых двух суммах будут определяться в зависимости от четности или нечетности k .

2.1.1. Пусть n нечетно, k четно (следовательно, $n-k$ нечетно).

Тогда в силу равенства (56)

$$T_3 = \psi_3(n, \alpha, \beta, k), \quad (57)$$

где

$$\begin{aligned} \psi_3(n, \alpha, \beta, k) = & \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p-1} A_k^{n-2p+1} |\beta|^{2p-1} Q_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} + \\ & + \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p} A_k^{n-2p} |\beta|^{2p} P_{\alpha, \beta, 2p+k-n}. \end{aligned} \quad (58)$$

Преобразуем сумму T_4 . В силу формул (13), (48)

$$x^{s+k-n} \nu^{(s-l)}(x) h^{(l)}(x) = \begin{cases} (-1)^{r+1} \alpha^{s-l} \beta^l x^{s+k-n} e^{\alpha x} \cos \beta x, & l = 2r-1, \\ (-1)^r \alpha^{s-l} \beta^l x^{s+k-n} e^{\alpha x} \sin \beta x, & l = 2r, \end{cases}$$

следовательно,

$$\|x^{s+k-n} \nu^{(s-l)} h^{(l)}\| = \begin{cases} |\alpha|^{s-l} |\beta|^l Q_{\alpha, \beta, s+k-n}, & l = 2r-1, \\ |\alpha|^{s-l} |\beta|^l P_{\alpha, \beta, s+k-n}, & l = 2r. \end{cases} \quad (59)$$

Тогда

$$T_4 = \psi_4(n, \alpha, \beta, k), \quad (60)$$

где

$$\psi_4(n, \alpha, \beta, k) = \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p-1} A_k^{n-2p+1} \left[Q_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p-1}^{2r-1} |\alpha|^{2(p-r)} |\beta|^{2r-1} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + P_{\alpha, \beta, 2p-1+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p-1}^{2r} |\alpha|^{2p-1-2r} |\beta|^{2r} \Big] + \\
& + \sum_{p=\frac{n-k+1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} C_n^{2p} A_k^{n-2p} \Big[Q_{\alpha, \beta, 2p+k-n} \sum_{r=1}^p C_{2p}^{2r-1} |\alpha|^{2p-2r+1} |\beta|^{2r-1} + \\
& + P_{\alpha, \beta, 2p+k-n} \sum_{r=1}^{p-1} C_{2p}^{2r} |\alpha|^{2(p-r)} |\beta|^{2r} \Big].
\end{aligned} \tag{61}$$

Из соотношений (47), (49), (50), (52), (54), (57), (60) получаем оценку вида

$$\|f^{(n)}\| \leq \Psi(n, \alpha, \beta, k), \tag{62}$$

где

$$\begin{aligned}
\Psi(n, \alpha, \beta, k) = & |\alpha|^n P_{\alpha, \beta, k} + |\beta|^n Q_{\alpha, \beta, k} + \psi_1(n, \alpha, \beta, k) + \\
& + \psi_2(n, \alpha, \beta, k) + \psi_3(n, \alpha, \beta, k) + \psi_4(n, \alpha, \beta, k).
\end{aligned}$$

Из оценок (7), (62) следует, что при нечетном n и четном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Psi(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \tag{63}$$

2.1.2. Пусть n нечетно, k нечетно (следовательно, $n-k$ четно).

Тогда

$$T_3 = \psi_3^*(n, \alpha, \beta, k), \tag{64}$$

где $\psi_3^*(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_3(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (58)), только нижний предел суммирования $p = \frac{n-k+1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $p = \frac{n-k}{2} + 1$, во второй на $p = \frac{n-k}{2}$. Сумма T_4 приводится к виду

$$T_4 = \psi_4^*(n, \alpha, \beta, k), \tag{65}$$

где $\psi_4^*(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_4(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (61)), только нижний предел суммирования $p = \frac{n-k+1}{2}$ в обеих внешних суммах надо заменить в первой сумме на $p = \frac{n-k}{2} + 1$, во второй на $p = \frac{n-k}{2}$. Из соотношений (47), (49), (50), (52), (54), (64), (65) следует оценка вида

$$\|f^{(n)}\| \leq \Psi^*(n, \alpha, \beta, k), \tag{66}$$

где

$$\begin{aligned}\Psi^*(n, \alpha, \beta, k) = & |\alpha|^n P_{\alpha, \beta, k} + |\beta|^n Q_{\alpha, \beta, k} + \psi_1(n, \alpha, \beta, k) + \\ & + \psi_2(n, \alpha, \beta, k) + \psi_3^*(n, \alpha, \beta, k) + \psi_4^*(n, \alpha, \beta, k).\end{aligned}$$

Из оценок (7), (66) следует, что при нечетном n и нечетном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Psi^*(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (67)$$

2.2. Пусть n четно.

Преобразуем правую часть неравенства (47). Для первого слагаемого справедливо равенство (49). В силу формулы (50)

$$\|x^k v h^{(n)}\| = |\beta|^n P_{\alpha, \beta, k}. \quad (68)$$

Преобразуем сумму T_1 . В силу равенства (51)

$$T_1 = \psi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (69)$$

где $\psi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_1(n, \alpha, \beta, k)$ (см. формулу (53)), только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2} - 1$. Сумма T_2 задается формулой (54). Преобразуем суммы T_3, T_4 .

2.2.1. Пусть n четно, k четно (следовательно, $n-k$ четно).

В силу равенства (56)

$$T_3 = \psi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (70)$$

где $\psi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_3^*(n, \alpha, \beta, k)$, только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2} - 1$.

В силу формулы (59)

$$T_4 = \psi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (71)$$

где $\psi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_4^*(n, \alpha, \beta, k)$, только верхний предел суммирования $\frac{n-1}{2}$ в обеих внешних суммах надо заменить в первой сумме на $\frac{n}{2}$, во второй на $\frac{n}{2} - 1$. В силу соотношений (47), (49), (54), (68) – (71) справедлива оценка

$$\|f^{(n)}\| \leq \Psi^{**}(n, \alpha, \beta, k), \quad (72)$$

где

$$\Psi^{**}(n, \alpha, \beta, k) = (|\alpha|^n + |\beta|^n) P_{\alpha, \beta, k} + \psi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \\ + \psi_2(n, \alpha, \beta, k) + \psi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \psi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k).$$

Из оценок (7), (72) следует, что при четном n и четном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Psi^{**}(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (73)$$

2.2.2. Пусть n четно, k нечетно (следовательно, $n-k$ нечетно).

С помощью формулы (56) сумма T_3 приводится к виду

$$T_3 = \psi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (74)$$

где $\psi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_3^{**}(n, \alpha, \beta, k)$, только нижние пределы суммирования $p = \frac{n-k}{2} + 1$ и $p = \frac{n-k}{2}$ соответственно в первой и второй суммах заменяются в обоих случаях на $p = \frac{n-k+1}{2}$. Сумма T_4 с помощью формулы (59) приводится к виду

$$T_4 = \psi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (75)$$

где $\psi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k)$ задается тем же выражением, что и $\psi_4^{**}(n, \alpha, \beta, k)$, только нижние пределы суммирования $p = \frac{n-k}{2} + 1$ и $p = \frac{n-k}{2}$ соответственно в первой и второй внешней суммах заменяются в обоих случаях на $p = \frac{n-k+1}{2}$. В силу соотношений (47), (49), (54), (68), (69), (74), (75) справедлива оценка

$$\|f^{(n)}\| \leq \Psi^{***}(n, \alpha, \beta, k), \quad (76)$$

где

$$\Psi^{***}(n, \alpha, \beta, k) = (|\alpha|^n + |\beta|^n) P_{\alpha, \beta, k} + \psi_1^{**}(n, \alpha, \beta, k) + \\ + \psi_2(n, \alpha, \beta, k) + \psi_3^{***}(n, \alpha, \beta, k) + \psi_4^{***}(n, \alpha, \beta, k).$$

Из оценок (7), (76) следует, что при четном n и нечетном k для выполнения условия (6) достаточно, чтобы n удовлетворяло неравенству

$$\frac{(b-a)^n 2^{1-2n}}{n!} \Psi^{***}(n, \alpha, \beta, k) \leq \delta_0. \quad (77)$$

Результаты настоящей работы приводят к следующим выводам.

Если подбирается интерполяционный многочлен Лагранжа $L_n(x)$, интерполирующий функцию вида (8) или вида (46) на отрезке $[a, b]$ с заданной точностью δ_0 , то в качестве его степени достаточно взять:

1) в случае четности k и нечетности n минимальное нечетное значение n , удовлетворяющее для функции вида (8) неравенству (31), для функции вида (46) неравенству (63);

2) в случае нечетности k и четности n минимальное четное значение n , удовлетворяющее для функции вида (8) неравенству (35), для функции вида (46) неравенству (67);

3) в случае четности k и четности n минимальное четное значение n , удовлетворяющее для функции вида (8) неравенству (41), для функции вида (46) неравенству (73);

4) в случае нечетности k и четности n минимальное четное значение n , удовлетворяющее для функции вида (8) неравенству (45), для функции вида (46) неравенству (77).

Как уже отмечалось в работе [2], задача интерполяции решений линейного неоднородного дифференциального уравнения m -го порядка с постоянными коэффициентами и правой частью специального вида сводится к интерполяции функций из класса K , определяемого функциями (2) – (5).

Список литературы

1. Матвеев, Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. М. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1967. – 564 с.

2. Фомин, В. И. Об интерполяции решений линейных дифференциальных уравнений / В. И. Фомин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 326 – 336. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.326-336

3. Бахвалов, Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н. С. Бахвалов. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

4. Ильин, В. А. Основы математического анализа : в 2-х ч. Ч. 1. Учебник для вузов / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. – 7-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 648 с.

5. Фомин, В. И. Формула Лейбница для m -й производной произведения нескольких функций / В. И. Фомин // Современные методы теории функций и смежные проблемы : материалы Междунар. конф. : Воронежская зимняя математическая школа (26 января – 01 февраля 2017 г.). – Воронеж, 2017. – С. 205.

Interpolation of Solutions of Linear Differential Equations in the Case of Multiple Complex Roots of the Characteristic Polynomial

V. I. Fomin

*Department of Technical Mechanics and Machine Parts,
TSTU, Tambov, Russia; vasilyfomin@bk.ru*

Keywords: Lagrange interpolation polynomial; multiple complex roots; Leibniz's generalized formula; fundamental decision system; characteristic polynomial.

Abstract: It is shown how to choose the degree of the Lagrange interpolation polynomial r to carry out interpolation on a given interval with a given accuracy of solutions of a linear homogeneous differential equation with constant coefficients in the case of multiple complex roots of its characteristic polynomial.

References

1. Matveyev N.M. *Metody integrirvaniya obyknovennykh differentsial'nykh uravneniy* [Methods of integration of ordinary differential equations], Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 564 p. (In Russ.)

2. Fomin V.I. [On interpolation of solutions of linear differential equations], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 326-336, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.326-336 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Bakhvalov N.S. *Chislennyye metody (analiz, algebra, obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)* [Numerical Methods (Analysis, Algebra, Ordinary Differential Equations)], Moscow: Nauka, 1973, 632 p. (In Russ.)

4. Il'in V.A., Poznyak E.G. *Osnovy matematicheskogo analiza: part. 1. Uchebnik dlya vuzov* [Fundamentals of mathematical analysis: part. 1. Textbook. for the universities], Moscow: FIZMATLIT, 2005, 648 p. (In Russ.)

5. Fomin V.I. *Sovremennyye metody teorii funktsiy i smezhnyye problemy: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii: Voronezhskaya zimnyaya matematicheskaya shkola* [Modern methods of the theory of functions and adjacent problems: materials of the International Conference: Voronezh Winter Mathematical School], 26 January – 1 February, 2017, Voronezh, 2017, p. 205. (In Russ.)

Über die Interpolation der linearen Lösungen der Differentialgleichungen bei vielfachen komplexen Wurzeln des charakteristischen Polynoms

Zusammenfassung: Es wird gezeigt, wie der Grad der Lagrange-Interpolation gewählt werden soll, um die Interpolation in einem bestimmten Intervall mit einer bestimmten Genauigkeit der Lösungen einer linearen homogenen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten im Falle von vielfachen komplexen Wurzeln seines charakteristischen Polynoms durchzuführen.

Sur l'interpolation des solutions des équations différentielles linéaires dans le cas de multiples racines complexes du polynôme caractéristique

Résumé: Est montré comment choisir le degré d'interpolation du polygone Lagrangien pour effectuer une interpolation à un intervalle donné avec la précision donnée des solutions de l'équation différentielle homogène linéaire avec des coefficients constants dans le cas de multiples racines complexes de son polynôme caractéristique.

Автор: Фомин Василий Ильич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: Жуковский Евгений Семёнович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики, математики и информатики, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ЖИДКОФАЗНОЙ
СДВИГОВОЙ ЭКСФОЛИАЦИИ ГРАФИТА
В СТЕРЖНЕВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

Г. Б. Жумагалиева¹, А. А. Осипов², В. Ф. Першин²

*Кафедра «Технология машиностроения» (1),
Западно-Казахстанский аграрно-технический университет
имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан;
кафедра «Техника и технологии производства нанопроductов» (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; pershin.home@mail.ru*

Ключевые слова: графит; концентрация; малослойный графен; многослойный графен; суспензия; эксфолиация.

Аннотация: Исследовано влияние на кинетику процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице следующих параметров: диаметра и скорости вращения барабана; концентрации графита в исходной суспензии. Установлено, что производительность мельницы прямопропорционально зависит от указанных параметров. Предложен экспресс-метод определения концентрации малослойного и многослойного графена в масляных суспензиях. Обоснована перспективность использования барабанных стержневых мельниц для получения графеновых суспензий на основе органических жидкостей в производстве пластичных смазок, модифицированных графеновыми структурами.

Введение

После того, как были получены первые образцы графена и определены его уникальные физико-механические свойства [1], разработкой технологий получения графена активно занимаются многие ученые. Количество публикаций, в которых в той или иной степени фигурирует графен или его производные неуклонно растет. Если в 2010 г. было опубликовано примерно 4000 статей, то в 2016 – почти 25000 [2]. Аналогичная ситуация сложилась и с патентами: в 2010 г. было получено примерно 400 патентов, а в 2015 – более 6000. В последние годы повысился интерес ученых к графеновым пластинкам, которые состоят из нескольких слоев. В англоязычной научной литературе кроме термина «графен» появились термины *few-layers graphen* (малослойный графен) и *multilayer graphen* (многослойный графен). Это можно объяснить тем, что малослойный и многослойный графен стали активно использовать в качестве модификатора при создании новых конструкционных материалов. Так, например, при модифицировании эпоксидной смолы малослойным графеном ее твердость повысилась на 293 %, а модуль Юнга на 213 %, при концентрациях графена 0,7 % [3]. Отмечено снижение индекса пла-

стичности на 27 %, что повлекло за собой уменьшение ударной вязкости и отрицательно сказалось на эксплуатационных характеристиках эпоксидной смолы. Результаты проведенных опытов показали, что при концентрациях малослойного графена порядка 0,05 масс. % ударная вязкость увеличивается на 25 – 30 % [4].

Известны примеры получения хороших результатов при модифицировании малослойным графеном бетона. Авторами работы [5] получен инновационный многофункциональный нанокompозиционный бетон, демонстрирующий широкий диапазон улучшенных свойств по сравнению с исходным материалом. Модифицирование бетона осуществляли, используя в качестве воды затворения бетона суспензию, содержащую порядка 1 мг/мл малослойного графена. В результате наполнения цементной матрицы чешуйками графена происходит увеличение прочности на сжатие и изгиб на 146 и 79,5 %, соответственно, одновременно с этим возникает высокая электро- и теплопроводность и снижается водопоглощение на 400 %. Аналогичные исследования проведены в работе [6], но получены более скромные результаты. При концентрации малослойного графена порядка 0,05 масс. %, по отношению к цементу, прочность на сжатие и изгиб увеличилась от 70 до 150 % и от 20 до 50 %, соответственно. Положительные результаты применения малослойного графена в качестве эффективного модификатора стимулировали ученых активизировать поиски промышленных экологически чистых технологий производства малослойного графена.

Считаем, что одной из перспективных технологий получения суспензий малослойного графена является сдвиговая эксфолиация графита в аппарате роторного типа [7]. В данной работе для получения суспензии малослойного графена использовали серийно выпускаемый высокоскоростной роторный смеситель Silverson model L5M, который состоит из цилиндрического статора с расположенными в нем ротором с лопастями и приводом вращения ротора. Цилиндрическая поверхность статора имеет многочисленные отверстия. При вращении ротора на жидкость и находящиеся в ней частицы графита действуют центробежные силы. Жидкость под действием центробежных сил выбрасывается через отверстия. Внутри статора образуется разрежение и новые объемы суспензии поступают в пространство между ротором и статором. Фактически смеситель работает как лопастной центробежный насос. В зонах между неподвижным статором и движущимися лопастями образуются зоны с большим градиентом скорости, поскольку зазор между статором и лопастями меньше 0,1 мм. По нашему мнению, именно в этих областях и происходит сдвиговая эксфолиация графита.

В работе [7] предложено три механизма, по которым может происходить эксфолиация: сдвиг в высокоградиентном потоке жидкости; за счет кавитации; при прохождении частиц через отверстия в статоре. Авторы данной работы считают, что эксфолиация в основном происходит при прохождении частицами через отверстия. Проведенные экспериментальные исследования показали, что интенсивность процесса эксфолиации практически не зависит от числа отверстий, и по результатам этих исследований разработана конструкция смесителя с подвижными лопастями, в которой лопасти скользят по внутренней поверхности статора, имеющего минимальное число отверстий, и процесс эксфолиации осуществляется за счет сдвиговых воздействий твердых поверхностей статора и лопастей на частицы. Реализация передачи сдвиговых усилий на частицы графита непосредственно от твердых поверхностей позволила почти в 1,5 раза повысить концентрацию малослойного графена в суспензии [8], по сравнению с результатами, полученными в работе [7]. Кроме этого, в работе [5] только 3 % исходного графита удалось перевести в графеновые структуры, а в [8] – не менее 6 %, но даже 6 % переработки графита в малослойный графен для промышленного производства не рентабельно.

Использование малослойного и многослойного графена в качестве модификатора пластичных смазок существенно повышает их трибологические характеристики [9, 10]. Результаты проведенных исследований процесса жидкофазной эксфолиации графита в синтетических маслах с использованием роторного смесителя с подвижными лопастями показали, что порядка 3 – 4 % графита удается преобразовать в малослойный графен. В работе [11] исследовали процесс сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице и экспериментально доказали возможность получения в ней суспензии малослойного графена.

Цель работы – исследование влияния режимных и геометрических параметров на кинетику процесса сдвиговой эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице.

Оборудование и материалы

Для исследования кинетики процесса жидкофазной сдвиговой эксфолиации использовали следующее оборудование: лабораторную установку с барабаном диаметром 400 мм; установку с фарфоровыми барабанами с диаметрами 140 и 200 мм. У лабораторной установки передняя торцевая стенка выполнена из органического стекла, что позволяет проводить фото- и видеосъемку движения стержней в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана. Скорость вращения барабана может плавно изменяться в пределах 16...100 об./мин, что составит 0,25...1,5 от критической скорости вращения барабана $\omega_{кр}$, которая определяется по формуле

$$\omega_{кр} = \sqrt{g/R},$$

где g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; R – внутренний радиус барабана, $м$.

Скорость вращения фарфорового барабана диаметром 140 мм (рис. 1) плавно изменялась в пределах 56...141 об./мин, что составило 0,5...1,25 от $\omega_{кр}$, но в процессе одного эксперимента оставалась постоянной. Скорость вращения фарфорового барабана диаметром 200 мм может плавно изменяться в пределах 48...120 об./мин, что составит 0,5...1,25 от $\omega_{кр}$.

При реализации процесса сдвиговой эксфолиации в фарфоровых барабанах использовали стальные стержни диаметрами 8, 10 и 12 мм. Длины стержней для барабанов диаметрами 140 и 200 мм равны соответственно 100 и 120 мм. В качестве основы для суспензии использовали индустриальное И-20А и синтетическое 5W-40 масла.

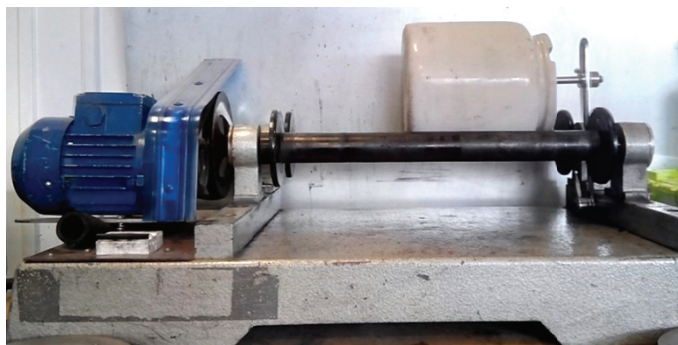


Рис. 1. Лабораторная стержневая мельница с фарфоровым барабаном

Индустриальное масло И-20А относится к дистиллятным нефтяным продуктам и предназначено для снижения трения в следующих устройствах: металлорежущие станки; прокатные станы; кузнечно-прессовое оборудование; вентиляторы; насосы; текстильные машины. Масло И-20А идеально подходит для оборудования с невысоким давлением между элементами пары трения. Модифицирование данного масла графеновыми наноструктурами существенно расширит область его применения.

Синтетические масла типа 5W-40 широко используются при эксплуатации транспортных средств. Модифицирование масел графеновыми структурами повысит, прежде всего, их трибологические характеристики и увеличит срок эксплуатации.

Для получения малослойного и многослойного графена использовали графит марки GCM-2.

Определение массовой концентрации малослойного и многослойного графена в суспензии

Графеносодержащие пасты и суспензии широко используются при получении новых конструкционных и функциональных материалов. Для промышленной реализации новых технологий необходимо регламентировать основные характеристики графеносодержащих паст и суспензий. Массовая доля твердой фазы в графеновых пастах является одной из основных характеристик продукта. Особенностью графеновых суспензий на масляной основе, полученных методом механической сдвиговой эксфолиации является то обстоятельство, что на конечной стадии они содержат менее 1 масс. % твердой фазы.

Использование прямых методов измерения массовой доли твердой фазы в графеновых пастах не представляется возможным. Однако методом косвенных измерений данный параметр паст определяется достаточно легко, но при этом необходимо провести расчеты по определению погрешностей измерений.

В процессе анализа научно-технической литературы не обнаружены даже косвенные методы определения концентрации малослойного и многослойного графена в суспензиях на основе масел. Для водных суспензий используют метод измерений массовой доли твердой фазы, основанный на определении потери массы пробы графеновой суспензии при высушивании до постоянной массы. При этом для удаления поверхностно-активных веществ приходится разбавлять осадок чистой водой и неоднократно центрифугировать. Выделить графеновые структуры из масла значительно труднее.

Поскольку плотность масел находится в диапазоне $800...900 \text{ кг/м}^3$, а плотность графеновых структур порядка 2200 кг/м^3 , их концентрацию в готовой суспензии (после центрифугирования и удаления осадка) можно определить экспериментально по плотности суспензии. Рассмотрим предлагаемую методику детально, на конкретном примере.

Готовую суспензию получали при следующих параметрах: концентрация графита в исходной суспензии 10 мг/мл; исходный объем суспензии 200 мл; диаметр барабана 140 мм; скорость вращения барабана $\omega_{\text{кр}}$; время обработки 15 ч; центрифугирование при 5000 об./мин в течение часа; объем удаленного осадка 30 мл. Объемы шести образцов готовой суспензии отмеряли колбой объемом 25 мл, с точностью 0,04 мл. Вес образцов измеряли на электронных весах Acculab ALT-80d4 с точностью 0,0001 г. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что плотность масла равна $0,8369 \text{ г/см}^3$, а плотность графеносодержащей суспензии – $0,8428 \text{ г/см}^3$. Исходя из этого, концентрация графеновых структур в суспензии составляет $7,2 \pm 2,3 \text{ мг/мл}$. Следует отметить, что это теоретически максимальные отклонения, с учетом возможных погрешностей в определении объема. При проведении практических расчетов, логично предположить,

что больший вес соответствует большему объему пробы. В этом случае концентрация равна $7,2 \pm 0,2$ мг/мл. Контрольные проверки с использованием мерной колбы объемом $100 \pm 0,1$ мл, показали снижение ошибки в 1,6 раза. Кроме этого проверяли точность разработанной методики с использованием графеносодержащей суспензии на основе глицерина. Контрольное определение концентрации проводили путем трехкратного центрифугирования и замены глицерина водой. После замещения глицерина водой проводили сушку в шкафу до постоянной массы. Расхождение средних значений концентраций графеновых структур, определенных традиционным методом и предлагаемым, не превышало 10 %.

Жидкофазная эксфолиация графита, результаты и обсуждение

Исходную суспензию готовили путем смешивания масла и порошка графита. Концентрацию графита C_0 изменяли от 5 до 20 масс. %. Суспензию загружали в барабан, в котором находилось фиксированное число стержней определенного диаметра. Количество стержней (соединенных между собой) изменяли от 4 до 12. Продолжительность обработки суспензии изменяли дискретно с шагом 3 ч. После окончания процесса эксфолиации суспензию центрифугировали в течение 2 ч при скорости вращения 5000 об./мин. В зоне образования осадка центробежное ускорение было равно 32800 м/с^2 . Предварительно исследовали процесс изменения концентрации графеновых структур в процессе центрифугирования. Установлено, что осаждение частиц графита, а также графеновых структур с большим количеством графеновых слоев, завершается в течение первых 0,5 – 1 ч центрифугирования. Интенсивность процесса образования графеновых структур оценивали по массовой концентрации малослойного и многослойного графена в суспензии. Концентрацию графеновых структур определяли по методике, описанной в предыдущем разделе.

На рисунке 2, а, представлена характерная зависимость концентрации графеновых структур в суспензии C , после часа центрифугирования, от времени обработки в фарфоровом барабане с диаметром 140 мм, при разных скоростях вращения барабана. В данной серии экспериментов концентрации графита в исходной суспензии составляла 10 мг/мл. Из графиков видно, что для практических расчетов зависимости можно считать линейными. На рисунке 2, б, показана зависимость изменения концентрации графеновых структур от концентрации графита в исходной суспензии. Для практических расчетов данную зависимость можно считать линейной. В данном случае, концентрация определялась после обработки исходной суспензии в течение 15 ч, при относительной скорости вращения барабана диаметром 140 мм, равной $\omega_{кр}$.

Если значения концентрации умножить на объем суспензии и разделить на время обработки, то получим производительность барабанной мельницы Q , г/ч, по графеновым структурам. В результате расчета получены следующие значения производительности, г/ч: при $\omega = 0,5\omega_{кр} - 0,038$; $\omega = \omega_{кр} - 0,077$; $\omega = 1,25\omega_{кр} - 0,096$. Если построить график, то получим линейную зависимость производительности барабанной мельницы от относительной скорости ее вращения. При исходной концентрации 20 мг/мл и относительной скорости вращения барабана $1,25\omega_{кр}$ производительность равна 0,192 г/ч. Аналогичные зависимости получены для фарфорового барабана диаметром 200 мм. Анализ полученных данных показал, что зависимости, характеризующие интенсивность процесса от радиуса барабана, можно считать линейными.

Отметим, что одним из преимуществ стержневых барабанных мельниц является легкая масштабируемость реализуемых в них процессов. Производительность барабанной стержневой мельницы диаметром 1,4 м и длиной 1,5 м будет равна

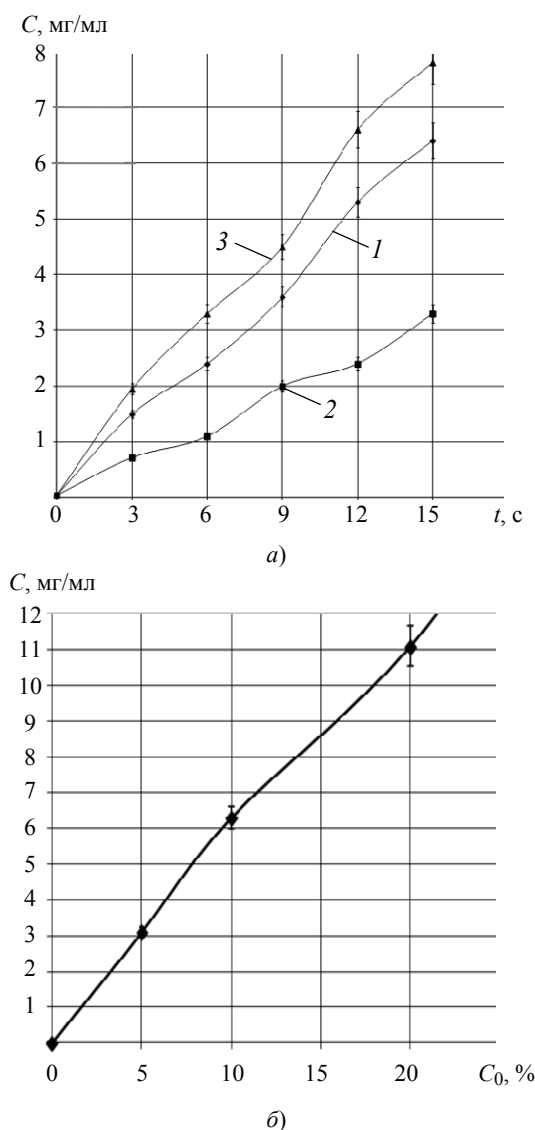


Рис. 2. Изменение концентрации графеновых структур:

a – от времени обработки при скоростях $\omega_{кр} - 1$; $0,5 \omega_{кр} - 2$; $1,25 \omega_{кр} - 3$;

б – от концентрации графита в исходной суспензии

370 г/ч по малослойному и многослойному графену. Учитывая то, что при модифицировании на один килограмм пластичной смазки расходуется один грамм графена, данный барабан обеспечит производство 370 килограмм смазки в час.

Заключение

Исследовано влияние на кинетику процесса эксфолиации графита в стержневой барабанной мельнице следующих параметров: диаметра и скорости вращения барабана; концентрации графита в исходной суспензии. Установлено, что производительность мельницы прямопропорционально зависит от указанных параметров. Предложен и экспериментально проверен экспресс-метод определения концентрации малослойного и многослойного графена в масляных суспензиях. Обос-

нована перспективность использования барабанных стержневых мельниц для получения графеновых суспензий на основе органических жидкостей в производстве пластичных смазок, модифицированных графеновыми структурами.

Список литературы

1. Electric field effect in atomically thin carbon films / K. S. Novoselov [et al.] // *Science*. – 2004. – Vol. 306, No. 5696. – P. 666 – 669.
2. Towards Scale-up of Graphene Production via Non-Oxidizing Liquid Exfoliation Methods / J. Stafford [et al.] // *AIChE Journal*. – 2018. – Vol. 64, Issue 9. – P. 3246 – 3276.
3. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method / Z. Zhang [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2015. – Vol. 16, Issue 1. – P. 2239 – 2251.
4. Modification of epoxy resin by grapheme / K. A. Al-Shiblawi [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2041. – P. 020015.
5. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene–Concrete Composites for Multifunctional Applications / D. Dimov [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Vol. 28, Issue 23. – Art. 1705183 (12 p.)
6. Аль-Шиблави, К. А. Модифицирование цемента малослойным графеном / К. А. Аль-Шиблави, В. Ф. Першин, Т. В. Пасько // *Вектор науки Тольяттинского гос. ун-та*. – 2018. – № 4 (46). – С. 6 – 11. doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11
7. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids / K. R. Paton [et al.] // *Nature materials*. – 2014. – Vol. 13, No. 6. – P. 624 – 630.
8. Получение малослойного графена способом жидкофазной сдвиговой эксфолиации / К. А. Аль-Шиблави [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 143 – 154.
9. Development of environmentally safe lubricants modified by grapheme / V. F. Pershin [et al.] // *Nanotechnologies in Russia*. – 2018. – Vol. 13, No. 5-6. – P. 340 – 344.
10. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene / A. Tkachev [et al.] // *Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology (RAN'19), April, 2019, Rome, Italy*. – Rome, 2019. – Paper No. ICNNFC 105 (2 p.). doi: 10.11159/icnnfc19.105
11. Using a Rod Drum Mill for Graphene Masterbatch Production / G. B. Zhumagaliyeva [et al.] // *AIP Conference Proceedings*, 2018. – 2018. – Vol. 2041, P. 020010. doi: 10.1063/1.5079341

The Effect of Mode and Geometric Parameters on Kinetics of Liquid Phase Shift Exfoliation Process Graphite at Rod Mill

G. B. Zhumagaliyeva¹, A. A. Osipov², V. F. Pershin²

*Department of Mechanical Engineering Technology (1),
Zhangir Khan West - Kazakhstan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan;
Department of Engineering and Technology of Nanoproduction (2),
TSTU, Tambov, Russia; pershin.home@mail.ru*

Keywords: graphite; concentration; low layer graphene; multi-layer graphene; suspension; exfoliation.

Abstract: The effect on the kinetics of the exfoliation process of graphite in a rod drum mill on the following parameters was investigated: the diameter of the drum; drum rotation speed; the concentration of graphite in the original suspension. It has been established that the productivity of a mill directly depends on the specified parameters. An express method is proposed for determining the concentration of multilayer and multilayer graphene in oil suspensions. The perspective use of drum core mills for the production of graphene suspensions based on organic liquids in the production of greases modified with graphene structures has been substantiated.

References

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669.
2. Stafford J., Patapas A., Uzo N., Matar O.K., Petit C. Towards Scale-up of Graphene Production via Non-Oxidizing Liquid Exfoliation Methods, *AIChE Journal*, 2018, vol. 64, issue 9, pp. 3246-3276.
3. Zhang Z., Zhang W., Li D., Sun Y., Wang Z., Hou C., Chen L., Cao Y., Liu Y. Mechanical and Anticorrosive Properties of Graphene/Epoxy Resin Composites Coating Prepared by in-Situ Method, *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, vol. 16, issue 1, pp. 2239-2251.
4. Al-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Jarcev V.P., Pasko T.V. Modification of epoxy resin by grapheme, *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2041, p. 020015.
5. Dimov D., Amit I., Gorrie O., Barnes M.D., Townsend N.J., Neves A.I.S., Withers F., Russo S., Craciun M.F. Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene-Concrete Composites for Multifunctional Applications, *Advanced Functional Materials*, 2018, vol. 28, issue 23, art. 1705183 (12 p.)
6. Al'-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Pas'ko T.V. [Modification of cement by low-layer graphene], *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Togliatti State University], 2018, no. 4 (46), pp. 6-11, doi: 10.18323/2073-5073-2018-4-6-11 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Istrate O.M., King P., Higgins T., Barwich S., May P., Puczkarski P., Ahmed I., Moebius M., Pettersson H., Long E., Coelho J., O'Brien S.E., McGuire E.K., Sanchez B.M., Duesberg G.S., McEvoy N., Pennycook T.J., Downing C., Crossley A., Nicolosi V., Coleman J.N. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids, *Nature materials*, 2014, vol. 13, no. 6, pp. 624-630.
8. Al'-Shiblavi K.A., Pershin V.F., Baranov A.A., Pas'ko T.V. [Production of low-layer graphene by the method of liquid-phase shear exfoliation], *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki* [Scientific and Technical Reports of SPbPU. Natural and engineering sciences], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 143-154. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pershin V.F., Ovchinnikov K.A., Alsilo A.A., Stolyarov R.A., Memetov N.R. Development of environmentally safe lubricants modified by graphene, *Nanotechnology in Russia*, 2018, vol. 13, no. 5-6, pp. 340-344.
10. Tkachev A.G., Zhumagalieva G.B., Al-Hilo Z., Memetov N. R., Galunin E.V., Pershin V.F. Modification of Frost-Resistant Plastic Lubricants Using Few- and Multi-Layered Graphene, *Proceedings of the 4th World Congress on Recent Advances in Nanotechnology* (RAN'19), April, 2019, Rome, Italy, Rome, 2019, Paper no. ICNNFC 105 (2 p.), doi: 10.11159/icnnfc19.105

Auswirkungen von Modus und geometrischen Parametern auf die Kinetik des Prozesses des Flüssigphasenverschiebungspeelings des Graphits in der Stabtrommelmühle

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss auf die Kinetik des Prozesses des Peelings von Graphit in einer Stabtrommelmühle der folgenden Parameter untersucht: des Durchmessers der Trommel; der Rotationsgeschwindigkeit der Trommel; der Konzentration von Graphit in der Originalsuspension. Es ist festgestellt, dass die Produktivität einer Mühle direkt von den angegebenen Parametern abhängt. Zur Bestimmung der Konzentration von Kleinschicht- und Mehrschichtgraphen in Ölsuspensionen ist eine Expressmethode vorgeschlagen. Der perspektivische Einsatz der Verwendung der Stabtrommelmühle zur Herstellung von Graphen- Suspensionen auf Basis organischer Flüssigkeiten bei der Herstellung von mit Graphen- Strukturen modifizierten Fetten ist begründet worden.

Influence des paramètres modaux et géométriques sur la cinétique du procédé d'exfoliation de cisaillement du graphite en phase liquide dans le moulin à tambour

Résumé: Est étudiée l'influence sur la cinétique du processus d'exfoliation du graphite dans le moulin à tambour à tige des paramètres suivants: diamètre du tambour; vitesse de rotation du tambour; concentration du graphite dans la suspension initiale. Est constaté que la productivité du moulin dépend directement des paramètres indiqués. Est proposée la méthode-express de la détermination de la concentration de graphène à faible épaisseur et multicouche dans les suspensions d'huile. Est justifiée la perspective d'utiliser des moulins à tambour pour produire des suspensions de graphène à la base des liquides organiques dans la production de graisses modifiées par des structures de graphène.

Авторы: *Жумагалиева Гаухар Болатовна* – преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан; *Осинов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов»; *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Селиванов Юрий Тимофеевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ЦИКЛИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В СРЕДЕ УГЛЕРОДА

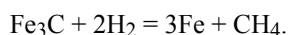
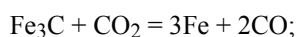
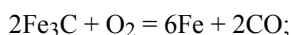
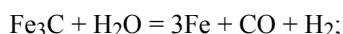
А. И. Буренина, А. П. Королев, М. В. Макаrchук

*Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
г. Тамбов, Россия; korolevanpal@yandex.ru*

Ключевые слова: зеренная структура; механические свойства стали; микроструктура; полный перекристаллизационный отжиг; содержание углерода; углеродистая сталь.

Аннотация: Рассмотрены связи структуры углеродистой стали в качественном и количественном смысле и содержания углерода в ней с процессами термической обработки. Дано описание экспериментов, проведенных в процессе полного перекристаллизационного отжига стали на воздухе и в среде углерода. Показано, что можно контролировать содержание углерода и предотвращать обезуглероживание при многократной термической обработке стали. Представлены процессы, которые нельзя устранить при термоциклировании, например, изменение размера зерна. Отображены и проконтролированы механические свойства углеродистой стали после каждого цикла термообработки.

При производстве деталей машин и механизмов в машиностроительной отрасли иногда требуется подвергать высокоуглеродистые стали многократному отжигу. Например, для изменения формы цементита в структуре заэвтектоидной стали в целях изменения механических и технологических свойств, сплав требуется нагреть выше линии эвтектоидного превращения до 760...780 °C и охладить ниже этой линии до температуры примерно 680 °C не один раз. При этом в процессе длительной выдержки стали при высокой температуре может произойти обезуглероживание [1]. При отжиге на воздухе или в вакууме углерод будет покидать структуру. Механизм обезуглероживания в вакууме или на воздухе разный, но в любом случае содержание углерода уменьшается. В вакууме углерод с поверхности стали испаряется, и создается градиент его концентрации от поверхности образца к сердцевине, являющийся условием термической диффузии углерода к поверхности, с которой продолжается испарение. На воздухе обезуглероживание происходит путем химических реакций [1]. Карбид железа вступает в реакции с парами воды, кислородом, углекислым газом и водородом:



Согласно указанным химическим реакциям, некоторые химические процессы могут стать даже опасными для экологии и техногенными. Например, малые по размеру атомы водорода при высокой температуре диффундируют в кристаллическую решетку стали и взаимодействуют с углеродом карбида железа. Кроме карбида углерод находится, хоть и в небольшом количестве, в твердом растворе внедрения в решетке железа. Этот углерод также соединяется с водородом. Образовавшийся метан создает в структуре механические напряжения, приводящие к «водородной коррозии» и образованию трещин, которые уже вызывали аварии на зарубежных нефтезаводах. Все это говорит о том, что отжиг углеродистых сталей, тем более длительный, надо проводить в защитной среде.

После первого полного отжига на воздухе при температуре 770 °С структура стали с содержанием углерода около 1,2 % будет иметь вид, показанный на микрофотографии (рис. 1, а). Изображение структуры получено не только с помощью оптической, но и с помощью туннельной электронной микроскопии [2].

На микрофотографии видны в структуре зерна «глобулярного» цементита. После проведения повторного и последующих отжигов на воздухе твердость стали уменьшается (рис. 2) [1]. Это связано с понижением содержания углерода на поверхности сплава. Поверхностная структура после нескольких отжигов становится доэвтектоидной (рис. 1, б) [1].

На микрофотографии видны две составляющие доэвтектоидной структуры – перлит и феррит. Вместе с изменением фазового состава (появление в структуре фазы α) происходит и измельчение зерна.

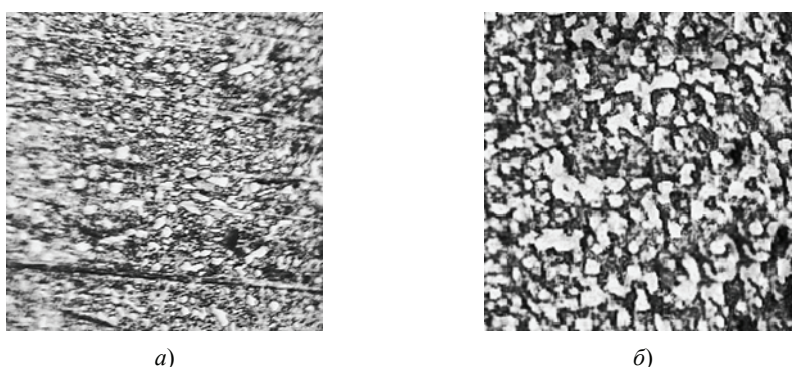


Рис. 1. Микроструктура исследуемого образца стали после первого (а) и второго (б) полных перекристаллизационных отжигов при температуре 770 °С ($\times 650$)

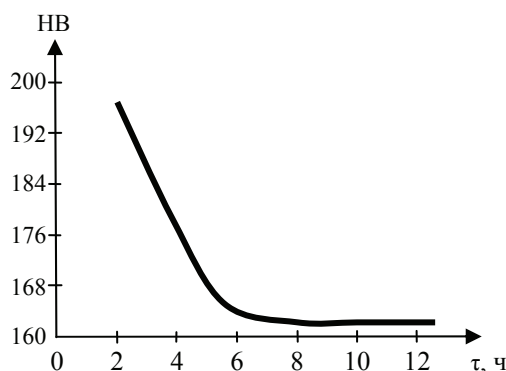


Рис. 2. Зависимость твердости стального образца от времени отжига

Появление нежелательной α -фазы и, соответственно, уменьшение содержания углерода можно предотвратить различными способами. В ходе выполнения работы проведено экспериментальное исследование изменения структуры при многократном циклическом отжиге в среде углерода. Для эксперимента взята представленная выше сталь с содержанием углерода примерно 1,2 %. Отжиг проводили в стальном ящике, погрузив стальной образец в древесный уголь. Это самый доступный технологический способ отжига с сохранением содержания углерода в том количестве, которое было до термообработки. Отжиг проходил при температуре 770 °С. Образец нагревался до заданной температуры в течение 1 ч. Динамика нагрева приведена на рис. 3, а. Диффузия углерода в кристаллической решетке началась уже в процессе нагрева. Данный факт надо учитывать для более точного описания изменения концентрации углерода во времени при нагревании и выдержке. Охлаждение стального образца вместе с печью проходило достаточно медленно, поэтому часть этапа охлаждения нельзя исключить из выдержки при температуре диффузионной подвижности углерода (рис. 3, б).

После отжига в среде углерода твердость образца составила 179 НВ, что соответствует твердости стали с содержанием углерода 1,2 %. Структура после первого отжига приведена на микрофотографии (рис. 4, а).

При большем увеличении ($\times 1250$) на микрофотографии структуры видны глобулярные зерна цементита, образовавшиеся после частичного растворения цементитной сетки перлито-цементитной структуры. Твердость стали после первого

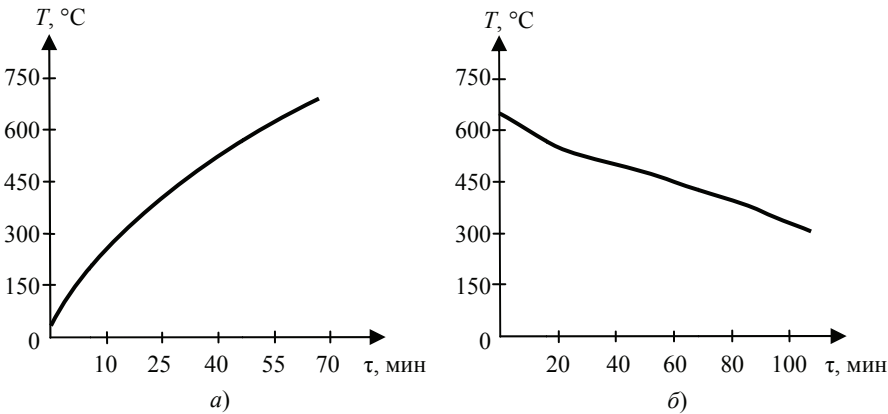


Рис. 3. Динамика нагрева (а) и охлаждения (б) печи с заготовкой

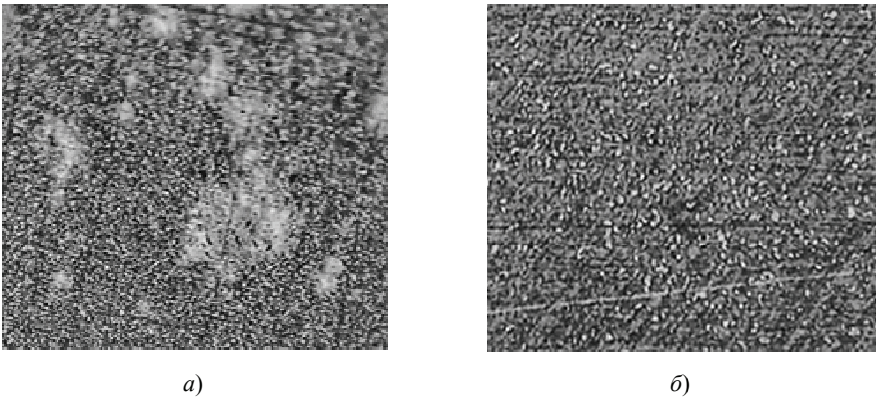


Рис. 4. Микроструктура зернистого перлита стали после первого (а) ($\times 1250$) и седьмого (б) ($\times 650$) отжигов в среде углерода

отжига осталась на том же уровне 176...179 НВ. Такой результат свидетельствует об отсутствии «выгорания» углерода. Далее проведено еще шесть циклов отжига с такими же режимами: выдержка при температуре 770 °С в течение одного часа и последующее охлаждение вместе с печью. После заключительного седьмого отжига структура осталась перлитной, но более однородной, с округлыми зернами цементита (рис. 4, б). Увеличение изображения на снимке в два раза меньше, по сравнению с рис. 4, а, что позволяет увидеть больший фрагмент микроструктуры, на котором изображение зерен цементита мельче. Как показано выше, уже после второго отжига на воздухе структура поверхностного слоя высокоуглеродистой заэвтектоидной стали превращается в феррито-перлитную структуру доэвтектоидной стали. Эксперименты с отжигом в среде углерода показали, что структура остается перлитно-цементитной даже после семи отжигов. Меняется только размер зерна. Твердость образца после седьмого отжига несколько уменьшилась по сравнению с первым отжигом с 170...179 до 163...170 НВ. Это незначительное уменьшение твердости может быть связано с релаксацией напряженных состояний в результате уменьшения количества структурных дефектов при длительном отжиге.

Из вышесказанного следует, что отжиг стали в среде углерода полностью сохраняет содержание углерода в сплаве. В результате отжига меняется форма структурной составляющей – цементита и уменьшается размер зерна. Представленный способ не является единственным в борьбе с обезуглероживанием, но может быть широко использован благодаря простоте и надежности в тех случаях, когда позволяют условия и требования к качеству структуры стали.

Список литературы

1. Влияние многократного отжига на структуру и свойства высокоуглеродистой стали / А. П. Королев [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 337 – 343. doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.337-343

2. Проценко, И. Г. Использование сканирующей зондовой микроскопии для изучения структуры и свойств постоянных магнитов / И. Г. Проценко, А. П. Королев, И. С. Филатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 701 – 707. doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707

Cyclic Annealing of High Carbon Steel in Carbon Environment

A. I. Burenina, A. P. Korolev, M. V. Makarchuk

*Department of Materials and Technology,
TSTU, Tambov, Russia; korolevanpal@yandex.ru*

Keywords: grain structure; mechanical properties of steel; microstructure; complete recrystallization annealing; carbon content; carbon steel.

Abstract: Relationships of the structure of carbon steel in the qualitative and quantitative sense and its carbon content with heat treatment processes are considered. A description of the experiments carried out in the process of complete recrystallization annealing of steel in air and in a carbon environment is given. It is shown that it is possible to control the carbon content and prevent decarburization during repeated heat treatment of steel. The processes that cannot be eliminated during thermal cycling, for example, changing the grain size, are presented. The mechanical properties of carbon steel are displayed and controlled after each heat treatment cycle.

References

1. Korolev A.P., Burenina A.I., Makarchuk M.V., Tolstov N.A. [The influence of multiple annealing on the structure and properties of high carbon steel], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 337-343, doi: 10.17277/vestnik.2018.02.pp.337-343 (In Russ., abstract in Eng.)
 2. Protsenko I.G., Korolev A.P., Filatov I.S. [Use of scanning probe microscopy to study the structure and properties of permanent magnets], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 701-707, doi: 10.17277/vestnik.2015.04.pp.701-707 (In Russ., abstract in Eng.)
-

Zyklisches Glühen von Kohlenstoffstahl in Kohlenstoffumgebung

Zusammenfassung: Es sind die Zusammenhänge der Struktur von Kohlenstoffstahl im qualitativen und quantitativen Sinne und seines Kohlenstoffgehalts mit Wärmebehandlungsprozessen betrachtet. Es ist die Beschreibung der Versuche gegeben, die beim vollständigen Rekristallisationsglühen von Stahl in Luft und in einer Kohlenstoffumgebung durchgeführt wurden. Es ist gezeigt, dass es möglich ist, den Kohlenstoffgehalt zu kontrollieren und eine Entkohlung bei der wiederholten Wärmebehandlung von Stahl zu verhindern. Es werden die Prozesse vorgestellt, die während des thermischen Kreislaufs nicht eliminiert werden können, beispielsweise das Ändern der Korngröße. Die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstoffstahl sind nach jedem Wärmebehandlungszyklus angezeigt und kontrolliert.

Recuit cyclique en acier à haute teneur en carbone dans l'environnement du carbone

Résumé: Sont examinés les liens de la structure de l'acier au carbone dans le sens qualitatif et quantitatif et de la teneur en carbone dans celui-ci avec les processus de traitement thermique. Est donnée une description des expériences menées dans le processus de recuit de recristallisation complète de l'acier dans l'air et dans le milieu du charbon. Est montré qu'il est possible de contrôler la teneur de carbone et d'empêcher la désulfuration lors du traitement thermique multiple de l'acier. Sont présentés les processus qui ne peuvent pas être éliminés lors du thermocyclage, tels que le redimensionnement des grains. Sont affichées et contrôlées les propriétés mécaniques de l'acier de carbone après chaque cycle du traitement thermique.

Авторы: *Буренина Анна Игоревна* – студент; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология»; *Макаrchук Максим Валерьевич* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СТАРЕНИЯ ЦИКЛИЧНЫМ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ-ОТТАИВАНИЕМ ПЕНОПЛЕКСА НА ТВЕРДОСТЬ ПО БРИНЕЛЛЮ

А. В. Ерофеев, Т. И. Горохов, В. М. Данилов

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; kzis@nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: климатические воздействия; моделирование; пеноплекс; схемы старения; твердость по Бринеллю.

Аннотация: В настоящее время при изучении влияния климатических факторов на характеристики различных материалов отдают предпочтение ускоренным (лабораторным) методам старения, которые, в отличие от натуральных методов, позволяют получить результаты за короткий промежуток времени с небольшими трудозатратами. Однако встает вопрос об адекватности принятых схем старения, то есть на сколько принятые схемы дают сопоставимый результат с реальным изменением характеристик материала. В настоящей работе на примере изучения изменения твердости по Бринеллю пеноплекса в зависимости от принятых схем старения (моделирование попеременным замораживанием-оттаиванием) показана важность данной проблемы. Схемы старения характеризуются определенным количеством времени, проведенным образцом в состоянии замачивания и морозильной камере.

Введение

В отличие от механических нагрузок на конструкции инженерных сооружений, определяемых по правилам строительной механики с достаточной степенью точности, «нагрузки» от физико-химических воздействий, или, точнее, вызываемые ими внутренние напряжения в материале могут быть оценены только весьма приближенно. Происходит это потому, что физико-химические воздействия чрезвычайно разнообразны и изменчивы. К тому же агрессивность таких воздействий, наибольшая в месте непосредственного контакта конструкции со средой, обычно резко падает с удалением от поверхности вглубь конструкции и не может быть усреднена. Расчеты же вероятной стойкости материалов в различных средах делаются только на основе огромного количества опытных данных, которые получают в результате натуральных или ускоренных испытаний [1].

Под натурными испытаниями подразумеваются те, методы и условия проведения которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в такой же интервал времени, как и в предусмотренных условиями эксплуатации. Натурные испытания представляют собой испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению, с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта по ГОСТ 16504–81. Натурные испытания реализуются в случае выполнения трех основных условий:

1. Испытаниям подвергается непосредственно изготовленная продукция (то есть объект испытаний) без применения моделей изделия или его составных частей.

2. Испытания проводятся в условиях и при воздействиях на продукцию, соответствующих условиям и воздействиям использования по целевому назначению.

3. Определяемые характеристики свойств объекта испытаний измеряются непосредственно и при этом не используются аналитические зависимости, отражающие физическую структуру объекта испытаний и его составных частей. Допускается использование математического аппарата статистической обработки экспериментальных данных [2].

Натурные испытания являются наиболее достоверным методом определения стойкости материала к факторам климата. Это связано с тем, что в ходе натуральных испытаний происходит комплексное воздействие климатических факторов на исследуемый материал. Данные испытания являются наиболее точными, однако, существенным недостатком натуральных испытаний, является необходимость затраты большого количества времени, что в условиях современного мира и экономики не желательно.

Альтернативой нормальным испытаниям служат ускоренные, при которых материал или изделие исследуется в лабораторных условиях, имитирующих, к примеру, суточные и сезонные климатические изменения. Иными словами, ускоренные испытания позволяют установить изменения свойств материала, которые произойдут на протяжении одного сезона эксплуатации, за значительно меньшее время. Таким образом, под ускоренными испытаниями понимаются методы и условия проведения, которых обеспечивают получение необходимого объема информации о характеристиках свойств объекта в более короткий срок, чем при нормальных условиях [3].

Отсутствие необходимости затраты значительного количества времени при испытании материалов, на первый взгляд, выгодно отличает ускоренные испытания от испытаний, проводимых в реальных условиях. Однако при этом стоит понимать, что принятая схема старения материала будет иметь высокую степень влияния на конечный результат. Для наглядного отображения такого влияния в настоящей работе поставлена цель экспериментально определить твердость по Бринеллю пеноплекса, подверженного циклическому замораживанию-оттаиванию по трем различным схемам.

Методология проведения испытаний

Ускоренное старение циклами замораживания-оттаивания в лабораторных условиях проводится по трем схемам, в ходе каждой из которых происходит однократное замачивание, замораживание и оттаивание. Опыт проводится следующим образом. Образцы в количестве тридцати штук помещаются в воду на заданное для данной схемы старения время, затем извлекаются из воды и помещаются в морозильную камеру также на установленное время, после чего извлекаются и просушиваются при комнатной температуре до полного высыхания. Затем цикл повторяется в указанной последовательности. В ходе ускоренного старения проведено тридцать циклов в рамках каждой из схем. Схемы старения характеризуются определенным временем, проведенным образцом в состояниях замачивания и замораживания в морозильной камере при $t = -20^{\circ}\text{C}$. По первой схеме время замачивания и замораживания составляет соответственно по одному часу; по второй – по два часа; по третьей – по три часа [4].

Для того чтобы определить каким образом окружающая среда воздействует на утеплитель, работающий непосредственно в теле ограждающей конструкции жилого здания в системе вентилируемого фасада, сконструирован экспериментальный стенд, представляющий собой модель вентилируемого фасада, облицо-

ванного керамогранитными плитами (рис. 1, а). В качестве утеплителя применен «Пеноплекс Комфорт», облицовка выполнена из ПВХ панелей, имеющих вертикальные и горизонтальные прорезы, позволяющие имитировать зазоры между керамогранитными плитами. Конструкция выполнена с соблюдением технических требований. Также выполнен стенд без защитной облицовки утеплителя (рис. 1, б).

Стенды смонтированы на наружной стене жилого здания. Время эксплуатации стендов в реальных условиях составило один сезон, в течение которого наблюдались колебания температур от положительных значений до отрицательных, а также воздействия различных атмосферных факторов окружающей среды, таких как УФ-излучение, осадки, циклическое замораживание-оттаивание [5]. По истечению заданного времени, со стендов были удалены плиты пеноплекс, для которых проведены испытания по определению твердости по Бринеллю.

Выявленные характеристики после естественного старения материала в течение одного сезона работы в конструкции подлежат сравнению с характеристиками пеноплекса, подверженного ускоренному старению циклами замораживания-оттаивания в лабораторных условиях.

Испытания на твердость проводились на установке, состоящей из станины, штока и шарика диаметром 10 мм, установленного на конце штока (рис. 2). Также применялся индикатор часового типа с точностью измерения 0,01 мм. Испытания проводились в строго определенной последовательности. Образец размерами 25×30×25 мм помещался под шток, нагружался постоянной нагрузкой, с помощью индикатора часового типа фиксировалась глубина погружения шарика в образец, штангенциркулем измерялся диаметр отверстия, твердость по Бринеллю HBW определялась по формуле

$$HBW = 0,102 F / \left(\frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right), \quad (1)$$

где F – приложенная нагрузка, Н; D , d – соответственно диаметры шарика и отпечатка, мм.

Для получения одного значения брали для испытания шесть образцов.

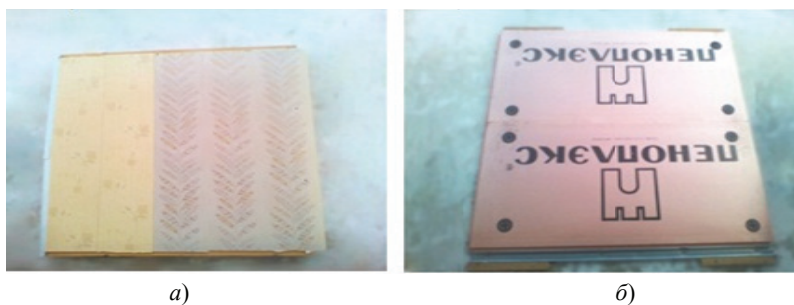


Рис. 1. Модель вентилируемого фасада с облицовкой (а) и без облицовки (б)

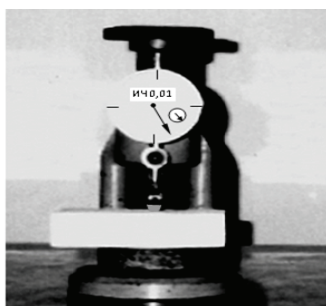


Рис. 2. Установка для испытаний на твердость

Анализ влияния схемы старения циклическим замораживанием-оттаиванием пеноплекса на твердость по Бринеллю

Наглядно влияние на твердость пеноплекса ускоренного старения циклами замораживания-оттаивания по заданным схемам представлено графиком (рис. 3), из которого видно, что твердость утеплителя снижается с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания. Зависимость изменения твердости для схемы старения 1×1 описывается уравнением

$$y = 0,00004x^2 - 0,0025x + 0,5049, \quad (2)$$

при этом величина коэффициента аппроксимации составляет $R^2 = 0,8416$.

Твердость образцов, находившихся в состоянии замачивания в течение одного часа и в условиях замораживания такой же период времени, после 30 циклов составила 0,470 МПа, что соответствует падению прочности на 7,3 %.

Для схемы 2×2 зависимость изменения твердости описывается уравнением

$$y = 0,0002x^2 - 0,0115x + 0,5065, \quad (3)$$

при этом коэффициент аппроксимации составляет $R^2 = 0,9795$.

После 30 циклов замораживания-оттаивания при схеме старения, в ходе которой образец находился по два часа в состоянии замачивания и в морозильной камере, твердость составила 0,353 МПа, что соответствует падению прочности на 30,4 %.

Для схемы 3×3 зависимость изменения прочности при поперечном изгибе описывается уравнением

$$y = 0,0002x^2 - 0,0121x + 0,5004, \quad (4)$$

при этом коэффициент аппроксимации составляет $R^2 = 0,9798$.

После 30 циклов замораживания-оттаивания при схеме старения, в ходе которой образец находился по три часа в состоянии замачивания и в морозильной камере, прочность при поперечном изгибе составила 0,344 МПа, что соответствует падению прочности на 32,15 %.

При испытании на твердость, прослеживается та же зависимость что и при испытании на поперечный изгиб, а именно резкое падение значений твердости в первые 10 циклов замораживания-оттаивания. Так, для схемы 2×2 значение твердости HBW = 0,399 МПа, что соответствует уменьшению на 21,3 %, при том что за последующие 20 циклов твердость уменьшится на 9,1 %.

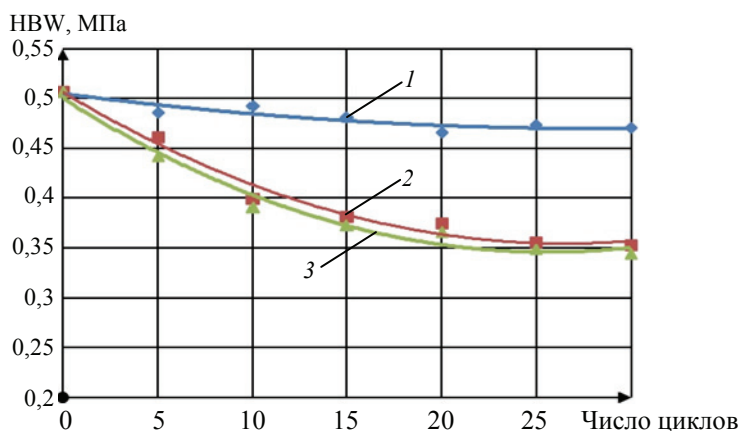


Рис. 3. Графики зависимостей твердости от числа циклов замораживания-оттаивания для схем старения:

1 – 1×1; 2 – 2×2; 3 – 3×3

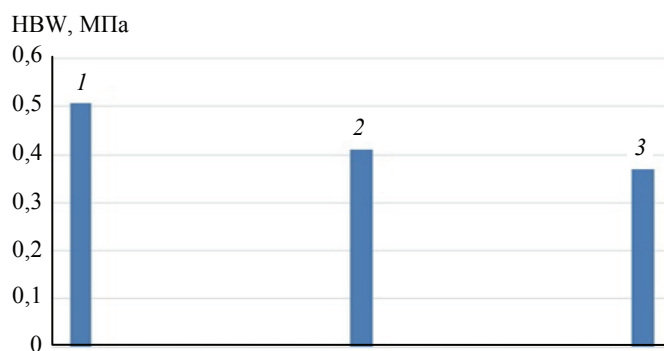


Рис. 4. Значение величины твердости от условий старения материала для образцов:
1 – исходного; 2 – в вентфасаде; 3 – без облицовки

Для схемы 3×3 после 10 циклов наблюдается уменьшение твердости на 22,9 % при значении показателя 0,391 МПа, тогда как после оставшихся 20 циклов значения твердости составит 0,344 МПа или 32,15 %. Иные значения изменения показателей HBW наблюдаются при схеме старения 1×1. При данной схеме ускоренного старения, после 10 циклов не происходит резкого падения твердости. Уменьшение значений происходит равномерно и незначительно. После 10 циклов замораживания-оттаивания значение твердости составляет 0,498 МПа, что соответствует снижению на 1,8 %, а после 30 циклов – 7,3 %.

Таким образом, в ходе испытаний выявлено, что при схеме старения 1×1 падение твердости является незначительным. Для схем 2×2 и 3×3 изменение твердости после 30 циклов является более весомым и составляет 30,4 и 32,15 % соответственно. Это объясняется тем, что образцы проводили больше времени в состоянии замачивания и замораживания. Тем самым пагубное влияние при переходе воды из жидкого состояния в твердое с увеличением в объеме, прямо зависит от времени замораживания-оттаивания.

При испытаниях на твердость образцов, изготовленных из утеплителя пеноплекс, подверженному старению в реальных условиях на экспериментальном стенде, моделирующим «вентилируемый фасад», получены следующие данные: образцы, находившиеся непосредственно в конструкции вентиляруемого фасада, имеют значение твердости HBW = 0,41 МПа, что соответствует 19,13 % снижению твердости. Наименьшую твердость имеют образцы, находившиеся без облицовки на экспериментальном стенде. Значение твердости HBW составляет 0,37 МПа, что соответствует 27,02 % падению твердости. Это обусловлено влиянием ультрафиолетового излучения, всевозможных атмосферных воздействий, от которых не был защищен утеплитель. Наглядно влияние условий эксплуатации на твердость пеноплекса в системе вентиляруемого фасада представлено на рис. 4.

Заключение

Полученные экспериментальные значения твердости по Бринеллю позволяют утверждать, что при моделировании неблагоприятных воздействий важным является правильный выбор параметров, позволяющих получить сопоставимые результаты с реальным воздействием.

Список литературы

1. Ерофеев, А. В. Неблагоприятные воздействия и их влияние на работоспособность строительных материалов / А. В. Ерофеев, Е. А. Муравьев, Т. С. Поздникаина // Синергия Наук. – 2017. – № 14. – С. 377 – 382.

2. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16504–74 ; введ.1982–01–01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 27 с.

3. Ерофеев, А. В. Влияние циклов замораживания – оттаивания на изменение теплозащитных качеств утеплителя / А. В. Ерофеев, В. Ю. Деревякина, Е. А. Муравьев // Устойчивое развитие региона : архитектура, строительство, транспорт : Материалы 4-й Междунар. науч.-практ. конф. института архитектуры, строительства и транспорта Тамб. гос. техн. ун-та, 15-16 июня 2017 г., Тамбов. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2017. – С. 241 – 244.

4. Иванов, Д. В. Повышение физико-механических характеристик и долговечности пенополистирола / Д. В. Иванов, В. П. Ярцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 529 – 534.

5. Andrianov, K. A. Influence of Composition on the Strength, Durability and Thermal Stability of Polystyrene Foam / K. A. Andrianov, V. P. Yartsev // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 331 – 335.

The Impact of Aging Patterns of Cyclic Freezing-Thawing on Brinell Hardness of Penoplex

A. V. Erofeev, T. I. Gorokhov, V. M. Danilov

Department of Buildings and Structures, TSTU, Tambov, Russia; kzis@nnn.tstu.ru

Keywords: climatic effects; modeling; penoplex; aging pattern; Brinell-hardness.

Abstract: At present, when studying the influence of climatic factors on the characteristics of various materials, preference is given to accelerated (laboratory) methods of aging. These methods, in contrast to natural methods, allow obtaining results in a short period of time with little effort. However, the question arises about the adequacy of the adopted aging patterns, i.e., how effective are the adopted patterns with a real change in the characteristics of the material. In this paper, using the example of studying the Brinell hardness variation in Penoplex as a function of the accepted aging schemes (simulation by alternate freezing and thawing), the importance of this problem is shown. Aging patterns are characterized by a certain amount of time spent by the sample in the soaking state and in the freezer.

References

1. Yerofeyev A.V., Murav'yev Ye.A., Pozdnikina T.S. [Unfavorable effects and their effect on the performance of building materials], *Sinergiya Nauk* [Synergy of Sciences], 2017, no. 14, pp. 377-382. (In Russ., abstract in Eng.)

2. GOST 16504–81. *Sistema gosudarstvennykh ispytaniy produktsii. Ispytaniya i kontrol' kachestva produktsii. Osnovnyye terminy i opredeleniya* [System of state testing of products. Testing and quality control of products. Basic terms and definitions], Moscow: Standartinform, 2011, 27 p. (In Russ.)

3. Yerofeyev A.V., Derevyakina V.Yu., Murav'yev Ye.A. *Ustoychivoye razvitiye regiona: arkhitektura, stroitel'stvo, transport: materialy 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Sustainable development of the region: architecture, construction, transport: Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference of the Institute of Architecture, Construction and Transport of Tambov State Technical University], 15-16 June, 2017, Tambov, Tambov: Izdatel'stvo Pershina R.V., 2017, pp. 241-244. (In Russ.)

4. Ivanov D.V., Yartsev V.P. [Enhancing the physicomachanical characteristics and the long-eternity of expanded polystyrene], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 529-534. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Andrianov K.A., Yartsev V.P. Influence of Composition on the Strength, Durability and Thermal Stability of Polystyrene Foam, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 331-335. (In Eng., abstract in Russ.)

Die Wirkung des Alterungszyklusmusters durch Einfrieren-Auftauen von Schaumstoff nach Brinellhärte

Zusammenfassung: Derzeit werden bei der Untersuchung des Einflusses klimatischer Faktoren auf die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe beschleunigte (Labor-) Alterungsmethoden bevorzugt. Im Gegensatz zu natürlichen Methoden können mit diesen Methoden in kurzer Zeit mit geringem Arbeitsaufwand Ergebnisse erzielt werden. Es stellt sich jedoch die Frage nach der Angemessenheit der verabschiedeten Alterungsschemata, d.h. wie viele akzeptierte Schemata bei einer tatsächlichen Änderung der Materialeigenschaften zu einem vergleichbaren Ergebnis führen. In diesem Artikel wird am Beispiel der Untersuchung der Schaumstoffänderung nach Brinellhärte als Funktion der akzeptierten Alterungsschemata (Simulation durch abwechselndes Einfrieren und Auftauen) die Bedeutung dieses Problems gezeigt. Alterungsmuster sind durch eine bestimmte Zeit, durch die im Einweich- und Gefrierzustand durchgeführte Probe gekennzeichnet.

Influence du régime de vieillissement par congélation-décongélation cyclique de la mousse sur la dureté d'après Brinell

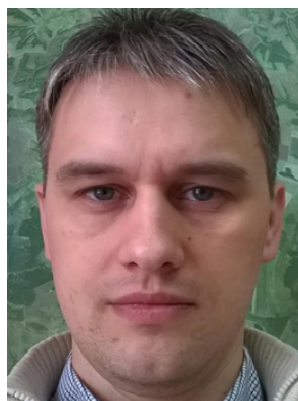
Résumé: Actuellement, lors de l'étude de l'influence des facteurs climatiques sur les caractéristiques des différents matériaux, les méthodes du vieillissement accélérées (en laboratoire) sont préférées. Ces méthodes, contrairement aux méthodes naturelles, permettent d'obtenir des résultats dans une courte période de temps avec peu de ressources travail. Cependant, la question se pose de savoir si les schémas du vieillissement adoptés sont adéquats, c'est-à-dire dans quelle mesure les schémas adoptés donnent un résultat comparable à un changement réel des caractéristiques du matériau. Dans le présent article, l'étude de l'évolution de la dureté de la mousse de Brinell en fonction des schémas du vieillissement adoptés (modélisation de la décongélation alternée) montre l'importance de ce problème. Les schémas du vieillissement sont caractérisés par une certaine quantité de temps passé par l'échantillon dans un état de trempage et de congélation.

Авторы: *Ерофеев Александр Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Горохов Тимофей Иванович* – студент; *Данилов Владислав Михайлович* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Бондарев Борис Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения и дорожных технологий, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, Россия.

Корнаев Алексей Валерьевич

Kornaev Alexey



Старший научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории «Моделирование гидромеханических систем», доцент кафедры «Мехатроника, механика и робототехника» ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», г. Орел.

06 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.07 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию «Моделирование течений сред сложной реологии в тонких каналах гидромеханических систем» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» на кафедре «Мехатроника, механика и робототехника».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор Л. А. Савин.

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы снижения потерь энергии течений вязких сред в тонких каналах с эффектом возникновения гидродинамической подъемной силы. Основное противоречие рассматриваемой проблемы заключается в том, что гидродинамический эффект как способ борьбы с трением не может существовать без трения. Идея поиска решения проблемы и разрешения противоречия основана на изучении влияния на процесс течения сложных реологических свойств сред и неоднородной вязкости.

В работе решен комплекс задач по формированию и теоретическому обоснованию концепций снижения потерь энергии за счет свойств сред. Разработаны новые математические и численные методы, реализованные в виде программ, обладающие универсальностью и позволяющие повысить точность расчета. Теоретически обоснован способ реологических испытаний известных и перспективных сред сложной реологии.

На основании результатов физических и вычислительных экспериментов по исследованию гидромеханических систем, функционирующих в режиме жидкостного трения, дана оценка влияния некоторых видов добавок к маслам на характеристики жидкостного трения. Выработан комплекс рекомендаций по совершенствованию материалов и условий функционирования технических систем, обозначены перспективные направления дальнейших исследований.

Решением ВАК Минобрнауки России от 07 мая 2019 года № 415/н Корнаеву А. В. присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: математическое моделирование, механика сплошных сред, численные методы, вычислительная гидродинамика.



Хромченко Оксана Николаевна

Khromchenko Oksana

Химик-аналитик в Муниципальном унитарном предприятии «Энгельс–Водоканал» Энгельсского муниципального образования Саратовской области, г. Энгельс.

25 сентября 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.06 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Научные основы технологии получения катодно-синтезированных сплавов системы CuPbBiCa как эффективного электродного материала кальций-ионных аккумуляторов» на соискание ученой степени доктора химических наук по специальности 05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Работа выполнена на кафедре «Химические технологии» (ныне кафедра «Технология и оборудование химических, нефтегазовых и пищевых производств») Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А.».

Научный консультант – д-р хим. наук, профессор С. С. Попова.

В диссертационной работе разработана научно-обоснованная технология изготовления и эксплуатации CuBiCa- и CuPbBiCa-электродов для кальций-ионных аккумуляторов и схема их получения в цикле замкнутого водооборота с локальной очисткой промывных вод и неводного растворителя. Предложены физико-химические способы активации электродов для кальций-ионных аккумуляторов, работающих по принципу электрохимического внедрения. Доказана эффективность активации третьим компонентом (легирующими металлами Pb, Bi) металлических электродов из меди и свинца, проявляющаяся в повышении кинетических характеристик, увеличении эффективности и длительности циклирования и удельной емкости композитных электродов, как функция природы активатора. Введен принципиально новый способ синтеза получения кальциевых сплавов, а именно электрохимического (катодного) внедрения, позволяющий избежать появления нежелательных примесей в структуре сплава.

Определены кинетические режимы (величина потенциала при катодной поляризации, концентрация и температура растворов солей, время проведения процесса), позволяющие получить катодно-синтезированные электроды состава CuBiCa, CuPbBiCa. Создана электрохимическая модель металл-ионного кальциевого аккумулятора на матричной основе.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы специалистами, занимающимися разработкой и производством электрохимических систем для организации технологического процесса получения матричных электродов использующихся в качестве анода кальций-ионных аккумуляторов.

Решением ВАК Минобрнауки России от 29 декабря 2018 года № 453/нк Хромченко О. Н. присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: получение эффективного электродного материала кальций-ионных аккумуляторов.

Климов Дмитрий Владимирович

Младший научный сотрудник управления фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВО «ТГТУ».

14 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Термохимическое разложение гранулированной биомассы в кипящем слое и его аппаратурно-технологическое оформление» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент С. Н. Кузьмин.

Работа выполнена на кафедре «Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: кинетика и аппаратурно-технологическое оформление термохимических процессов в кипящем слое.

Кошкарова Анна Геннадьевна

Старший преподаватель кафедры физики и математики Пятигорского медико-фармацевтического института – филиала ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет».

21 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Интенсификация процессов экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья импульсным электрическим полем высокой напряженности» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. Т. Казуб.

Работа выполнена на кафедре физики и математики Пятигорского медико-фармацевтического института – филиала ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации и на кафедре «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: процессы и оборудование для экстрагирования биологически-активных веществ из растительного сырья при наложении электрического поля.

Слезин Кирилл Анатольевич

Соискатель кафедры «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ», учитель МАОУ «Лицей №14 имени Заслуженного учителя Российской Федерации А. М. Кузьмина».

18 апреля 2019 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.05 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Аналитические и процедурные модели интеллектуальной геоинформационной системы визуализации контуров лесных пожаров» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.25.05 – Информационные системы и процессы.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Ю. Ю. Громов.

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: теоретические и информационные аспекты обеспечения функционирования информационных систем поддержки принятия решений при оценке распространения и последствий лесных пожаров.

Снятков Алексей Николаевич

Преподаватель ФГКВОУ ВО «Военный университет» МО РФ, г. Москва.

23 июня 2018 года на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.169.03, созданного при ФГБОУ ВО «Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского», ФГБОУ ВО «ТГТУ», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», защитил диссертацию на тему «Развитие системы физической культуры и спорта города Москвы в 1991 – 2012 гг.» на соискание ученой степени кандидата исторических наук по специальности 07.00.02 – Отечественная история.

Научный руководитель – д-р ист. наук, профессор А. А. Слезин.

Работа выполнена на кафедре «История и философия» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: социально-политическая история; военная история; методика преподавания.

Туев Максим Алексеевич

Аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

21 декабря 2018 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Виброреологические эффекты в гравитационном потоке неоднородных зернистых сред и их технологическое применение» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор В. Н. Долгунин.

Работа выполнена в лаборатории «Механика сдвиговых течений зернистых сред» кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Область научных интересов: эффекты взаимодействия неоднородных частиц в быстрых сдвиговых течениях зернистых сред.