

# Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал  
№ 1 (132)/2026 Том 1

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

- **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

- **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

- **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.

# СОДЕРЖАНИЕ

## МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

*Илюшечкин Н.В.*

О СУММАХ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ.....3

## ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Ибрагимов Н Ю.*

ТЕРМИЧЕСКИЕ деформации СТЕКЛЯННОГО ПOKРЫТИЯ ТРУБЫ .....7

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Королев М.Н.*

ТРАНСГРАНИЧНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И РЕГУЛЯТОРНЫЕ ВЫЗОВЫ ..... 13

*Кривяков П.М.*

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ КРУПНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ: ПРОБЛЕМА ИЗМЕРИМОСТИ И УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ АТРИБУЦИИ РЕЗУЛЬТАТА ..... 21

*Le Minh Hoang, Vu Ngoc Vinh, Dao Van Luc*

VARIABLE STRUCTURE MULTI-MODEL ALGORITHM FOR TRACKING SURFACE MANEUVERING TARGETS ..... 25

*Поремов Е.С.*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ПЕРСОНАЛА ..... 31

*Соболева И.В., Ляшенко С.Е.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ДИГИДРАТНО-ПОЛУГИДРАТНОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ ..... 37

*Яблонская Е.К., Мачнева Н.Л., Гнеуш А.Н.*

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНДОГЕННЫХ АМИНОКИСЛОТ НА РОСТ И СКОРОСТЬ ПРИРОСТА БИОМАССЫ КУЛЬТУРЫ CLORELLA ..... 41

**МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

УДК 512.643.5

**О СУММАХ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ***Илюшечкин Никита Васильевич**АО «Концерн «Моринформсистема – Агат»**Россия, г. Москва***ON THE SUMS OF ROOTS OF THE CHARACTERISTIC EQUATION***Ilyushechkin Nikita Vasil'evich**Joint Stock Company "Concern Morinformsystem – Agat"**Russia, Moscow***АННОТАЦИЯ**

Поведение решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений в окрестности положения равновесия зависит от наличия или отсутствия резонансов у этой системы. При отсутствии резонансов правая часть системы может быть приведена к своей линейной форме. Напомним, что резонансами называются некоторые целочисленные соотношения между собственными значениями матрицы линейного приближения системы. В статье исследуется наличие некоторых простейших резонансов системы, порождённых равенством нулю суммы определённого числа корней характеристического уравнения системы. Матрица системы предполагается комплексной. Рассматривается произведение всех возможных упомянутых сумм собственных чисел. Выводится формула, выражающая это произведение через элементы исходной матрицы. Для вывода этой формулы строится линейный оператор преобразования пространства внешних форм определённого порядка. Найденную формулу можно рассматривать как обобщение формулы Орландо. С её помощью можно определять наличие некоторых простейших резонансов у систем автономных дифференциальных уравнений.

**ABSTRACT**

When studying an autonomous system of differential equations, the behavior of its solutions in the vicinity of the equilibrium position is of great importance. This behavior depends on the presence or absence of resonances in the system under consideration. In the absence of resonances, its right-hand side can be reduced to its linear form. A system of eigenvalues of a matrix of linear form is called resonant if one of these eigenvalues is an integer linear combination of the other eigenvalues with positive coefficients. The sum of these coefficients is called the resonance order. This article presents a method for recognizing the presence of certain simple resonances of the system, generated by the equality to zero of the sum of a certain number of roots of its characteristic equation. The product of all possible aforementioned sums of eigenvalues is considered. A formula is derived expressing this product in terms of the elements of the original matrix. To derive this formula, a linear operator is constructed for transforming the space of external forms of a certain order. Using this formula, the presence of certain simple resonances can be determined.

**Ключевые слова:** характеристический многочлен, собственные числа, резонанс, формула Орландо, внешняя форма, тензор, свёртка, линейный оператор, жорданова форма.

**Keywords:** characteristic polynomial, eigenvalues, resonance, Orlando formula, exterior form, tensor, convolution, linear operator, Jordan form.

**Введение**

Предположим, что имеется автономная система обыкновенных дифференциальных комплексных уравнений

$$\dot{u} = Zu + \dots, \quad (1)$$

где  $Z$  – комплексная квадратная матрица порядка  $n$ ,  $u = (u_1, \dots, u_n)$  – неизвестная комплексная вектор-функция, а многоточие обозначает члены степени два и выше от переменных  $u_1, \dots, u_n$ . Правая часть системы (1) предполагается аналитической в окрестности точки  $u = (0, \dots, 0)$ . Также предполагается, что собственные числа  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  матрицы  $Z$  попарно различны и отличны от нуля. Набор собственных

чисел  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  называется резонансным [1, с. 210], если между ними имеется целочисленное соотношение вида  $\lambda_s = m_1\lambda_1 + \dots + m_n\lambda_n$ , где все целые числа  $m_j \geq 0$  и  $m = m_1 + \dots + m_n \geq 2$ . Число  $m$  называется при этом порядком резонанса. Теорема Пуанкаре утверждает, что если собственные числа матрицы  $Z$  нерезонансны, то система (1) заменой переменных  $u = v + \dots$  приводится к линейной системе  $\dot{v} = Zv$ , что существенно упрощает её качественное исследование. Таким образом, наличие резонансов у собственных значений матрицы  $Z$  затрудняет исследование системы (1). При этом чем меньше порядок резонанса, тем большее влияние этот резонанс оказывает на поведение решений системы в окрестности её нулевого решения (в частности, на

его устойчивость). Настоящая статья посвящена обнаружению некоторых простейших резонансов системы (1), порождённых соотношениями вида

$$\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k} = 0, \quad (2)$$

где  $k < n$  и  $i_1 < \dots < i_k$ . Для простоты предположим, что  $\lambda_1 + \dots + \lambda_k = 0$ . Тогда набор собственных значений  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  является резонансным, с резонансом  $\lambda_1 = 2\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k$  порядка  $k + 1$ .

### Основная часть

В работе [2] был доказан вариант формулы Орландо [3, Глава 5, § 34] для характеристического многочлена произвольной матрицы. Именно, пусть  $Z = (z_{jl})$  – комплексная квадратная матрица порядка  $n$ , а  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – её собственные числа с учётом их кратностей. В [2] выведена формула

$$\prod_{j < l} (\lambda_j + \lambda_l) = \det Z^\downarrow, \quad (3)$$

где  $Z^\downarrow$  – вспомогательная матрица порядка  $n(n-1)/2$ , элементы которой являются весьма простыми линейными формами от элементов  $z_{jl}$  матрицы  $Z$ . Ниже будет выведено обобщение формулы (3) для произведения всех сумм вида  $\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k}$ , где  $k < n$  и  $i_1 < \dots < i_k$ . В частности, если упомянутое произведение равно нулю, то равна нулю и одна из сумм, что даёт резонанс порядка  $k + 1$ .

Символом  $L = \mathbb{C}^n$  мы будем обозначать комплексное пространство размерности  $n$ , а символом  $Mat_{\mathbb{C}}(n)$  – пространство квадратных комплексных матриц порядка  $n$ . Базис этого пространства образуют матрицы  $E_{jl}$  при  $j, l = 1, \dots, n$ , содержащие единицу на пересечении строки с номером  $j$  и столбца с номером  $l$ , и нули на всех остальных местах. Нам понадобится также пространство  $\Lambda^k(L)$  всех кососимметрических (внешних [4, Глава 15, § 1]) форм степени  $k$  над пространством  $L$ . Пусть  $e_1, \dots, e_n$  – некоторый базис пространства  $L$ , а  $e^1, \dots, e^n$  – двойственный ему базис сопряжённого с  $L$  пространства  $L^*$  линейных форм на пространстве  $L$ . Базис пространства  $\Lambda^k(L)$  образуют формы  $e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}$ , где  $i_1 < \dots < i_k$ . Мы полагаем, что

$$e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k} = \sum_{\sigma} \varepsilon_{\sigma} e^{i_{\sigma(1)}} \otimes \dots \otimes e^{i_{\sigma(k)}}, \quad (4)$$

где суммирование распространено на все подстановки  $\sigma$  множества  $\{1, \dots, k\}$ , без деления на  $k!$ . Здесь  $\varepsilon_{\sigma}$  – знак подстановки  $\sigma$ . Размерность пространства  $\Lambda^k(L)$  равна числу сочетаний из  $n$  по  $k$ .

Для элементов произвольной матрицы  $Z \in Mat_{\mathbb{C}}(n)$  временно будем использовать тензорное обозначение  $z_l^j$  ( $j$  – номер строки,  $l$  – номер столбца). При фиксированных базисах  $e_1, \dots, e_n$  и  $e^1, \dots, e^n$  этой матрице сопоставляется билинейный

функционал на произведении  $L \times L^*$ , который мы будем обозначать как  $\mathbf{Z}$  (прямой жирный шрифт):

$$\mathbf{Z}(x; \xi) = \sum_{j,l=1}^n z_l^j x^l \xi_j, \quad (5)$$

где  $x = x^l e_l$ ,  $\xi = \xi_j e^j$  (в обеих формулах знак суммы опускаем в соответствии с обозначениями Эйнштейна). Значение  $\mathbf{Z}(x; \xi)$  определено инвариантно, то есть не зависит от выбора базиса  $e_1, \dots, e_n$ .

Произвольная внешняя форма  $A \in \Lambda^k(L)$  является полилинейной функцией векторных аргументов  $x_1, \dots, x_k \in L$ , причём значение этой функции равно нулю, если какие-либо два её аргумента равны между собой:  $A(x_1, \dots, x_k) = 0$ , если  $x_r = x_s$  при  $1 \leq r < s \leq k$ . Отсюда следует, что при перестановке любых двух аргументов функции  $A$  она меняет знак. Произвольной матрице  $Z = (z_l^j)$  сопоставим линейный оператор

$$Z^{\square, k}: \Lambda^k(L) \rightarrow \Lambda^k(L), \quad (6)$$

действующий в базисах  $e_1, \dots, e_n$  и  $e^1, \dots, e^n$  по формуле  $Z^{\square, k}(A) = \tilde{A}$ , где

$$\tilde{A}(x_1, \dots, x_k) = \sum_{p=1}^k \sum_{i=1}^n A(x_1, \dots, x_{p-1}, e_i, x_{p+1}, \dots, x_k) \mathbf{Z}(x_p; e^i). \quad (7)$$

Здесь при каждом  $p = 1, \dots, k$  сначала выполняется умножение полилинейных функций, а затем свёртка [5, с. 65] получившегося произведения по одному из векторных и единственному ковекторному аргументу. Поэтому предложенное определение инвариантно, то есть не зависит от выбора базиса  $e_1, \dots, e_n$ . Докажем теперь кососимметричность формы  $\tilde{A}(x_1, \dots, x_k)$ . Пусть равны аргументы  $x_r = x_s = x$  при  $r < s$ . Тогда в сумме (7) равны нулю все слагаемые с  $p \neq r$  и  $p \neq s$  в силу кососимметричности формы  $A$ . Осталось рассмотреть слагаемые, соответствующие случаям  $p = r$  и  $p = s$ . В этих случаях имеем суммы

$$\sum_{i=1}^n A(x_1, \dots, x_{r-1}, e_i, x_{r+1}, \dots, x_k) \mathbf{Z}(x; e^i) \quad (8)$$

и

$$\sum_{i=1}^n A(x_1, \dots, x_{s-1}, e_i, x_{s+1}, \dots, x_k) \mathbf{Z}(x; e^i). \quad (9)$$

В первой сумме при данном  $i$  на месте  $r$  в форме  $A$  стоит аргумент  $e_i$ , а на месте  $s$  – аргумент  $x$ . Во второй сумме на месте  $r$  в форме  $A$  стоит аргумент  $x$ , а на месте  $s$  – аргумент  $e_i$ . Все остальные аргументы одинаковы. Поэтому

$$A(x_1, \dots, x_{r-1}, e_i, x_{r+1}, \dots, x_k) = -A(x_1, \dots, x_{s-1}, e_i, x_{s+1}, \dots, x_k). \quad (10)$$

Следовательно, суммы (8) и (9) противоположны и  $\tilde{A}(x_1, \dots, x_k) = 0$ . Итак, оператор  $Z^{\square, k}$  действительно отображает

пространство  $\Lambda^k(L)$  в себя и определён инвариантно. Матрицу этого оператора в базисе  $\{e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}\}$  обозначим через  $Z^{\downarrow,k}$ . Посмотрим, как изменится определитель  $\det Z^{\downarrow,k}$  этой матрицы при замене базиса  $e_1, \dots, e_n$  пространства  $L$ . Пусть  $f_1, \dots, f_n$  – другой базис этого пространства и  $V$  – матрица перехода от первого базиса ко второму. Тогда матрица  $Z$  преобразуется в некоторую матрицу  $W$  по формуле

$$W = V^{-1}ZV. \quad (11)$$

При этом базис  $\{e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}\}$  преобразуется в базис  $\{f^{i_1} \wedge \dots \wedge f^{i_k}\}$  с некоторой матрицей перехода  $V_{\Lambda,k}$ . Тогда матрица оператора  $Z^{\square,k}$  преобразуется по формуле  $W^{\downarrow,k} = V_{\Lambda,k}^{-1}Z^{\downarrow,k}V_{\Lambda,k}$ . Поэтому

$$\det W^{\downarrow,k} = \det Z^{\downarrow,k}, \quad (12)$$

то есть определитель матрицы оператора  $Z^{\square,k}$  не зависит от выбора базиса пространства  $L$ .

Теперь постараемся описать матрицу  $Z^{\downarrow,k}$ . Как видно из формулы (7), соответствие  $Z \rightarrow Z^{\downarrow,k}$  линейно. Поэтому нам достаточно для каждой пары индексов  $j, l$  найти матрицу оператора, соответствующего базисной матрице  $E_{jl}$ , для которой мы впредь будем использовать тензорное обозначение  $E_j^l$  ( $j$  – номер строки,  $l$  – номер столбца). При таких обозначениях имеем

$$Z = \sum_{j,l=1}^n z_l^j E_j^l, Z^{\downarrow,k} = \sum_{j,l=1}^n z_l^j (E_j^l)^{\downarrow,k}. \quad (13)$$

Для каждого набора индексов  $i_1 < \dots < i_k$  нам нужно найти косимметрический тензор  $(E_j^l)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k})$ . Для произвольного набора векторов  $x_1, \dots, x_k \in L$  справедливо

$$e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}(x_1, \dots, x_k) = \begin{vmatrix} x_1^{i_1} & \dots & x_k^{i_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{i_k} & \dots & x_k^{i_k} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Далее, по определению

$$\begin{aligned} & \left( (E_j^l)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) \right)(x_1, \dots, x_k) = \\ & = \sum_{p=1}^k \sum_{i=1}^n e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}(x_1, \dots, x_{p-1}, e_i, x_{p+1}, \dots, x_k) E_j^l(x_p; e^i). \end{aligned} \quad (15)$$

При этом стоящее здесь выражение  $e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}(\dots)$  отлично от нуля лишь в случае, если индекс  $i$  совпадает с одним из индексов  $i_1, \dots, i_k$ . Кроме того,

$$E_j^l(x_p; e^i) = x_p^l \delta_j^i, \quad (16)$$

где  $\delta_j^i$  – символ Кронекера. Таким образом, в правой части равенства (15) отличными от нуля могут быть лишь слагаемые, у которых  $i = j = i_q$  для некоторого  $q$ ,  $1 \leq q \leq k$ . В этом случае

$$\begin{aligned} & \left( (E_{i_q}^l)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) \right)(x_1, \dots, x_k) = \\ & \sum_{p=1}^k e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}(x_1, \dots, x_{p-1}, e_{i_q}, x_{p+1}, \dots, x_k) x_p^l. \end{aligned} \quad (17)$$

Определитель, стоящий в правой части формулы (14), обозначим через  $X$ , а алгебраическое дополнение его элемента, стоящего в строке с номером  $i_q$  и столбце с номером  $p$  – через  $X_{i_q}^p$ . Из формулы (17) следует, что

$$\left( (E_{i_q}^l)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) \right)(x_1, \dots, x_k) = \sum_{p=1}^k x_p^l X_{i_q}^p, \quad (18)$$

то есть получается разложение по строке с номером  $l$  определителя, полученного из определителя  $X$  заменой строки с номером  $i_q$  строкой  $(x_1^l, \dots, x_k^l)$ . Следовательно,

$$\left( E_{i_q}^l \right)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) = e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_{q-1}} \wedge e^l \wedge e^{i_{q+1}} \wedge \dots \wedge e^{i_k}. \quad (19)$$

При этом подразумевается, что если индекс  $l$  совпадает с одним из индексов  $i_1, \dots, i_{q-1}, i_{q+1}, \dots, i_k$ , то правая часть равенства (19) равна нулю. Если же индекс  $l$  не совпадает ни с одним из упомянутых индексов, но не удовлетворяет неравенству  $i_{q-1} < l < i_{q+1}$ , то в правой части (19) нужно произвести перестановку сомножителей с возможной переменной знака, чтобы получить базисный элемент пространства  $\Lambda^k(L)$ . Из сказанного выше следует, что

$$\left( E_j^l \right)^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) = 0, \quad (20)$$

если индекс  $j$  не совпадает ни с одним из индексов  $i_1, \dots, i_k$ .

Формулы (13), (19) и (20) позволяют найти матрицу  $Z^{\downarrow,k}$  для произвольной матрицы  $Z$ . Сначала предположим, что матрица  $Z$  диагональна,  $Z = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ . Тогда из этих формул следует, что

$$Z^{\square,k}(e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}) = (\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k}) e^{i_1} \wedge \dots \wedge e^{i_k}, \quad (21)$$

то есть в рассматриваемом случае матрица  $Z^{\downarrow,k}$  тоже диагональна, с элементами  $\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k}$  на диагонали. Поэтому

$$\det Z^{\downarrow,k} = \prod_{i_1 < \dots < i_k} (\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k}). \quad (22)$$

Пусть теперь  $Z \in \text{Mat}_C(n)$  – произвольная матрица. Приведём её к жордановой форме посредством преобразования подобия (11). Сначала предположим, что собственные числа  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  матриц  $Z$  и  $W$  попарно различны. Тогда матрица  $W$  диагональна и из (12) следует, что и в этом случае верна формула (22).

Перейдём к общему случаю, когда некоторые собственные числа матрицы  $Z$  могут совпадать, а матрица  $W$  содержит жордановы клетки порядка два или больше. Тогда можно поступить так, как предложено в [6, с. 112]. Именно, рассмотрим матрицу  $W_\delta$ , полученную из матрицы  $W$  добавлением к её диагональным элементам  $\lambda_j$  малых слагаемых  $\delta_j$  при  $j = 1, \dots, n$ . Пусть также эти добавки таковы, что диагональные элементы  $\lambda_1 + \delta_1, \dots, \lambda_n + \delta_n$  матрицы  $W_\delta$  попарно различны. Тогда по уже доказанному из формулы (22) следует, что

$$\det W_\delta^{\downarrow,k} = \prod_{i_1 < \dots < i_k} (\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k} + \Delta), \quad (23)$$

где  $\Delta = \delta_{i_1} + \dots + \delta_{i_k}$ . Обозначим также  $Z_\delta = VW_\delta V^{-1}$ . Тогда, если устремить все добавки  $\delta_j$  к нулю, то матрица  $Z_\delta$  устремится к матрице  $Z$ , вследствие чего

$$\det Z^{\downarrow,k} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \det Z_\delta^{\downarrow,k} = \prod_{i_1 < \dots < i_k} (\lambda_{i_1} + \dots + \lambda_{i_k}), \quad (24)$$

то есть формула (22) установлена и в общем случае. Её можно рассматривать как обобщение формулы Орландо.

Приведём пример матрицы  $Z^{\downarrow,3}$  при  $n = 4$ . Элементы базиса пространства  $L^3(L)$  расположим в порядке

$$e^1 \wedge e^2 \wedge e^3, e^1 \wedge e^2 \wedge e^4, e^1 \wedge e^3 \wedge e^4, e^2 \wedge e^3 \wedge e^4. \quad (25)$$

Из формул (13), (19) и (20) имеем

$$Z^{\square,3}(e^1 \wedge e^2 \wedge e^3) = (z_1^1 + z_2^2 + z_3^3)e^1 \wedge e^2 \wedge e^3 + z_4^4 e^1 \wedge e^2 \wedge e^4 - z_4^2 e^1 \wedge e^3 \wedge e^4 + z_4^1 e^2 \wedge e^3 \wedge e^4,$$

$$Z^{\square,3}(e^1 \wedge e^2 \wedge e^4) = (z_1^1 + z_2^2 + z_4^4)e^1 \wedge e^2 \wedge e^4 + z_3^3 e^1 \wedge e^2 \wedge e^3 + z_3^2 e^1 \wedge e^3 \wedge e^4 - z_3^1 e^2 \wedge e^3 \wedge e^4,$$

$$Z^{\square,3}(e^1 \wedge e^3 \wedge e^4) = (z_1^1 + z_3^3 + z_4^4)e^1 \wedge e^3 \wedge e^4 - z_2^2 e^1 \wedge e^2 \wedge e^3 + z_2^1 e^1 \wedge e^2 \wedge e^4 + z_2^3 e^2 \wedge e^3 \wedge e^4,$$

$$Z^{\square,3}(e^2 \wedge e^3 \wedge e^4) = (z_2^2 + z_3^3 + z_4^4)e^2 \wedge e^3 \wedge e^4 + z_1^1 e^1 \wedge e^2 \wedge e^3 - z_1^3 e^1 \wedge e^2 \wedge e^4 + z_1^2 e^1 \wedge e^3 \wedge e^4.$$

(26)

Возвращаясь к более привычным обозначениям  $z_{jl}$  для элементов матрицы  $Z$ , получаем отсюда, что

$$Z^{\downarrow,k} = \begin{pmatrix} \zeta_{11} & z_{34} & -z_{24} & z_{14} \\ z_{43} & \zeta_{22} & z_{23} & -z_{13} \\ -z_{42} & z_{32} & \zeta_{33} & z_{12} \\ z_{41} & -z_{31} & z_{21} & \zeta_{44} \end{pmatrix}, \quad (27)$$

где

$$\zeta_{11} = z_{11} + z_{22} + z_{33}, \zeta_{22} = z_{11} + z_{22} + z_{44}, \quad (28)$$

$$\zeta_{33} = z_{11} + z_{33} + z_{44}, \zeta_{44} = z_{22} + z_{33} + z_{44}. \quad (29)$$

### Заключение

Из формулы (22) следует, что наличие равной нулю суммы  $k$  собственных чисел матрицы  $Z$  равносильно справедливости равенства  $\det Z^{\downarrow,k} = 0$ . Таким образом, для обнаружения резонанса простейшего вида  $\lambda_1 = 2\lambda_1 + \lambda_2 \dots + \lambda_k$  порядка  $k + 1$  достаточно убедиться в справедливости упомянутого равенства. Порядок матрицы  $\det Z^{\downarrow,k}$  равен числу сочетаний из  $n$  по  $k$ , а её элементы являются весьма простыми линейными формами от элементов матрицы  $Z$  (недиагональные элементы матрицы  $Z^{\downarrow,k}$  с точностью до знака совпадают с некоторыми недиагональными элементами матрицы  $Z$ , а её диагональные элементы являются суммами  $k$  диагональных элементов той же матрицы). В общем случае коэффициенты системы уравнений (1) могут зависеть от некоторого числа параметров, и тогда для проверки наличия резонанса следует привлечь методы компьютерной алгебры.

### Литература

1. Арнольд В. И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Ижевск: Ижевская республиканская типография, **2000**. [Arnold V. I. Geometricheskie metody v teorii obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii. Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, **2000**. (In Russ).]
2. Илюшечкин Н. В. Формула Орландо для характеристического многочлена // Вопросы науки. **2025**. № 3. С. 46 – 50. [Ilyushechkin N. V. Formula Orlando dlya kharakteristicheskogo mnogochlena. Voprosy nauki. **2025**;(3);46-50. (In Russ).]
3. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, **1988**. [Gantmaher F. R. Teoriya matric. Moscow: Nauka, **1988**.]
4. Зорич В. А. Математический анализ. Часть 2. М.: Наука, МЦНМО, **2007**. [Zorich V. A. Matematicheskij analiz. CHast' 2. Moscow: Nauka, MCNMO, **2007**. (In Russ).]
5. Постников М. М. Лекции по геометрии. Семестр 2. Линейная алгебра. М.: Наука, **1986**. [Postnikov M. M. Lekcii po geometrii. Semestr 2. Linejnaya algebra. Moscow: Nauka, **1986**. (In Russ).]
6. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, **1989**. [Horn R., Dzhonson CH. Matrichnyj analiz. Moscow: Mir, **1989**. (In Russ).]

# ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 629.73

## ТЕРМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ СТЕКЛЯННОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБЫ

*Ибрагимов Н Ю.**Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (АГУНП)  
(Азербайджан, г. Баку) Пр.Азадлыг 16/21, г.Баку, АЗ.1010, Азербайджан*

## THERMAL BEHAVIOR AND FATIGUE OF PIPE GLASS COATING

*N. Yu. Ibragimov**Azerbaijan State University of Oil and Industry (ASOUI),  
16/21 Azadlig Ave., Baku, AZ.1010, Azerbaijan.**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2227*

Изучено поведение стеклянного покрытия трубы в зоне повышенного температурного краевого эффекта. Установлено, что распространение и характер развития дефектов наблюдаются в виде кольцевых и винтовых трещин, по мере возрастания температуры для стальных и латунных стеклянных покрытий труб. У стальных и латунных стеклянных покрытий труб соответственно расположены трещины от торцевых сечений до глубины 0,6-0,8 диаметра металлической трубы.

При 270<sup>0</sup>-300<sup>0</sup>С формировались кольцевые трещины на расстоянии 0,25d и 0,4d или два неполных витка винтовой линии на тех же расстояниях. При 300<sup>0</sup>-350<sup>0</sup>С у всех образцов формировались с каждого торца по 2-3 витка винтовых линий на расстоянии 0,5-0,6 d. . Повышения температуры в пределах 350- 450<sup>0</sup>С вызывало появление четвертых и пятых витков. При этом глубина пропускания трещин не превышала 0,8 d. При 450<sup>0</sup>-550<sup>0</sup>С в отдельных случаях трещины распространялись на глубину до d, а затем появились шестые витки и сетка трещин до глубины 0,6-0,8d. При 550-650 С происходило вздутие покрытия, которое при этом имело красный цвет. Вспучивание покрытия в виде мелких и крупных капель наступало 700<sup>0</sup>С

The behavior of the glass coating of the pipe in the zone of increased temperature edge effect was studied. It was found that the distribution and nature of the development of defects are observed in the form of ring and screw thermal behavior cracks, as the temperature increases for steel and brass glass pipes. In steel and brass glass coatings of pipes, cracks from the end faces are located respectively sections to a depth of 0.6-0.8d of the diameter of the metal pipe. An experimental study of the effect of increasing temperature on the temperature resistance of glass-coated pipes was conducted. At 270-300C, ring cracks were formed at a distance of 0.25d and 0.4d or two incomplete turns of the helical line at the same distances. At 300-350C, all samples formed 2-3 turns of helical lines from each end at a distance of 0.5-0.6d. Moreover, for some samples, a tendency for cracks to spread sharply into the depth was observed. An increase in temperature to 350- 450C caused the appearance of fourth and fifth turns. In this case, the crack penetration depth did not exceed 0.8 d. At 450-550C, in some cases, cracks spread to a depth of d, and then sixth turns and a network of cracks appeared to a depth of 0.6-0.7 d. In some cases, only a network of cracks formed to a depth of 0.6-0.8d. At 550- 650 C, swelling of the coating occurred, which was red in color. Swelling of the coating in the form of small and large drops occurred at 700 C

**Ключевые слова** : Температурное поведение , кольцевые и винтовые трещины, торцевые сечения, стальные и латунные трубы, изменение толщины стеклянного покрытия, геометрические размеры стеклянного покрытия трубы.

**Keywords:** Thermal behavior , thermal resistance, ring and screw cracks, end sections, steel and brass pipes, thermal fatigue, thermal conductivity coefficient, scale factor, geometric dimensions and cut of glass coating

### Введение

При нанесении защитного стеклянного покрытия на внутреннюю поверхность трубы особое внимание требуется, для того чтобы очистить поверхность металла. Необходимо тщательно очистить поверхность от органических веществ, ржавчины и других загрязнений, придать к поверхности определенную шероховатость и, по возможности активировать ее с помощью химических или других средств [1, 2,3].

Для освоения, наиболее предпочтительны технологические процессы нанесения защитных

покрытий, которые не требуют сложные и дорогостоящие подготовки поверхности для обеспечения высокого качества покрытий.

Производство стеклянных покрытий труб показали, что для получения качественного стеклянного покрытия достаточно струйная обработка с последующей продувкой сжатого воздуха.[4,5 ,6,7, ]

Для обеспечения качественного покрытия и других эксплуатационных показателей стеклянного покрытия необходимо знать соблюдение технологического регламента. Эти

параметры в большинстве случаев взаимосвязаны и зависят от свойства применяемого стекла (максимальная температура, скорость нагрева трубы, температура нанесения и время контакта и т.д.) [8,9,10]

Таким образом, металлическую трубу перед нанесением покрытия обжигает при температуре 300-400°C, и с помощью металлического ерша удаляют с внутренней поверхности трубы вещества сгорания и другие инородные частицы. Кроме того, технологичность стекла определяется в основном смачивающей способностью размягченного стекла по отношению к окисленной поверхности металла трубы.[11,13,14]

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Длительность процесса нанесения покрытия, состоит из двух периодов:

а) разогрев металлической и стеклянной трубы до появления бурого цвета на поверхности стекла и плотного прилегания стеклянной трубы к стенкам металлической трубы;

б) контакт размягченной стеклянной трубы с поверхностью металлической трубы.

На рис. 1 представлена схема совместной деформации при нанесении стеклянной трубы на внутреннюю поверхность металлической трубы. Условие совместности продольной деформации стеклянного покрытия и трубы представляет собой:

$$\varepsilon = \alpha_1 T + U_1 = \alpha_2 T - U_2, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты линейных расширений стеклянного покрытия и металла трубы.  $T$  – температура размягчения стеклянной трубы;  $U_1$ ,  $U_2$  – относительное продольное удлинение стеклянного покрытия и металлической трубы соответственно.

Относительные удлинения стеклянного покрытия и металла трубы определяется по закону Гука [15, 16]

$$U_1 = \frac{\sigma_n}{E_1} (1 - \mu_1);$$

$$U_2 = \frac{\sigma_T}{E_2} (1 - \mu_2), \quad (2)$$

где  $\sigma_n, \sigma_T$  – нормальные растягивающие и сжимающие напряжения стеклянного покрытия и металла трубы;  $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$  – соответственно модули упругости и коэффициенты Пуассона стеклянного покрытия и металла трубы. Совместные действия стеклянного покрытия и металлической трубы имеет уравнение равновесия в следующем виде.

$$\sigma_n F_1 + \sigma_T F_2 = 0, \quad (3)$$

где  $F_1, F_2$  – площади поперечных сечений стеклянного покрытия и металла трубы,

Решая совместно уравнения (1), (2) и (3), имеем:

$$\sigma_n = E_{np1} (\alpha_2 - \alpha_1) T; E_{np1} = \frac{F_2}{\frac{1-\mu_1}{E_1} F_2 + \frac{1-\mu_2}{E_2} F_1}; \quad (4)$$

$$\sigma_m = E_{np2} (\alpha_2 - \alpha_1) T; E_{np2} = \frac{F_1}{\frac{1-\mu_1}{E_1} F_1 + \frac{1-\mu_2}{E_2} F_2},$$

где  $E_{np1}, E_{np2}$  – приведенные модули упругости стеклянного покрытия и металлической трубы;

Получение качественного покрытия при высоких температурах связаны с определенными затруднениями, т.е. с интенсивным выделением углерода с образованием пузырей. При нанесении покрытия, также вызывается вспучивание стеклянного покрытия. Поэтому необходимо определить оптимальную температуру нанесения, и продолжительность процесса нагрева металлической трубы [17,18,19,20].

Сущность разрушения стекла при резком перепаде температур сводится к следующему: При резком изменении температур во внешних и внутренних слоях стекла возникают температурные напряжения противоположного знака. При охлаждении в поверхностных слоях возникают температурные напряжения растяжения, при нагревании – сжатия. Поэтому в стеклянных покрытиях труб напряжение сжатия обеспечивает высокую несущую способность и повышенную работоспособности. Следовательно, температурное поведение стеклянного покрытия находится в зависимости от величины этих термических напряжений. Многолетние испытания показывают что, осевые сжимающие усилия в стеклянном покрытии вблизи торца при длине  $l > d$  уменьшаются к торцу до нуля по функциональной зависимости  $f(d)$ . В связи с этим явлением сцепление стеклянного покрытия вблизи торца значительно меньше, чем в глубине трубы. Поэтому при любых внешних нагрузках, в том числе и термических, следует ожидать разрушение покрытия, прежде всего у торцах.

### Экспериментальная часть:

Экспериментальному исследованию подвергались остеклованные стальные и латунные образцы труб с размерами Ф25х2,5; Ф32х4,0 Ф57х3,5; Ф89х4,5 и  $l > 3d$  длинами и с толщинами стекла  $\delta=0,2-0,8$  мм,.

В каждой партии были два образца одного размера (А и Б). Образцы последовательно нагревали в печи до определенной температуры и подвергали визуальному или микроскопическому осмотру. Результаты исследования приведены в таблицах 1 и 2.

Числитель – расстояние витка от торца в мм, знаменатель – количество витков. После каждого осмотра фиксировали изменения в состоянии стеклянного покрытия трубы.

Таблица 1.

**Распространение трещин при нанесении стеклянного покрытия трубы, ( $\delta=0,2 - 0,6$  мм)  
Crack propagation during glass coating application on pipes, ( $\delta=0.2 - 0.6$  mm) Table 1.**

Температура(,temperature)  °C	Образцы (Samples) ( $\delta= 0.2-0,6$ мм)							
	1		2		3		4	
	Торцы (Ends)							
	A	B	A	B	A	B	A	B
250	5/1	-	-	-	3/1	-	-	-
300	-8/2	8/2	5/1	-	8/2	-	2/1	-
350	-	-	-	-	2/1	-	5/2	5/2
400	12/3	12/3	-	-	-	-	8/3	-
450	16/4	12/3	-	-	-	-	-	-
500	-	-	7/4	16/3	12/4	10/3	-	-
550	24/6	12/3	-	-	-	-	-	-
600	24/6	12/3	7/4	16/3	14/5	20/4	17/6	17/5

Таблица 2.

**Распространение трещин при нанесении стеклянного покрытия  
трубы, ( $\delta=0,6 - 0,8$  мм)  
Crack propagation during glass coating application on pipes, ( $\delta=0.6 - 0.8$  mm) Table.2**

Темпера- тура, (,temperature °C	Образцы (Samples) ( $\delta= 0.6-0,8$ мм)							
	1		2		3		4	
	Торцы (Ends)							
	A	B	A	B	A	B	A	B
400	-	-	3/1	5/1	3/1	5/1	4/1	4/1
450	5/1	5/1	8/2	8/2	8/2	5/1	5/2	5/2
500	8/2	8/2	12/3	12/3	2/1	12/3	13/3	13/3
550	-	-	15/4	15/4	-	12/3	13/3	13/3
580	12/4	12/4	15/2	15/2	-	14/3	15/2	15/2
600	13/2	13/4	15/2	15/1	12/4	14/2	15/1	15/2

Проводили маркировку образца каждое, из маркированных торцов, наблюдение вели за каждым торцом, а затем обобщали результаты.

Следует отметить что, способность стеклянного покрытия выдерживать разные перепады температур характеризует их температурное поведение. Образцы нагревались в муфельной печи, а охлаждались с заданной температурой (однократный) при перепадах 20,30,40,50°C . Наличие трещин отмечалось только при перепаде 50°C . За максимальный перепад температуры стекла принималась температура 50°C (таблица 1) и (таблица 2) , при которой стеклянное покрытие выдерживало без разрушения. Построены зависимости глубины распространения трещин от температуры стеклянных покрытий труб. На рис. 2 и 3 как следует из графиков, зависимость носит линейный характер. Характер развития и вид трещин по мере возрастания температуры для стальных и латунных образцов различны. У стальных образцов диаметрами Ф25х2,5; Ф32х4, ( $\delta=0,2- 0,6$  мм), трещины появляются при температурах 250°C-600°C, а для диаметров Ф57х3,5; Ф89х4,5 с толщинами стекла ( $\delta=0,6- 0,8$  мм), соответственно при температурах 400°C-600°C .

У латунных образцов диаметрами Ф25х2,5; Ф32х4, и толщинами стекла ( $\delta=0,2- 0,6$  мм), трещины появляются при температурах 400°C-600°C, а для труб диаметрами Ф57х3,5; Ф89х4,5

и с толщиной стекла ( $\delta=0,6- 0,8$  мм.), диаметров при температурах 500°C-600°C .

#### Обсуждение результатов

При 270°C-300°C формировались кольцевые трещины на расстоянии 0,25d и 0,4d или два неполных витка винтовой линии на тех же расстояниях. При 300°C-350°C у всех образцов формировались с каждого торца по 2-3 витка винтовых линий на расстоянии 0,5-0,6 d. Причем для некоторых образцов наблюдалась тенденция распространения трещин резко вглубь. Повышения температуры до350- 450°C вызывало появление четвертых и пятых витков. При этом глубина пропускания трещин не превышала 0,8 d. При 450°C-550°C в отдельных случаях трещины распространялись на глубину до d, а затем появились шестые витки и сетка трещин до глубины 0,6-0,7d. В отдельных случаях лишь формировались сетка трещин до глубины 0,6-0,7d. При 550-650 С происходило вздутие покрытия, которое при этом имело красный цвет. Вспучивание покрытия в виде мелких и крупных капель наступало 700°C. **На фотографии.1** представлены снимки различных диаметров образцов стеклянных покрытий труб.

Для латунных образцов при 300°C начиналось нарушение покрытия по всей поверхности. У отдельных образцов наблюдали распространение трещин до глубины, равной

диаметру, При температуре 650<sup>0</sup>С наблюдали полное разрушение покрытия всех образцов, которое проявлялось в виде сплошной сетки трещин

Узел подъема винтовых линий у всех образцов составлял около 4-6<sup>0</sup>. В дальнейшем этот участок в ряде случаев превращался в сетку трещин. Это характерно для длинных образцов  $l > 5d$  диаметра. У коротких образцов  $l > 3d$  диаметра сетки не наблюдалось.

Разрушения покрытия вблизи торца проявлялось в виде одной или двух трещин, имеющие тенденцию распространяться вглубь под углом 45<sup>0</sup> на длину 1,5d. В отдельных случаях разрушение стекла вообще не наблюдали. Установлено влияние краевого эффекта на температурную стойкость стеклянного покрытия трубы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучено температурное поведение стеклянного покрытия трубы в зоне повышенного температурного краевого эффекта. У стальных и латунных остеклованных труб соответственно наблюдается винтовые и кольцевые трещины от торцевых сечений до глубины 0.6-0.8 диаметра металлической трубы.

2. Проведено экспериментальное исследование влияние повышения температуры на температурное поведение стеклянных покрытий труб. Установлено что, на температурное поведение значительно влияет изменение толщины стеклянного покрытия и геометрических размеров металлических труб.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашев В.В., Ямпольский А.В. Экспериментальное исследование коэффициента стеклоэмалевых покрытий. «Химическое и нефтяное машиностроение», ЦНИИ нефтехимии, 2006, №10, с.16-18

2. С.Г.Бабаев, И.А.Габиров Отказ безотказности деталей по времени установившегося износа // Механика-машиностроение // АзТУ, Баку, 2019, №1, с.107-110

3. Максудов Р. А., Кан А. Г. Остеклованные трубы в нефтяной промышленности. М.: 1994. -128 с.

4. Петцольд А., Пешман Г. Эмаль и эмалирование. М.: Металлургия, 1995. -572 с.

5. Пермяков В.А., Боровков В.М. Отечественные кожух отрубные подогреватели нового поколения для технических систем теплоснабжения // Промышленная энергетика, Москва, 2004, №11, с.31-35

6. Соломин Н.В. Термомеханические напряжения в сопряжении стекла, керамика и металла «Стекло и Керамика», 2003, №2, с.15-18

7. Чемеренко Л.С. Термостойкие механические прочные покрытия «Химическое и нефтяное машиностроение», 2003, №3, с.20-28. 8

8. Ибрагимов Н. Ю. Исследование образования накипи на силикатных покрытиях труб. Стекло и Керамика, 2023, №4. с.35-40

9. Лыков А.В. Теория теплопроводности М.: Высшая школа, 1967.-559с.

10. Ибрагимов Н.Ю. Температурный режим в процессе нанесения покрытия теплообменных труб. Известия Высших Учебных заведений СНГ, Белоруссия, г. Минск «Энергетика» 1997, №5-8, с.77-80

11. Ибрагимов Н.Ю. Тепловые процессы в остеклованных трубах теплообменного аппарата. М.: «Стекло и Керамика» № 11, 2022, с.25-29

12. Мальшевский И.А. Использование морской воды в системах охлаждения ТЭС-М: Энергия, 1991, -315с.

13. Ибрагимов Н.Ю., Измайлова Э.Н. Теплопроводность слоев отложений накипи и продуктов коррозии на силикатных покрытиях трубы при использовании морской воды. Энергетик, 2013, №5, с.54-56

14. Пермяков В.А. Головков В.М. Отечественные кожух отрубные подогреватели нового поколения для технических систем теплоснабжения Промышленная энергетика, М.: 2004, №11, с.42-46

15. Сень Л.Н. Теплофизические процессы использования морской воды в котельных установках Автореферат диссертации. доктора. технических. наук, Минск, 1986,- 350с

16. Ибрагимов Н.Ю. Теплоотдача в остеклованных трубах теплообменника // Известия ВУЗ-ов СНГ, Велоруссия, г.Минск «Энегетика», 1996, №12, с.54-56

17. Ибрагимов Н.Ю. Исследование давления внутри запаянного баллона при нагреве остекловываемой трубы // Известия ВУЗ-ов СНГ, Белоруссия г. Минск, 1997, №1-2, с.75-77

18. İbragimov N.Y., İbragimova E.N. Investigation of Geometric Parameters of Cracks in Silicate Enamel Coatings of Steel Pipes // Chemical and Petroleum Engineering, Springer, May 2018, volume 54, issue 1–2 July p.45-48

19. İbragimov N.Y., İbragimova E.N. Apparatus for identifying Micro cracks on the Inner Surface of Glazed Pipes // Glass and Ceramics, Springer, November 2018, volume 75, issue 7, p. 253-257.

20. Brondel D., Edwards R., Hayman A. Corrosion in the Oil Industry // Oilfield review. 1994. V. 6, No. 2. P. 4 – 18.

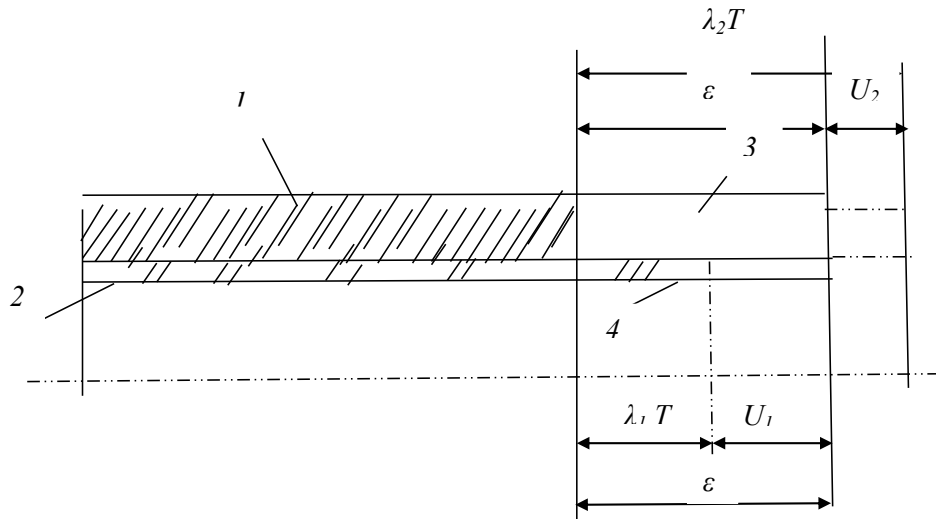


Рис.1. Совместная термическая деформация покрытия и трубы

1- стальная труба; 2- стеклянное покрытие; 3- деформация металлической трубы; 4- деформация стеклянного покрытия

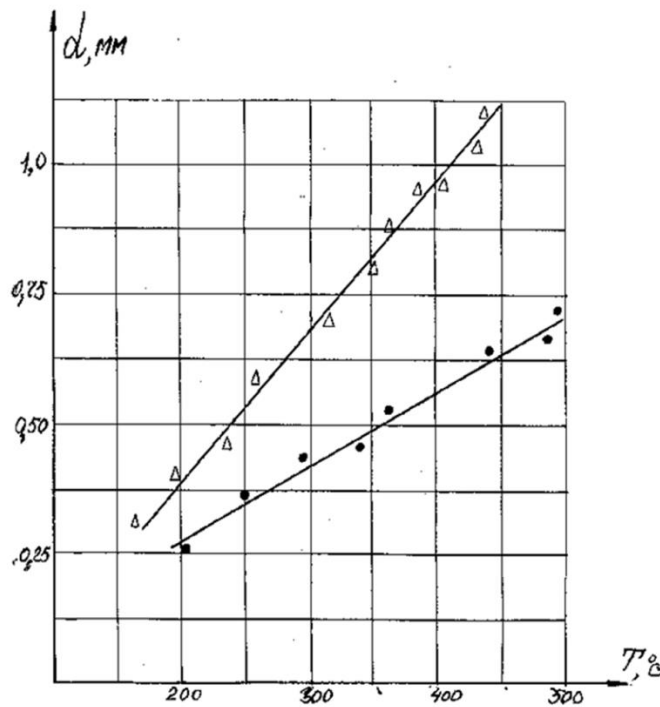


Рис.2 Зависимость глубины распространения трещин у торца остеклованных труб  $\Phi 25 \times 2,5$ ;  $\Phi 32 \times 4$ , ( $\delta = 0,2 - 0,6$  мм),  $\Delta$  - стальные, x - латунные

Fig. 2 Dependence of the depth of crack propagation at the end of glass-coated pipes  $\Phi 25 \times 2,5$ ;  $\Phi 32 \times 4$ , ( $\delta = 0,2 - 0,6$  mm),  $\Delta$  - steel, x - brass.

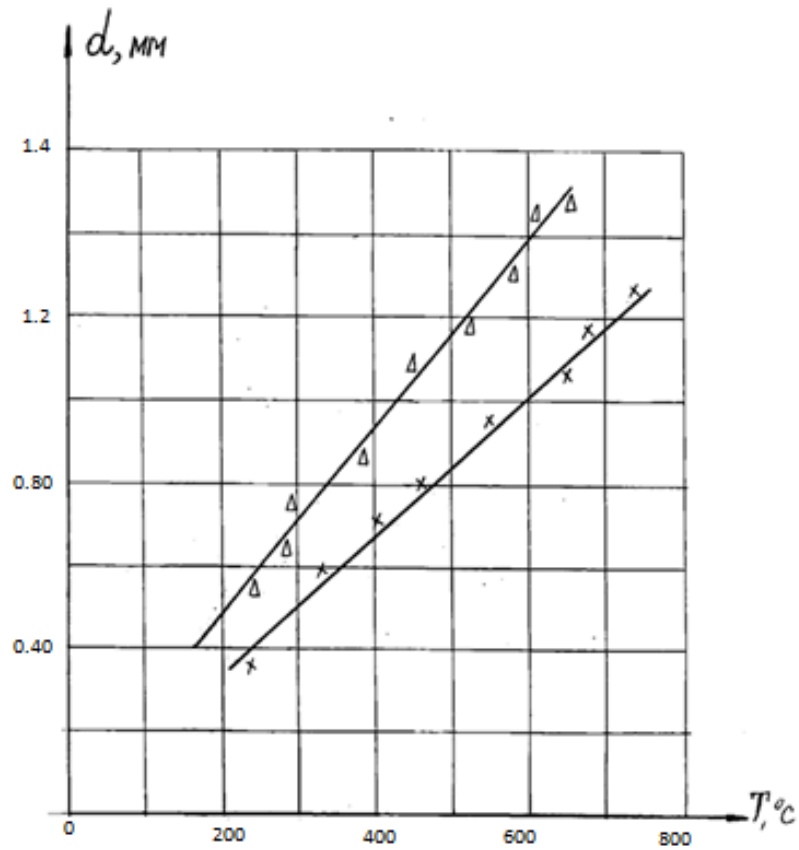


Рис.3 Зависимость глубины распространения трещин у торца остеклованных труб  $\Phi 57 \times 3,5$ ;  $\Phi 89 \times 4,5$  ( $\delta = 0,6 - 0,8$  мм),  $\Delta$  - латунные x - стальные

Fig. 3 Dependence of the depth of crack propagation at the end of glass-coated pipes  $\Phi 25 \times 2,5$ ;  $\Phi 32 \times 4$ , ( $\delta = 0,6 - 0,8$  mm),  $\Delta$  - steel. x - brass.



а) б)

Фотография-1 а) До испытания б) После испытания

Photo-1 a) Before testing b) After testing

tel. home 994-376-10-86 mob. 994050-648-10-93, 994050-364-19-62

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

## ТРАНСГРАНИЧНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И РЕГУЛЯТОРНЫЕ ВЫЗОВЫ

*Королев Михаил Николаевич*

*Совладелец компании и исполнительный директор по международному развитию производства электрических автобусов и их продвижению  
БМГ групп*

## CROSS-BORDER ASPECTS OF ELECTRIC TRANSPORT DEVELOPMENT: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND REGULATORY CHALLENGES

*Korolev Mikhail Nikolaevich*

*Co-owner of the company and Executive Director for the international development of electric bus production and their promotion  
BMG group*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2228

### АННОТАЦИЯ

В рамках исследования был проведен комплексный анализ состояния и прогнозных траекторий развития мирового и российского рынков электротранспорта через призму трансграничного регулирования и международной диффузии технологий. На основе интерпретации статистических массивов за 2024–2025 годы идентифицированы определяющие тенденции в сегментах легковых транспортных средств и общественного транспорта. Акцент сделан на регуляторных затруднениях в рамках Евразийского экономического союза (ЕАЭС), включая проблематику таможенно-тарифных механизмов и необходимость адаптационных изменений технического регламента ТР ТС 018/2011. Выполнено сопоставление инструментов государственной поддержки, применяемых в других странах, и одновременно рассмотрены технологические перспективы внедрения решений двунаправленного энергообмена (V2G) и интеллектуализированного управления зарядной инфраструктурой. В заключение сделан вывод о том, что дальнейшее масштабирование электротранспорта требует согласования стандартов, обеспечивающего беспрепятственное трансграничное перемещение транспортных средств, а также институциональной и технологической интеграции электротранспорта в национальные энергетические контуры.

### ABSTRACT

This study provides a comprehensive analysis of the current state and projected development trajectories of the global and Russian electric transport markets through the lens of cross-border regulation and international technology diffusion. Based on an interpretation of statistical data for 2024–2025, key trends in the passenger car and public transport segments are identified. Emphasis is placed on regulatory challenges within the Eurasian Economic Union (EAEU), including issues related to customs tariff mechanisms and the need for adaptive changes to the technical regulation TR CU 018/2011. A comparison of government support instruments used in other countries is provided, while the technological prospects for implementing bidirectional energy exchange (V2G) solutions and intelligent charging infrastructure management are examined. The conclusion is that further scaling of electric transport requires the harmonization of standards to ensure seamless cross-border movement of vehicles, as well as the institutional and technological integration of electric transport into national energy systems.

**Ключевые слова:** электротранспорт, Евразийский экономический союз, ТР ТС 018/2011, международный опыт, зарядная инфраструктура, совокупная стоимость владения, экологические стандарты, таможенно-тарифное регулирование, Vehicle-to-Grid, декарбонизация.

**Keywords:** electric transport, Eurasian Economic Union, TR CU 018/2011, international experience, charging infrastructure, total cost of ownership, environmental standards, customs and tariff regulation, Vehicle-to-Grid, decarbonization.

### Введение

Современная мировая экономическая система переживает этап глубокой структурной перестройки, детерминированной императивом перехода к низкоуглеродным траекториям развития. В данном контексте транспортная отрасль, относящаяся к числу наиболее значимых источников выбросов парниковых газов, приобретает ключевое значение для практической реализации целевых установок Парижского соглашения по климату. Электрификация

транспортных средств закрепляется в качестве базового инструмента декарбонизации мобильности, что иллюстрируется динамикой глобального спроса: в 2024 году продажи электромобилей увеличились на 20,14% и достигли 16,7 млн единиц [1].

Вместе с тем развитие электротранспорта не исчерпывается экологической проблематикой и формирует отчетливое трансграничное и геоэкономическое измерение. Дивергенция национальных стандартов зарядной

инфраструктуры, различия в протоколах взаимодействия транспортного средства с энергосетью, а также протекционистские подходы в таможенном регулировании создают институциональные и технологические препятствия для свободного перемещения решений и продукции. Для Российской Федерации и государств—партнеров по Евразийскому экономическому союзу (ЕАЭС) указанная совокупность факторов приобретает стратегический характер в условиях одновременной потребности в укреплении технологического суверенитета и включении в глобальные цепочки создания стоимости. Актуальность исследования определяется необходимостью научной интерпретации регуляторных сдвигов 2024–2025 годов: в России фиксируется неоднозначная динамика, при которой общий рост парка до 59,6 тыс. единиц в 2025 году сочетается с сохранением крайне низкой доли электромобилей, порядка 0,12% в структуре легкового автопарка [2]. Одновременно изменения параметров технического регулирования и налогово-бюджетных инструментов, включая резкое повышение утилизационного сбора в октябре 2024 года, заметно трансформируют условия функционирования рынка [3].

**Цель работы** заключается в анализе влияния трансграничного регулирования (в ЕАЭС и в сопоставимых юрисдикциях) на темпы и конфигурацию развития рынков электротранспорта России и мира, и обосновании направлений гармонизации стандартов и интеграции электротранспорта в энергетические системы с учетом инфраструктуры и V2G.

**Авторская гипотеза** основывается на предположении о том, что ускорение масштабирования электротранспорта в России и ЕАЭС будет достигаться не столько ростом субсидий, сколько согласованием технических и таможенно-тарифных режимов (включая адаптацию ТР ТС 018/2011) и включением зарядной инфраструктуры и V2G в единый транспортно-энергетический контур, снижающий транзакционные издержки и совокупную стоимость владения.

**Научная новизна** заключается в том, что впервые в рамках исследования предложена комплексная рамка анализа «рынок–регулирование–инфраструктура–энергосистема», в которой статистика последних лет по сегментам легкового и общественного электротранспорта увязана с конкретными регуляторными узлами ЕАЭС (льготы/ограничения трансграничного перемещения, утилизационный сбор, контур ОТТС/СБКТС/ЭПТС и ЭМС) и с технологическими механизмами Smart Grid/V2G как инструментом

институционально-технологической интеграции.

### **Материалы и методы**

Методологический каркас исследования сформирован на основе системного подхода, ориентированного на рассмотрение транспортных и энергетических подсистем как взаимосвязанных элементов единого социально-экономического контура. Применен совокупный инструментарий, включающий статистическую обработку данных, методы сравнительного правоведения и экономико-математическое моделирование совокупной стоимости владения (ТСО). Эмпирическая и нормативная база сформирована из официальных материалов аналитических агентств.

Отдельное методологическое значение придано концепции Avoid–Shift–Improve (ASI), в рамках которой электрификация транспорта отнесена к измерению «Improve» как технологическое совершенствование, одновременно создающее предпосылки для «Shift» — перераспределения спроса в пользу общественного транспорта при условии повышения его комфортности и доступности. Проведенное исследование построено на принципах объективности и научной обоснованности, что поддерживается обращением к верифицированным источникам Российской Федерации и международных организаций.

### **Результаты и обсуждение**

Мировая траектория перехода к электромобильности сохраняет выраженную инерцию роста даже в условиях макроэкономической волатильности. Согласно предварительным оценкам, глобальные продажи увеличились с 13,9 млн единиц в 2023 году до 16,7 млн в 2024 году [1]. Дополнительным подтверждением устойчивости тенденции выступают результаты июля 2025 года, когда мировой рынок прибавил 21% в годовом выражении, фиксируя продолжение распространения технологий с нулевым уровнем выбросов [4].

Российский рынок, напротив, демонстрирует разнонаправленную динамику. В июле 2025 года зарегистрирован первый за последние 13 месяцев рост продаж новых электромобилей: показатель увеличился на 15% относительно июля 2024 года (1,26 тыс. единиц против 1,09 тыс.) [4]. Одновременно в кумулятивном разрезе за январь–июль 2025 года объем реализации составил 5,7 тыс. автомобилей, что приблизительно в два раза ниже уровня сопоставимого периода 2024 года. Это сопровождалось сокращением доли электромобилей в сегменте новых легковых автомобилей с 1,3% до 0,9% [4].

Таблица 1

**Продажи электромобильных брендов в РФ в июле 2025 года и статус на рынке  
(составлено автором на основе [4]).**

Table 1.

**Sales of electric vehicle brands in the Russian Federation in July 2025 and market status  
(compiled by the author based on [4]).**

Бренд	Продажи в РФ (июль 2025, шт.)	Статус на рынке
Zeekr	313	Лидер импортного сегмента
Москвич	249	Лидер локальной сборки
Evolute	224	Активное развитие модельного ряда
Avatr	87	Премиальный сегмент
BYD	67	Глобальный лидер

Динамика последних лет показывает, что российский сегмент электромобилей входит в стадию структурной трансформации: спорадические каналы ввоза постепенно вытесняются более устойчивыми логистическими контурами, ориентированными на китайские бренды, параллельно с этим формируется контур отечественных проектов. Одновременно сохраняется предельно низкая доля электрокаров в общем парке (0,12%), что указывает на совокупность инфраструктурных, институциональных и поведенческих ограничений, сдерживающих массовую диффузию технологии [2].

В качестве ключевого барьера выступает не только недостаточность зарядной сети как таковой, но и пространственная асимметрия ее развития: концентрация мощностей в крупнейших агломерациях сопровождается «пустотами» на межрегиональных коридорах и в периферийных территориях, что снижает предсказуемость маршрутизации и повышает воспринимаемые риски эксплуатации. Дополнительное значение приобретают регуляторные и операционные неопределенности: вариативность тарифов и условий подключения, фрагментация операторов, неоднородность стандартов сервисного обслуживания и ограниченность вторичного рынка. В совокупности эти факторы формируют психологический барьер, выражающийся в завышенной оценке вероятности отказов и недооценке полной экономии затрат жизненного цикла.

Сопоставление с международной практикой демонстрирует, что эффективные траектории электрификации транспорта формируются, как правило, в рамках двух комплементарных логик стимулирования — централизованной, опирающейся на государственное планирование и обязательные требования, и децентрализованной, основанной на региональных инструментах и гибридных финансовых механизмах. В европейском контексте показательна французская модель, где законодательное закрепление инфраструктурных обязанностей сочетается с крупномасштабными инвестициями. Так, закон об ориентации мобильности (LOM) предусматривает обязательства по оснащению парковочных пространств зарядными решениями: к 2025 году

парковки более чем на 20 мест в нежилых зданиях должны иметь как минимум одну точку зарядки [5]. Подобные нормы снижают транзакционные издержки развертывания сети, поскольку переводят инфраструктурные требования из сферы добровольных решений в плоскость предсказуемого стандарта.

Экономическая состоятельность французских программ электробусов подтверждается результатами региональных инициатив, включая Île-de-France Mobilités с бюджетом 5,7 млрд евро: фиксируется снижение операционных расходов на 25–30% в пятилетнем горизонте [8]. На уровне методологии оценки это означает, что конкурентоспособность достигается не только за счет капитальных субсидий, но и через эффект масштаба, оптимизацию деповской зарядки и снижение стоимости простоя. Существенным фактором выступает и структура переменных затрат: совокупная стоимость владения (ТСО) электробуса сближается с дизельными аналогами вследствие относительно низкой стоимости электроэнергии (0,18–0,22 евро/км) и меньших расходов на техническое обслуживание [9].

Американская траектория во многом задается политикой Калифорнии, где роль драйвера выполняют нормативы и инновационные механизмы субсидирования. Правила Advanced Clean Truck Regulation устанавливают целевой ориентир: к 2035 году 75% продаж новых грузовиков должны приходиться на транспорт с нулевыми выбросами [5]. Прикладную эффективность демонстрирует ваучерная модель HVIP, обеспечивающая скидку до 150 000 долларов для коммерческих ZEV-технологий непосредственно в момент приобретения, что уменьшает барьер входа для автопарков и ускоряет обновление техники [5]. Параллельно развиваются строительные нормы, закрепляющие обязательность предусмотры зарядной инфраструктуры в многоквартирном строительстве, а также инвестиции коммунальных служб; примером является программа Southern California Edison объемом более 300 млн долларов [5]. В совокупности это формирует контур, где регуляторика задает обязательные ориентиры, а финансовые инструменты снижают стоимость перехода в критической фазе распространения технологии.

Нидерландская модель иллюстрирует преимущества гибкой архитектуры поддержки, ориентированной на специализированные сегменты и цифровую оптимизацию. Применяются отдельные схемы субсидирования, включая SPRILA (частная инфраструктура для бизнеса) и SPULA (зарядка для тяжелого транспорта) [6]. При этом ускоренная окупаемость инвестиций в электробусы (6–8 лет) объясняется сочетанием конкурентной среды частных перевозчиков и развитых цифровых сервисов управления зарядкой, позволяющих повышать коэффициент

использования инфраструктуры и снижать пиковую нагрузку на сеть [8]. Такой подход важен как доказательство того, что технологическое лидерство обеспечивается не только размером субсидий, но и качеством регуляторного дизайна, создающего стимулы для эффективности.

Для систематизации международного опыта и сопоставления регуляторных архитектур целесообразно свести ключевые инструменты поддержки электротранспорта в сравнительную матрицу (табл. 2).

Таблица 2.

**Сравнительная характеристика инструментов регулирования и поддержки электротранспорта в отдельных юрисдикциях (составлено автором на основе [5–7]).**

Table 2.

**Comparative overview of regulatory and support instruments for electric transport in selected jurisdictions (compiled by the author based on [5–7]).**

Юрисдикция	Нормативные цели и требования	Финансовые стимулы	Инфраструктурные требования и планирование	Интеграция с энергосистемой (Smart Grid/V2G)	Трансграничные эффекты/барьеры
Франция	Обязательства по оснащению парковок зарядкой в рамках LOM (например, требование к парковкам в нежилых зданиях)	Комбинация госинвестиций и региональных программ (в т.ч. электробусы)	Инфраструктура “вшивается” в строительные и эксплуатационные нормы; снижение транзакционных издержек развертывания сети	Акцент на управляемости зарядки и оптимизации депо/графиков как фактор снижения ТСО	Высокая предсказуемость стандартов облегчает масштабирование решений и совместимость оборудования
США (Калифорния)	Нормативные ориентиры по доле ZEV в продажах коммерческого транспорта (АСТ и др.)	Ваучерные/скидочные механизмы (например, HVIP), стимулирующие обновление автопарков	Требования к подготовке зарядной инфраструктуры в строительных нормах + инвестиции коммунальных компаний	Развитие сетевых программ и тарифных решений через энергокомпании; подготовка к сервисам гибкости	Регуляторика задает жесткие ориентиры, но межштатная неоднородность стандартов может усложнять унификацию
Нидерланды	Гибкая архитектура поддержки по сегментам (в т.ч. тяжелый транспорт)	Специализированные субсидии на инфраструктуру для бизнеса/тяжелого транспорта (SPRILA/SPULA)	Сильный упор на цифровые сервисы управления зарядкой и повышение коэффициента использования	Практики smart charging как инструмент снижения пиков и повышения эффективности и инфраструктуры	Высокая интероперабельность и цифровизация повышают переносимость практик и требований

ЕАЭС (льготы на импорт)	Таможенно-тарифная льгота на ввоз электромобилей до 31.12.2025	Пошлинная льгота (освобождение от ввозной пошлины при соблюдении условий)	Инфраструктурные требования менее унифицированы по союзу; зависимость от национальных программ	Потенциал V2G признается перспективным, но требует унификации протоколов/данных	Ограничения льготы (в т.ч. запрет передачи прав владения в РФ для ряда случаев) сегментируют рынок союза
РФ (внутренняя настройка)	Ужесточение ряда параметров промышленной политики (в т.ч. через фискальные механизмы)	Косвенная мотивация локализации через рост входной цены импорта (утилизационный сбор)	Риск “ножниц” между целями локализации и темпами развертывания зарядной сети	Для V2G требуется нормативное поле агрегаторов, протоколы обмена данными и тарифы на услуги гибкости	Высокая роль регуляторной синхронизации с ЕАЭС и стандартами испытаний/сертификации для снижения издержек

В пространстве ЕАЭС развитие электротранспорта осложняется необходимостью одновременного стимулирования спроса и защиты формирующихся производственных компетенций. Существенную роль играет таможенно-тарифная конфигурация: Совет Евразийской экономической комиссии продлил тарифную льготу на ввоз электромобилей до 31 декабря 2025 года, предусматривая освобождение от ввозной пошлины (стандартная ставка — 15%) [7]. Однако режим содержит значимые ограничения: льгота доступна гражданам Армении, Беларуси, Казахстана и Киргизии, а для транспортных средств, ввезенных по данной схеме, действует запрет на передачу прав владения лицам из Российской Федерации [7]. Такая конструкция фактически сегментирует рынок союза и провоцирует различия в ценовых траекториях между странами, затрудняя формирование единого экономического пространства в данном сегменте.

Внутрироссийский контур регулирования, напротив, демонстрирует тренд к ужесточению: в октябре 2024 года ставки утилизационного сбора были увеличены на 80%, что интерпретируется как инструмент мотивации иностранных брендов к локализации производства [3]. Экономический эффект подобных мер проявляется в виде роста входной цены и перераспределения спроса между импортными и локализуемыми моделями, однако в краткосрочном периоде усиливается риск замедления проникновения электромобилей при отсутствии синхронного расширения зарядной инфраструктуры и доступных финансовых механизмов. В результате возникает «ножницы» между целями промышленной политики и задачами ускоренного внедрения низкоуглеродного транспорта, требующие более тонкой настройки инструментов с учетом полного жизненного цикла технологий и сетевых эффектов.

Техническое регулирование электротранспорта в ЕАЭС опирается на

требования ТР ТС 018/2011, выполняющего роль базового механизма обеспечения безопасности и качества продукции. С 1 января 2025 года предусмотрен возврат к полному объему норм регламента, что подразумевает обязательное оснащение транспортных средств системами ABS, ESC и актуальными средствами пассивной безопасности, включая модели, производимые в режиме локализации [11]. Тем самым снижается риск технологической деградации качества в условиях импортозамещения и одновременно повышаются требования к инженерной валидации компонентов, электронных блоков управления и интегрированных систем активной безопасности.

Для правомерного вывода электромобиля в обращение на рынке требуется пакет документов, различающийся по характеру выпуска и каналу поставки. СБКТС применяется для единичных транспортных средств, ввозимых из-за рубежа [3]. Для серийных моделей оформляется ОТТС, предполагающее проведение полного цикла заводских испытаний, подтверждающих соответствие требованиям безопасности [3]. Электронный паспорт транспортного средства (ЭПТС) является обязательным элементом регистрационного контура и используется при постановке на учет в подразделениях ГИБДД [3]. В совокупности данный документооборот формирует «контур доказательности» соответствия, однако его практическая реализация для электротранспорта усложняется высокой долей программно-аппаратных функций, требующих воспроизводимых методик тестирования и прозрачности испытательных протоколов.

Наиболее сложным элементом подтверждения соответствия выступают испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС), приобретающие критическое значение для электромобилей вследствие высокой мощности силовой электроники, наличия инверторов, DC/DC-преобразователей и систем высоковольтной

коммутации [3]. В условиях роста доли «цифровых» функций автомобиля (ADAS, телематика, удаленная диагностика) ЭМС становится фактором не только электробезопасности, но и функциональной надежности. Гармонизация подходов к ЭМС с требованиями ISO и IEC рассматривается как необходимое условие упрощения трансграничных поставок и взаимного признания результатов испытаний, поскольку снижает регуляторные издержки и уменьшает риск повторной сертификации при перемещении техники между юрисдикциями.

Инфраструктурный контур представляет собой ключевое ограничение масштабирования электромобильности, поскольку именно доступность зарядки определяет как фактическую, так и воспринимаемую пригодность технологии для повседневной эксплуатации. Международная статистика демонстрирует устойчивую корреляцию между долей электромобилей в продажах и плотностью зарядных станций на миллион реализованных машин [10]. При этом значение имеют не только количественные показатели, но и качество инфраструктуры: распределение по мощности, надежность, совместимость протоколов, доступность оплаты и интероперабельность операторов, формирующие единое пользовательское пространство и снижающие транзакционные издержки владения.

Перспективным направлением технологической интеграции выступает включение электромобилей в архитектуру интеллектуальных энергосистем. Технология Vehicle-to-Grid (V2G) позволяет возвращать энергию из тяговой батареи в сеть в периоды пикового спроса, превращая автопарк в распределенный источник гибкости. Практические реализации включают пилот в Риалто (Калифорния), где электрические автобусы используются для стабилизации городской сети, проект в аэропорту Осло Гардермуэн с участием припаркованных автомобилей в балансировке нагрузки, а также инициативы в Утрехте, где концепция Smart Charging внедрена на уровне жилого квартала [6]. Экономико-регуляторный смысл V2G заключается в монетизации услуг гибкости, однако для внедрения в Российской Федерации требуется формирование нормативного поля агрегаторов, унификация протоколов обмена данными и разработка тарифных конструкций, позволяющих фиксировать и оплачивать вклад транспорта в балансировку сети, не создавая при этом стимулов к ускоренной деградации батарей.

Отдельное значение приобретает переход к планированию зарядной инфраструктуры на основе данных, позволяющий избегать как дефицита мощностей, так и неэффективного избыточного строительства. Германия демонстрирует развитую практику использования цифровых инструментов, включая StandortTOOL, для выбора размещения зарядных хабов на основе анализа транспортных потоков и доступности сетевых мощностей [6]. Тиражирование подобных решений в ЕАЭС

потенциально повышает отдачу бюджетных инвестиций за счет более точного приоритизирования локаций, моделирования сценариев спроса, учета ограничений распределительных сетей и оптимизации состава оборудования по мощности и типу зарядки.

Экономические и социально-экологические эффекты электрификации транспорта имеют многоканальную природу и проявляются как на уровне затрат жизненного цикла, так и на уровне рынка труда и качества городской среды. Во Франции и Нидерландах электрификация автобусных парков сопровождалась созданием значимого числа рабочих мест в инновационных сегментах (5–7 тыс. во Франции), включая производство батарей, сервисные цепочки и разработку цифровых решений управления зарядкой [8]. Такой эффект обусловлен формированием новой цепочки добавленной стоимости, где занятость смещается от традиционных сервисных операций к инженерным компетенциям в области электроники, программного обеспечения и энергетической инфраструктуры.

Экологический результат выражается в существенном сокращении выбросов и сопутствующих загрязнителей. Для французских программ приводится снижение CO<sub>2</sub> на 900–1100 тонн в год на каждые 100 автобусов [8], а также уменьшение выбросов оксидов азота (NO<sub>x</sub>) на 12–15 тонн в год на 100 единиц техники [9]. Улучшение качества воздуха и снижение шумовой нагрузки коррелируют с ростом привлекательности общественного транспорта, что в ряде городов ассоциировано с увеличением пассажиропотока на 8–12% [8]. В аналитическом плане важна корректная постановка границ оценки: максимальный эффект достигается при одновременной оптимизации маршрутной сети, приоритетах движения и декарбонизации электрогенерации, поскольку климатический профиль электротранспорта определяется структурой энергобаланса.

В институциональном измерении долгосрочная экономическая устойчивость электрификации общественного транспорта усиливается при комбинировании мер: нормативного закрепления требований к безопасности и совместимости, инфраструктурных инвестиций, а также инструментов, компенсирующих капитальные затраты в начальной фазе перехода. Связка технического регулирования, цифрового планирования инфраструктуры и механизмов монетизации сетевой гибкости (включая V2G) формирует условия, при которых электромобильность перестает быть нишевой технологией и переходит в режим системного элемента транспортно-энергетического комплекса.

#### **Заключение**

Таким образом развитие электротранспорта в 2024–2025 годах отражает смещение от фазы ранней диффузии к этапу индустриального

встраивания в производственные, инфраструктурные и энергетические контуры. Международная практика показывает, что результативность декарбонизации в транспортной сфере формируется не из изолированных мер, а из согласованного сочетания регуляторных решений, фискальных стимулов и технологических новаций, обеспечивающих предсказуемость рынка и ускорение масштабирования.

Для Российской Федерации и государств ЕАЭС наиболее значимыми остаются следующие проблемные узлы. Во-первых, сохраняется потребность в выравнивании регуляторной архитектуры союза: ограничения на трансграничное перемещение электромобилей, приобретенных с использованием льготных режимов, а также расхождения в применении утилизационного сбора препятствуют формированию устойчивого единого рынка и снижают эффективность кооперационных механизмов. Во-вторых, актуализируется задача модернизации технического регулирования: восстановление в 2025 году полного объема требований ТР ТС 018/2011 усиливает давление на производителей и требует ускоренного освоения выпуска критически значимых компонентов, включая ABS, ESP и элементы пассивной безопасности, без которых невозможно обеспечение нормативной совместимости и конкурентоспособности продукции.

В-третьих, воспроизводится инфраструктурный дисбаланс, функционально ограничивающий спрос: крайне низкая доля электромобилей в РФ (0,12%) коррелирует с недостаточной плотностью зарядной сети и отсутствием обязательных строительных требований по оснащению парковочных пространств зарядными устройствами, сопоставимых с французской практикой. В-четвертых, перспективное направление связано с развитием архитектуры Smart Grid: включение электротранспорта в энергосистему через решения V2G способно стать инструментом управления ростом пиковых нагрузок и повышения гибкости сети, однако практическая реализация предполагает формирование стандартов интероперабельности, а также настройку тарифного регулирования, позволяющего экономически обосновать двусторонние режимы обмена энергией.

### Источники

1. Tesla, Inc. Fourth Quarter and Full Year 2024 Update. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ir.tesla.com/\\_flysystem/s3/sec/000162828025002993/tsla-20250129-gen.pdf](https://ir.tesla.com/_flysystem/s3/sec/000162828025002993/tsla-20250129-gen.pdf) (дата обращения: 09.09.2025).

2. В России числится порядка 140 тысяч электрокаров и гибридов // АВТОСТАТ. [Электронный ресурс]. – Оpubл. 08.09.2025. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/60792/> (дата обращения: 05.12.2025).

3. Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 23.05.2025 № 45 «О внесении изменений в Решение Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 877». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://docs.eaeunion.org/upload/iblock/ad6/1iwzhdekkf14gwwf6rnkn17yinpfi7o/Reshenie-Soveta\\_-45-ot-23-maya-2025-g.pdf](https://docs.eaeunion.org/upload/iblock/ad6/1iwzhdekkf14gwwf6rnkn17yinpfi7o/Reshenie-Soveta_-45-ot-23-maya-2025-g.pdf) (дата обращения: 12.09.2025).

4. Продажи новых электромобилей в России впервые за год показали рост // Expert.ru. [Электронный ресурс]. – Оpubл. 14.08.2025. – Режим доступа: <https://expert.ru/news/prodazhi-novykh-elektromobiley-v-rossii-vpervye-za-god-pokazali-rost/> (дата обращения: 29.12.2025).

5. Policies to promote electric vehicle deployment // Global EV Outlook 2021. – International Energy Agency (IEA), 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment> (дата обращения: 23.09.2025).

6. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). E-Mobility Compendium: Best Practices and Case Studies on EV Charging Infrastructure Deployment and Energy System Integration. [Электронный ресурс]. – Оpubл. 25.06.2025; обновл. 10.07.2025. – Режим доступа: <https://unece.org/sed/documents/2025/06/reports/e-mobility-compendium-best-practices-and-case-studies-ev-charging> (дата обращения: 08.10.2025).

7. ЕАЭС продлевает тарифную льготу на ввоз электромобилей до конца 2025 года // Евразийская экономическая комиссия. [Электронный ресурс]. – Оpubл. 24.11.2023. – Режим доступа: <https://eec.eaeunion.org/news/eaes-prodlevaet-tarifnuyu-lgotu-na-vvoz-elektromobiley-do-kontsa-2025-goda/> (дата обращения: 17.10.2025).

8. Mucka A. Innovations in the field of urban transport on the example of electric bus programmes in France and the Netherlands // Management and Business. – Т. 3. – № 1. – С. 58–71. <https://doi.org/10.59214/mb/1.2025.58>.

9. Giagnorio M., Börjesson M., D'Alfonso T. Introducing electric buses in urban areas: Effects on welfare, pricing, frequency, and public subsidies // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – Т. 185. – 2024. – Article 104103. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104103>.

10. Alam M. M., Lee Y. Cleaner Vehicles and Charging Infrastructure: Greening Passenger Fleets for Sustainable Mobility // Transport Decarbonization Investment (TDI) Discussion Paper. – Washington, DC: World Bank Group, 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/56f4064fff7bab0a9b2d0cd6c7af218d-0460012021/original/-TDI-2-Cleaner-Vehicles-and-Charging-Infrastructure.pdf> (дата обращения: 26.11.2025).

11. Вступают в силу изменения в ТР ТС 018 // GOV.KZ. [Электронный ресурс]. – Оpubл. 20.10.2025. – Режим доступа: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mps/press/news/details/1080662?lang=ru> (дата обращения: 15.11.2025).

### References

1. Tesla, Inc. Fourth Quarter and Full Year 2024 Update. [Electronic resource]. – Available at: <https://ir.tesla.com/flysystem/s3/sec/000162828025002993/tsla-20250129-gen.pdf> (Accessed: September 9, 2025).
2. There are approximately 140,000 electric and hybrid cars in Russia // AUTOSTAT. [Electronic resource]. – Published September 8, 2025. – Available at: <https://www.autostat.ru/infographics/60792/> (Accessed: December 5, 2025).
3. Decision of the Council of the Eurasian Economic Commission of May 23, 2025, No. 45, "On Amendments to the Decision of the Customs Union Commission of December 9, 2011, No. 877." [Electronic resource]. – Available at: <https://docs.eaeunion.org/upload/iblock/ad6/liwhdekk tf14gwvf6rnlnk17yinpfi7o/Reshenie-Soveta-45-ot-23-maya-2025-g.pdf> (accessed: September 12, 2025).
4. Sales of new electric vehicles in Russia showed growth for the first time in a year // Expert.ru. [Electronic resource]. – Published August 14, 2025. – Available at: <https://expert.ru/news/prodazhi-novykh-elektromobiley-v-rossii-vpervye-za-god-pokazali-rost/> (Accessed: 29.12.2025).
5. Policies to promote electric vehicle deployment // Global EV Outlook 2021. – International Energy Agency (IEA), 2021. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/policies-to-promote-electric-vehicle-deployment> (Accessed: 23.09.2025).
6. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). E-Mobility Compendium: Best Practices and Case Studies on EV Charging Infrastructure Deployment and Energy System Integration. [Electronic resource]. – Published. 25.06.2025; Updated July 10, 2025. Available at: <https://unece.org/sed/documents/2025/06/reports/e-mobility-compendium-best-practices-and-case-studies-ev-charging> (Accessed October 8, 2025).
7. The EAEU extends the tariff exemption on the import of electric vehicles until the end of 2025 // Eurasian Economic Commission. [Electronic resource]. Published November 24, 2023. Available at: <https://eec.eaeunion.org/news/eaes-prodlevaet-tarifnuyu-lgotu-na-vvoz-elektromobiley-do-kontsa-2025-goda/> (Accessed October 17, 2025).
8. Mucka A. Innovations in the field of urban transport on the example of electric bus programs in France and the Netherlands // Management and Business. – T. 3. – No. 1. – P. 58–71. <https://doi.org/10.59214/mb/1.2025.58>.
9. Giagnorio M., Börjesson M., D'Alfonso T. Introducing electric buses in urban areas: Effects on welfare, pricing, frequency, and public subsidies // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – T. 185. – 2024. – Article 104103. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104103>.
10. Alam M. M., Lee Y. Cleaner Vehicles and Charging Infrastructure: Greening Passenger Fleets for Sustainable Mobility // Transport Decarbonization Investment (TDI) Discussion Paper. – Washington, DC: World Bank Group, 2021. [Electronic resource]. – Access mode: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/56f4064fff7bab0a9b2d0cd6c7af218d-0460012021/original/-TDI-2-Cleaner-Vehicles-and-Charging-Infrastructure.pdf> (accessed: 26.11.2025).
11. Amendments to TR CU 018 come into force // GOV.KZ. [Electronic resource]. – Published. 20.10.2025. – Access mode: <https://www.gov.kz/memleket/entities/mps/press/news/details/1080662?lang=ru> (accessed: 15.11.2025).

УДК 65.011.56

---

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ КРУПНЫХ  
ОРГАНИЗАЦИЙ: ПРОБЛЕМА ИЗМЕРИМОСТИ И УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ АТРИБУЦИИ  
РЕЗУЛЬТАТА**

---

**Кривяков П.М.**  
Бизнес и ИТ консалтинг,  
Москва, Россия.

**ECONOMIC EFFECTS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN LARGE ORGANIZATIONS: THE  
PROBLEM OF MEASURABILITY AND MANAGERIAL ATTRIBUTION OF RESULTS**

**Krovyakov P.M.**  
Business and IT consulting,  
Moscow, Russia.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2228

**АННОТАЦИЯ**

В условиях активной цифровой трансформации крупные организации направляют значительные инвестиции во внедрение CRM-, ERP-, SRM-, HRM- и BI-систем, предполагая достижение устойчивого роста финансовых показателей и повышение операционной эффективности. Однако эмпирическая практика демонстрирует отсутствие прямой линейной зависимости между объёмом цифровых инвестиций и динамикой таких метрик, как EBITDA, рентабельность инвестиций (ROI) и прибыль на одного сотрудника. Цель исследования заключается в выявлении экономических ограничений измерения эффекта цифровой трансформации и анализе факторов, затрудняющих управленческую атрибуцию финансового результата конкретным цифровым инициативам. Методология основана на сочетании аналитического обзора научных публикаций и эмпирического анализа агрегированных данных шести российских многопрофильных холдингов в горизонте 1–3 лет после внедрения цифровых решений. В ходе исследования установлены нелинейный характер взаимосвязи цифровых инвестиций и финансовых показателей, наличие временного лага проявления эффекта, перераспределение управленческой нагрузки вместо её сокращения, а также размывание экономического результата при одновременной реализации нескольких трансформационных проектов. Сделан вывод о том, что прирост EBITDA, ROI и прибыли на сотрудника не может быть однозначно атрибутирован отдельным цифровым инициативам без изменения управленческой архитектуры и системы оценки эффективности.

**ABSTRACT**

In the context of ongoing digital transformation, large organizations allocate substantial investments to the implementation of CRM, ERP, SRM, HRM, and business intelligence systems, expecting improvements in financial performance and operational efficiency. However, empirical evidence does not confirm a stable linear relationship between digital investments and key financial indicators such as EBITDA, return on investment (ROI), and profit per employee. The purpose of this study is to identify the economic limitations of measuring digitalization effects and to analyze the factors that complicate managerial attribution of financial outcomes to specific digital initiatives. The methodology combines a structured literature review with an empirical analysis of aggregated data from six Russian diversified holdings observed over a period of one to three years following the implementation of digital solutions. The findings reveal a nonlinear relationship between digital investments and financial performance, a significant time lag in the manifestation of economic effects, a redistribution rather than reduction of managerial workload, and the dilution of measurable results when multiple transformation initiatives are implemented simultaneously. The study concludes that increases in EBITDA, ROI, and profit per employee cannot be directly and unambiguously attributed to individual digital projects without corresponding changes in managerial architecture and performance evaluation systems.

**Ключевые слова:** Цифровая трансформация, экономическая эффективность, инвестиции в ИТ, EBITDA, ROI, прибыль на сотрудника, управленческая атрибуция.

**Keywords:** Digitalization; Digital transformation; Economic efficiency; IT investments; EBITDA; Return on investment (ROI); Managerial attribution; Organizational transformation.

**Введение**

Цифровая трансформация рассматривается как стратегический инструмент повышения конкурентоспособности и эффективности крупных организаций [9], [13]. В научной литературе цифровая трансформация определяется как комплекс изменений бизнес-модели, процессов, управленческих практик и организационных способностей (capabilities), формирующих

долгосрочную конкурентоспособность компании [10], [11], [14]. В управленческой логике цифровые инициативы связываются с ростом прозрачности, оптимизацией издержек и улучшением финансовых показателей, включая повышение производительности труда и эффективности использования человеческого капитала [5].

Однако на практике прямая корреляция между объёмом цифровых инвестиций и динамикой

финансовых метрик нередко отсутствует. Несмотря на внедрение ERP, CRM, BI и других систем, рост EBITDA и ROI фиксируется не всегда либо проявляется с существенным временным лагом.

Проблема измеримости экономического эффекта цифровой трансформации обусловлена сложностью атрибуции результата в условиях параллельных управленческих изменений, институциональной инерции и многофакторной природы финансовых показателей [3], [7]. В ряде исследований подчёркивается, что технологические инвестиции не гарантируют экономического эффекта без изменения управленческой стратегии и архитектуры принятия решений [12].

Цель настоящего исследования — анализ экономических ограничений оценки эффективности цифровых инициатив и выявление факторов, затрудняющих управленческую атрибуцию финансового результата в крупных организациях.

#### Методология исследования

Исследование реализовано в рамках смешанного исследовательского дизайна (mixed-method approach), сочетающего аналитический обзор научной литературы и эмпирический анализ управленческих данных [9]. Методологическая конструкция включает три взаимодополняющих блока:

1. систематизированный анализ теоретических подходов к цифровой трансформации и оценке её экономической эффективности;

2. продольный (longitudinal) анализ динамики финансовых показателей;

3. экспертную оценку управленческой атрибуции финансового результата цифровым инициативам.

Эмпирическая выборка включает 6 многопрофильных российских холдингов с численностью персонала более 1000 сотрудников и активами свыше 1 млрд рублей, функционирующих в сферах промышленности, девелопмента, гостиничного бизнеса и инфраструктуры. Горизонт наблюдения составил от 1 до 3 лет после внедрения цифровых решений.

Объектами анализа выступали проекты внедрения CRM-, ERP-, SRM-, HRM-систем и BI-

инструментов. Для оценки экономического эффекта использовались следующие показатели: EBITDA, рентабельность инвестиций (ROI) цифровых проектов и прибыль на одного сотрудника. Применялся сравнительный анализ динамики показателей публичной финансовой отчетности до внедрения цифровых решений и в последующие периоды (pre/post analysis).

Аналитическая процедура включала описательный статистический анализ, сопоставление трендов, а также межкейсовую идентификацию повторяющихся управленческих закономерностей (cross-case pattern analysis). Дополнительно проводилась структурированная экспертная оценка руководителей компаний, направленная на определение субъективно воспринимаемого вклада цифровых инициатив в общий финансовый результат.

С учётом ограниченного объёма выборки и агрегированного характера данных исследование не претендует на статистическую репрезентативность всей совокупности российских холдингов. Его задача заключается в выявлении устойчивых управленческих паттернов и институциональных ограничений измерения экономического эффекта цифровой трансформации в крупных организациях.

В качестве рабочей аналитической гипотезы предполагалось, что краткосрочная динамика финансовых показателей после внедрения цифровых решений не отражает их полного экономического потенциала вследствие временных лагов и институциональных факторов. Проверка гипотезы осуществлялась посредством сопоставления динамики показателей в горизонте одного, двух и трёх лет. Результаты сопоставления подтвердили наличие временного лага и отсутствие устойчивой краткосрочной корреляции между внедрением цифровых решений и динамикой финансовых метрик.

#### Основные результаты

Анализ показал, что в краткосрочном периоде (1 год) после внедрения цифровых решений значимого прироста EBITDA не зафиксировано в 4 из 6 компаний.

Средние показатели по выборке представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Средняя динамика финансовых показателей после внедрения цифровых инициатив

Показатель	1 год	2 года	3 года
EBITDA	+1,8 %	+4,2 %	+6,5 %
ROI цифровых проектов	отрицательный или 0–3 %	4–7 %	8–12 %
Прибыль на сотрудника	+0,9 %	+3,5 %	+5,8 %

Данные демонстрируют выраженный временной лаг. Существенный экономический эффект начинает проявляться преимущественно на 2–3-й год реализации.

Установлено, что внедрение цифровых решений в ряде случаев сопровождалось ростом операционных расходов (OPEX) в первый год вследствие:

- обучения персонала,
- параллельного функционирования старых и новых систем,
- увеличения нагрузки на ИТ-подразделения.

В 3 компаниях первый год сопровождался снижением ROI цифровых инициатив.

В период анализа параллельно реализовывались:

- организационные изменения,
- реструктуризация,
- оптимизация штата,
- изменения в системе закупок.

В результате рост EBITDA в 2 компаниях не может быть однозначно отнесён к цифровым инициативам. Экспертная оценка показала, что вклад цифровых решений в финансовый результат оценивался руководством субъективно и варьировался от 15 до 40 % от общего прироста.

В 4 компаниях автоматизация не привела к сокращению численности управленческого персонала в первые два года. Наблюдалось перераспределение функций и усиление аналитической нагрузки.

Это подтверждает тезис о том, что цифровая трансформация не всегда означает немедленное сокращение издержек.

#### **Обсуждение**

Представленные эмпирические данные позволяют рассматривать цифровую трансформацию как многоуровневый управленческий процесс, в котором экономический эффект формируется последовательно через технологический, организационный и финансовый уровни.

На технологическом уровне происходит внедрение ИТ-систем, автоматизация операций и формирование аналитических инструментов. Данный этап создаёт потенциал повышения эффективности, однако сам по себе не гарантирует роста финансовых показателей.

Ключевым звеном трансформации выступает организационный уровень. Он включает изменение бизнес-процессов, управленческих регламентов, распределения ответственности и механизмов принятия решений. Именно на этом уровне цифровые решения либо интегрируются в управленческую практику, либо остаются формально внедрёнными инструментами. В случае недостаточной адаптации процессов и управленческой архитектуры потенциальный эффект цифровых инвестиций частично утрачивается. Таким образом, организационный уровень становится зоной, в которой чаще всего «теряется» ожидаемый экономический результат.

Финансовый уровень отражает итоговую динамику EBITDA, ROI и прибыли на одного сотрудника. Однако данные показатели фиксируют уже опосредованный результат, сформированный через организационные изменения. Отсутствие управленческой трансформации объясняет выявленные временные лаги и сложность прямой атрибуции финансового эффекта отдельным цифровым инициативам. Полученные результаты подтверждают, что экономический эффект цифровой трансформации носит сложный, нелинейный характер. Выявленный временной лаг согласуется с выводами зарубежных исследований о стратегической природе цифровых преобразований [7], [8].

Полученные результаты позволяют интерпретировать цифровую трансформацию не как изолированный технологический проект, а как элемент более широкой институциональной трансформации организации. Это согласуется с подходом, рассматривающим цифровые инвестиции как фактор изменения организационных способностей, а не как непосредственный драйвер финансовых результатов.

Сложность атрибуции эффекта связана с многофакторностью финансовых показателей и институциональными особенностями крупных организаций [3], [5].

Таким образом, оценка эффективности цифровых инициатив требует перехода от краткосрочных метрик к среднесрочной и системной модели анализа.

#### **Практические рекомендации**

В условиях цифровой трансформации целесообразно смещать акцент оценки результативности от агрегированных финансовых метрик к показателям организационной производительности. В частности, прибыль на одного сотрудника может выступать более чувствительным индикатором цифровой отдачи, поскольку отражает трансформацию эффективности использования человеческого капитала и степень интеграции цифровых решений в управленческую практику. На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Оценивать экономический эффект в горизонте не менее 2–3 лет.
2. Разделять эффект технологических и организационных изменений.
3. Использовать комбинированную модель KPI (финансовые + процессные).
4. Не включать краткосрочный рост EBITDA в обязательные критерии успеха цифрового проекта.
5. Внедрять методику поэтапной атрибуции вклада цифровых инициатив.

#### **Заключение**

Проведённое исследование подтверждает, что цифровая трансформация крупных организаций не обеспечивает линейного и мгновенного роста финансовых показателей. Экономическая отдача цифровых инициатив формируется опосредованно — через трансформацию управленческой архитектуры, бизнес-процессов и механизмов принятия решений. Выявленный временной лаг и сложность управленческой атрибуции результата свидетельствуют о том, что финансовые метрики отражают не сам факт внедрения технологий, а степень их организационной интеграции.

Таким образом, цифровые инвестиции создают потенциал повышения эффективности, однако его реализация зависит от глубины организационных изменений и способности компании адаптировать управленческие практики к новым технологическим возможностям. Отсутствие трансформации на организационном уровне

приводит к частичной утрате ожидаемого экономического эффекта и затрудняет его корректную оценку.

Для топ-менеджмента это означает необходимость рассматривать цифровую трансформацию не как изолированный ИТ-проект, а как комплексную управленческую трансформацию, требующую пересмотра процессов, ролей и системы КРІ. Кроме того, принятие инвестиционных решений в области цифровых технологий должно сопровождаться формированием механизмов поэтапной атрибуции эффекта и оценкой результатов в среднесрочной перспективе, а не только в горизонте одного финансового года. Данные положения вытекают из выявленной многоуровневой природы цифрового эффекта. Тем самым подтверждается необходимость интеграции технологических и управленческих решений в рамках единой стратегии трансформации.

Следовательно, цифровая трансформация должна рассматриваться как стратегический управленческий процесс, в котором технологические решения выступают лишь инструментом более глубокой институциональной перестройки организации. Без изменения логики управления и системы оценки результативности даже масштабные цифровые инвестиции не обеспечивают устойчивого финансового эффекта [13].

#### Список литературы

- 1.Бабкин А. В., Бурцев В. В. Цифровая трансформация промышленных предприятий: экономические аспекты // Экономика и управление. — 2022. — № 8. — С. 14–23.
- 2.Волкова Т. А., Назаренко И. А. Оценка экономической эффективности цифровых проектов в крупных компаниях // Финансовая аналитика: проблемы и решения. — 2023. — Т. 16, № 4. — С. 52–64.
- 3.Глазьев С. Ю. Институциональные ограничения развития цифровой экономики // Вопросы экономики. — 2021. — № 11. — С. 5–18.
- 4.Дементьев В. Е. Экономическая оценка инновационных инвестиций: теория и практика. — М. : Юрайт, 2022. — 312 с.
- 5.Капелюшников Р. И. Производительность труда и управленческие факторы эффективности // Экономический журнал ВШЭ. — 2020. — Т. 24, № 3. — С. 345–368.
- 6.Сафронов А. А. Методы измерения эффективности цифровой трансформации бизнеса // Менеджмент и бизнес-администрирование. — 2024. — № 2. — С. 33–45.
- 7.Brynjolfsson E., Hitt L. M. Beyond computation: Information technology, organizational transformation and business performance // Journal of Economic Perspectives. — 2000. — Vol. 14, No. 4. — P. 23–48.
- 8.Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C. Artificial intelligence and the modern productivity paradox // NBER Working Paper. — 2017. — No. 24001. — 44 p.
- 9.Kraus S., Durst S., Ferreira J. J., Veiga P., Kailer N., Weinmann A. Digital transformation in business and management research: An overview of the current status // International Journal of Information Management. — 2022. — Vol. 63. — 102465.
- 10.Li L., Su F., Zhang W., Mao J. Digital transformation by SME entrepreneurs: A capability perspective // Information Systems Journal. — 2018. — Vol. 28, No. 6. — P. 1129–1157.
- 11.Nambisan S., Wright M., Feldman M. The digital transformation of innovation and entrepreneurship: Progress, challenges and key themes // Research Policy. — 2019. — Vol. 48, No. 8. — 103773.
- 12.Sebastian I. M., Ross J. W., Beath C. M., Mocker M., Moloney K. G., Fonstad N. O. How big old companies navigate digital transformation // MIS Quarterly Executive. — 2017. — Vol. 16, No. 3. — P. 197–213.
- 13.Verhoef P. C., Broekhuizen T., Bart Y., Bhattacharya A., Dong J. Q., Fabian N., Haenlein M. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda // Journal of Business Research. — 2021. — Vol. 122. — P. 889–901.
- 14.Vial G. Understanding digital transformation: A review and a research agenda // Journal of Strategic Information Systems. — 2019. — Vol. 28, No. 2. — P. 118–144.

---

**VARIABLE STRUCTURE MULTI-MODEL ALGORITHM FOR TRACKING SURFACE  
MANEUVERING TARGETS**

---

*Le Minh Hoang, Vu Ngoc Vinh**Naval Technical Institute,**Hai Phong, Vietnam**Dao Van Luc**Academy of Science and Technology,**Ha Noi, Vietnam*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2229

**ABSTRACT**

The development of maritime and inland waterway transport has led to increasingly stringent requirements for security and safety systems in waterway transport. One measure to improve maritime safety is to improve data processing methods in ship control systems, including the issue of target trajectory tracking. The problem of tracking maneuvering surface targets using multi-model filters has attracted significant research attention. Multi-model algorithms, in particular the Interactive Multiple Model (IMM) algorithm, are considered effective methods for filtering and estimating target trajectories. However, traditional multiple-model algorithms with fixed structures exhibit notable limitations when applied to highly maneuvering targets. To overcome these limitations, variable-structure multiple-model (VSMM) algorithms have been proposed, allowing the model set to be adaptively adjusted according to the target's motion state. In this study, a VSMM algorithm based on an adaptive grid method is proposed for tracking surface targets performing constant-speed turning motion. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** target tracking, trajectory processing, trajectory filtering, multiple-model algorithm, VSMM algorithm, adaptive grid algorithm, coordinated turn model.

**Introduction.** The oceans cover three quarters of the Earth's surface. According to the IMO (International Maritime Organization) of the United Nations, more than 90% of all foreign trade cargo is transported by sea [1]. At the same time, the number of ships is constantly increasing. Consequently, the demand for maritime transport safety systems is growing. Among the measures aimed at improving maritime safety, the enhancement of data processing methods in ship control systems occupies an important position. One of the stages of radar data processing is the construction of trajectories of surface objects. A large number of surface targets are tracked simultaneously, which requires the use of appropriate trajectory filtering algorithms.

Multi-model (MM) algorithms [2–4] are widely accepted as effective methods for filtering the trajectory parameters of moving targets. These algorithms are characterized by the fact that at any given time, not one but several target motion models are employed, each representing a possible mode of target motion. By generating estimates of trajectory parameters for each model and evaluating their likelihood, the computational filter estimates the resulting state vector as a weighted sum of these local estimates.

Traditional MM algorithms, among which the most popular is the IMM algorithm [5–7], are classified as fixed-structure MM algorithms (FSMM), in which the set of models and their parameters are specified once and for all before the start of the filter. However, this approach has certain drawbacks. For targets whose maneuvering mode is unknown, it is necessary to use a sufficiently large set of models covering the entire range of possible maneuvers, which significantly increases the computational burden. Moreover, increasing the number of models does not guarantee an

improved tracking accuracy, as competition between models arises.

To overcome the aforementioned problems, variable-structure multiple-model (VSMM) algorithms have been proposed [8, 9]. The essence of these algorithms is to adapt the parameters or the structure of the algorithm depending on the nature of the target's motion [10]. There are various directions of adaptation, among which the grid adaptation method is most commonly considered [11]: the adaptive grid multiple model (AGMM) algorithm [12]. The grid is used to describe multiple models and consists of a set of values within a continuous interval of the target maneuver parameter (for example, the turn rate when using the constant turn (CT) model). The adaptive grid algorithm determines the values of the grid points, which are assigned to the filter bank at each estimation step as tuning parameters selected from the continuous maneuver-parameter interval.

The literature reports the application of AGMM algorithms for tracking airborne targets performing coordinated turns [13] and linear acceleration [14]. The aim of this work is to study the possibility of using grid adaptive multi-model algorithms for tracking surface targets, as well as to compare their effectiveness with the IMM algorithm under different tuning parameters.

**Variable-structure MM.** The IMM algorithm's set of models is fixed and typically includes a large set of models covering the entire range of possible maneuvers. For example, for targets making intense turns at a constant speed, this includes one model for straight-line motion (the CV model, constant velocity) and 4–8 CT models designed for different turning speeds. Accordingly, the IMM uses 5–9 filters operating in parallel. At the next evaluation step, each of these models is considered to correspond to the true target motion mode. Based on the mark assigned to the trajectory, filter estimates are calculated, model

likelihoods are estimated, and the resulting estimate is found as the sum of local estimates, weighted by these likelihoods and the predefined transition probabilities.

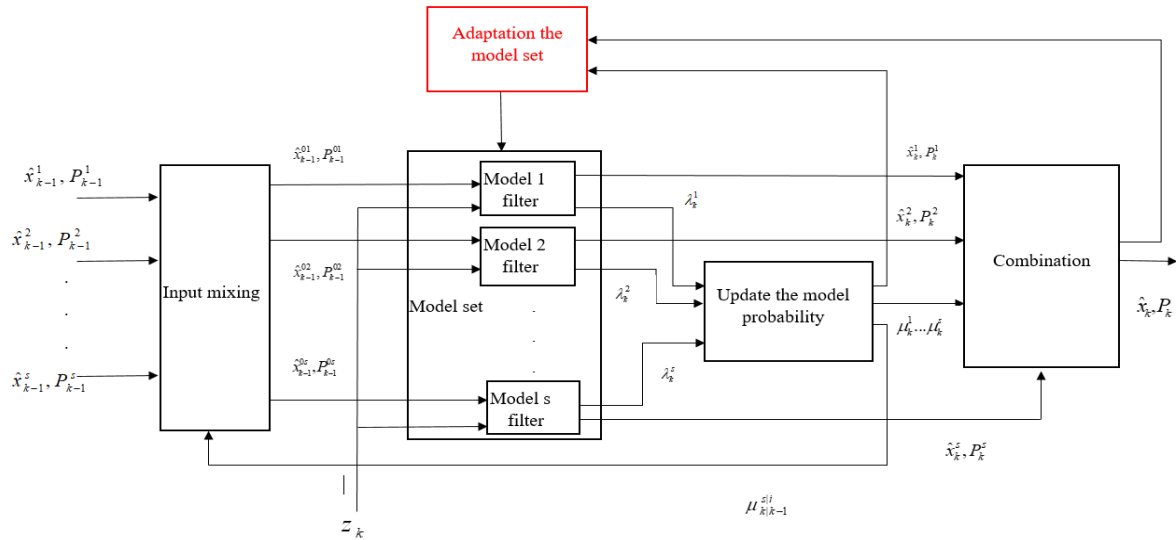


Figure 1: Generalized block diagram of the VSMM

The VSMM algorithm employs a more compact set of models whose structure and parameters are adaptively adjusted to the changing motion mode of the target. Fig. 1 presents a generalized block diagram of the VSMM algorithm. Compared with the basic IMM algorithm, the VSMM includes a model set adaptation module, which is used to determine the set of models to be activated at a given time. Based on the filtering results of each model (i.e., their state vectors and likelihoods), the values of the maneuver parameter (turn rate) are estimated for the entire model set so that the updated set more accurately matches the true motion mode of the target.

This paper explores the adaptive grid method. The model set uses three models, each tuned to its own turn rate. The basic idea of the method is that the turn rate value for each model is selected from a continuous set.

Thus, in general, the VSMM algorithm is similar to the standard IMM algorithm; however, it includes one additional stage—the adaptation of the model set, for which adaptive grid (AG) algorithms are used in our study.

The VSMM algorithm consists of the following six steps.

### 1. Adaptation the model set.

Assume that the actual turn rate of the maneuvering target at the current time is unknown, but lies within a continuous interval  $[-\omega_{max}, \omega_{max}]$  where  $\omega_{max}$  - maximum possible turn rate of the given target, taking into account physical constraints. We construct a time-varying set of three models, which at a certain time instant  $k$  has the following form:  $M_k = [\omega_L^k \ \omega_C^k \ \omega_R^k]$ , where the turn rate values of each

model (grid values) are  $(\omega_L^k, \omega_C^k, \omega_R^k) \in [-\omega_{max}, \omega_{max}]$   $k = 1, 2, \dots, N$ . The letters L, C, R denote the left, central, and right models of the MM configuration, respectively.

The model shift diagram in the AG algorithm is shown in Fig. 2. The top line shows the range of possible turning speeds  $[-\omega_{max}, \omega_{max}]$ . At any given moment, the model set AG contains three models: the right, center, and left models. An arrow from one model to another indicates the direction of model shift. Arrows on either side indicate possible shifts to the right or left. Both the center of the model set and the distance between them can be adjusted according to a given decision rule.

In the VSMM algorithm with an adaptive grid scheme, the decision rule consists of two main elements: first, retuning the grid center; and second, retuning the grid spacing. The grid center is the parameter of the central model ( $\omega_C$ ), while the grid distance (step) is the interval between the parameters of any two neighboring models.

The true value of the current turn-rate parameter lies within the parameter domain covered by the entire model set. However, if the true parameter value is outside this domain or close to its boundary, this fact must be detected immediately and appropriate actions for adapting the model set must be taken, including shifting the models and expanding the parameter domain. The VSMM algorithm is initially run with initial values  $M_0 = [\omega_L^0 \ \omega_C^0 \ \omega_R^0]$ , which are chosen for the same reasons as for the conventional IMM [15]. At each evaluation step, two parameters are adjusted as needed: the grid center and the grid step.

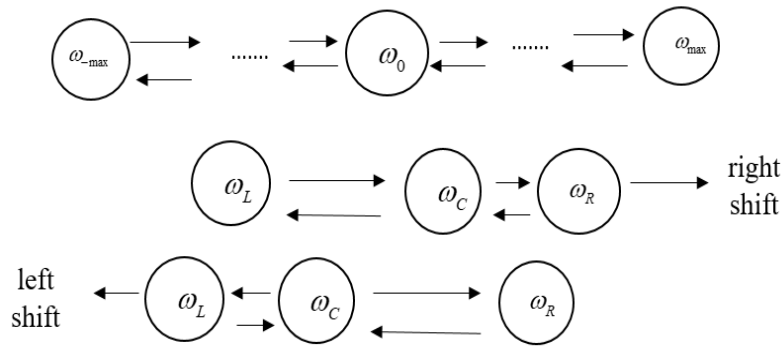


Figure 2: Model shift diagram. The grid center adjustment. The position of the grid center is adjusted if the a posteriori probability of the central model  $\mu_C^k$  falls below a predefined threshold  $t_1$ , and  $\Delta$  is determined by the following expression:

$$\omega_C^{k+1} = \sum_{i=1}^N \mu_i^k \omega_i^k, (1)$$

where  $\mu_i^k$  – posterior probability of the  $i$ -th model at the time  $k$ . Otherwise, the position of the set of models does not change, i.e.  $\omega_C^{k+1} = \omega_C^k$ .

The grid step adjustment. The grid distance is adjusted according to the following rules:

1) If the central model has the highest probability among all models, i.e.  $\mu_C^k = \max\{\mu_i^k\}_{i=1,N}$ , there is no model shift. However, if the left and/or right models are determined to be unlikely (that is, the posterior probability of the model is less than the chosen threshold value  $t_2$ ), the corresponding distance of this model will be halved:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \frac{\delta_L^k}{2}, & \text{if } \mu_L^k < t_2; \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \frac{\delta_R^k}{2}, & \text{if } \mu_R^k < t_2; \\ \omega_C^{k+1} - \delta_R^k, & \text{otherwise} \end{cases}, (2)$$

where  $\delta_L^k = \max(\omega_C^k - \omega_L^k, r)$ ,  $\delta_R^k = \max(\omega_R^k - \omega_C^k, r)$  and  $t_2$  - threshold for detecting an unlikely model (for example, 0.05);  $r$  – model distance (design parameter). This action will help to reduce the range of velocity values and reduce estimation errors.

2) If the left model has the maximum probability among all models, i.e.  $\mu_L^k = \max\{\mu_i^k\}_{i=1,N}$ , a shift to the left is performed:

$$\omega_L^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - 2\delta_L^k, & \text{if } \mu_L^k > t_3; \\ \omega_C^{k+1} - \delta_L^k, & \text{otherwise} \end{cases};$$

$$\omega_R^{k+1} = \omega_C^{k+1} + \delta_R^k, (3)$$

where  $t_3$  - threshold for detecting a significant model (for example, 0.95). In this case, the left part of the parameter value range expands, and the distance between the center and the left model doubles.

3) If the right model has the maximum probability among all models, i.e.  $\mu_R^k = \max\{\mu_i^k\}_{i=1,N}$ , a shift to the right is performed:

$$\omega_R^{k+1} = \begin{cases} \omega_C^{k+1} - \delta_R^k; \\ \omega_C^{k+1} + 2\delta_R^k, & \text{if } \mu_R^k > t_3; \\ \omega_C^{k+1} + \delta_R^k, & \text{otherwise} \end{cases}, (4)$$

in this case, the right part of the parameter value range expands, and the distance between the center and the right model doubles.

#### 2. Calculate of a priori transition probabilities:

$$\mu_{k|k-1}^{s|i} = \frac{\pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_{k-1}} \pi_{is} \mu_{k-1}^i}. (7)$$

where  $\pi_{is}$  - probability of transition from the  $i$ -th model to the  $s$ -th model;  $\mu_{k-1}^i$  - probability of the  $i$ -th model at the  $k-1$ -th estimation step. Here and hereafter, the index  $i$  refers to the models at step  $k-1$ -th, and the index  $s$  refers to the models at step  $k$ -th.

#### 3. Determining the initial conditions of each filter of the $s$ -th model:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i \mu_{k|k-1}^{s|i};$$

$$\hat{P}_{k-1}^{0s} = \sum_{m_s \in M_{k-1}} \mu_{k|k-1}^{s|i} [P_{k-1}^i + (\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s}) \times (\mathbf{x}_{k-1}^i - \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s})^T], (8)$$

where  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^i$  и  $P_{k-1}^i$  – state vector and covariance of the  $i$ -th model at the  $k-1$ -th step.

#### 4. Filtration.

- Extrapolated estimate of the state vector and its covariance:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s = F(M_{k-1}^s) \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{0s};$$

$$P_{k|k-1}^s = F(M_{k-1}^s) P_{k-1}^{0s} F(M_{k-1}^s)^T + Q_{k-1}^s, (9)$$

where  $F$  – the transition matrix of the state of the Kalman filter model  $M_{k-1}^s$ ;  $Q_{k-1}^s$  – process noise covariance.

Extrapolated estimate of the measurement vector:

$$\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s = H(M_{k-1}^s) \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s, (10)$$

where  $H$  – observation matrix.

The residual vector and its covariance matrix:

$$\mathbf{y}_k^s = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}^s;$$

$$S_k^s = H(M_k^s)P_{k|k-1}^s H(M_k^s)^T + R_k, \quad (11)$$

where  $\mathbf{z}_k$  и  $R_k$  – current measurement and its covariance.

Matrix Kalman gain:

$$K_k^s = P_{k|k-1}^s H(M_k^s)^T (S_k^s)^{-1}; \quad (12)$$

State vector and its covariance matrix:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^s = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}^s + K_k^s \mathbf{y}_{k-1}^s;$$

$$P_k^s = P_{k|k-1}^s - K_k^s S_k^s (K_k^s)^T; \quad (13)$$

**5. Calculating posterior probabilities of the truth of models:**

$$\mu_k^s = \frac{\Lambda_k^s \sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i}{\sum_{m_s \in M_k} \pi_{is} \mu_{k-1}^i \Lambda_k^s}, \quad (14)$$

where  $\Lambda_k^s$  – likelihood function:

$$\Lambda_k^s = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m |S_k^s|}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (\mathbf{y}_k^s)^T (S_k^s)^{-1} (\mathbf{y}_k^s) \right], \quad (15)$$

( $m$  is the size of the vectors  $\mathbf{z}$  and  $\mathbf{y}$ ).

6. The result of the evaluation of the state vector and its covariance matrix:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{m_s \in M_k} \hat{\mathbf{x}}_k^s \mu_k^s;$$

$$P_k = \sum_{m_s \in M_k} \mu_k^s \{ P_k^s + [\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k] [\hat{\mathbf{x}}_k^s - \hat{\mathbf{x}}_k]^T \}. \quad (16)$$

Simulation result.

To analyze and evaluate the effectiveness of the proposed algorithm, a scenario of tracking a maneuvering target is considered. The target initially moves at a constant speed and then turns. Initial state of the target  $x_0 = y_0 = 1km$ ,  $v_{0x} = 10$  (miles)  $v_{0y} = 6$  (miles),  $\sigma_\rho = 60$  (M),  $\sigma_\alpha = 0.5^\circ$ , total motion time 750c, and other relevant motion parameters are shown in the table 1.

Table 1.

**Target movement parameters**

Time (c)	Turn rate speed (°/c)
0-90	0
90-180	-2
180-240	0
240-330	2
330-360	0
360-540	-1
540-600	0
600-750	1

For comparison, the IMM algorithm was chosen, which uses a fixed set of models with 5 rotation models  $M = [-2, -1, 0, 1, 2]$ . Initial probabilities of the model  $\mu_0 = [0.025 \ 0.025 \ 0.9 \ 0.025 \ 0.025]$ , Threshold  $t_1 = 0.3$ ,  $t_2 = 0.25$ ,  $t_3 = 0.75$ ,  $\omega_{max}$  and the transition probability matrix:

$$\pi_{is} = \begin{cases} 0,9 & \text{if } i = s \\ \frac{0,1}{N-1} & \text{if } i \neq s \end{cases}$$

where  $N$  – number of models.

The simulation results are presented in Fig. 3-8.

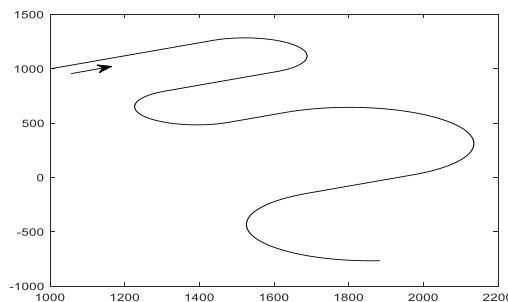


Figure 3: True trajectory

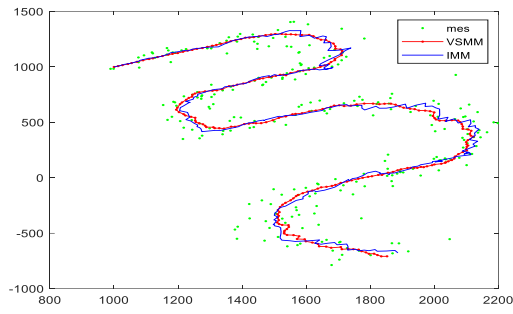


Figure 4: Trajectory after filtration

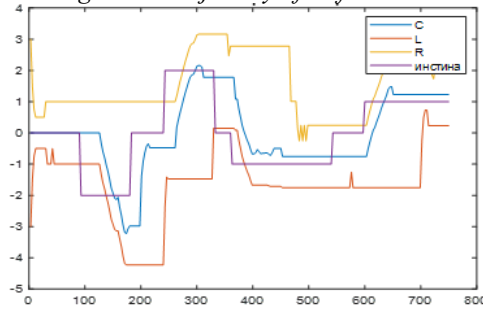


Figure 5: Changes of the turn speed

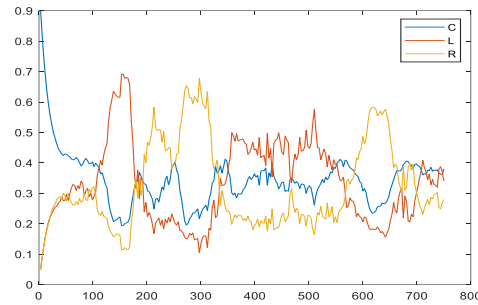


Figure 6: Model probabilities in VSMM

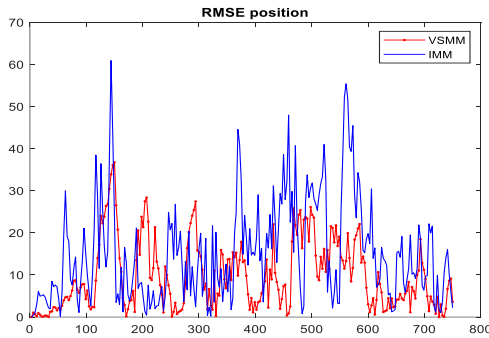


Figure 7: RMSE position

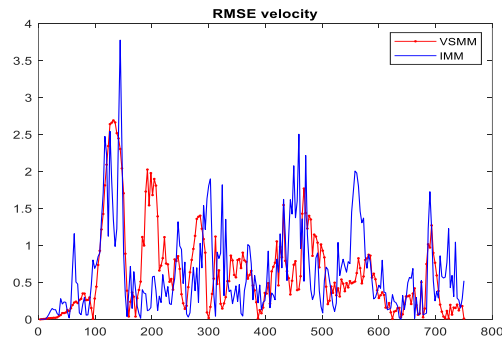


Figure 8: RMSE velocity

### Conclusions

VSM trajectory filtering algorithms for tracking maneuvering surface targets are considered. These algorithms employ a reduced set of motion models compared to the fixed-structure IMM algorithm, together with an appropriate decision rule for modifying model parameters, developed based on adaptive grid schemes. Simulation results show that the proposed method provides more accurate tracking of maneuvering targets than the conventional IMM. In addition, since fewer filters are used, the algorithms require lower computational cost. The proposed adaptive methods exhibit similar trajectory-tracking characteristics, including high accuracy and good adaptability to various target maneuvers.

### References

1. Global maritime transport and its staffing - statistics and analytics. Available at: <https://maritimeforum.net/data/articles/globalnye-morskije-perevozki-i-ih-kadrovoe-obespechenie.html> (accessed: 28.03.2024).
2. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York: Wiley & Sons, 2001. 558 p.
3. Li X. R., Jilkov V. P. A Survey of Maneuvering Target Tracking. Part V: Multiple-Model Methods // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005. Vol. 41, № 4. P. 1255–1321. doi: 10.1109/TAES.2005.1561886
4. Ryazantsev L. B. Multi-model Bayesian estimation of the state vector of a maneuverable air target in discrete time // Bulletin of TSTU. 2009. No. 4. P. 729–739. (in russian)
5. Blom H. A. P., Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients // IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, № 8. P. 780–783. doi: 10.1109/9.1299
6. Li X. R., Bar-Shalom Y. Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1993. Vol. 1, № 3. P. 186–194. doi: 10.1109/87.251886
7. Bakulev P. A., Sychev M. I., Lyu N. Ch. Tracking a maneuvering target using an interactive multi-model algorithm // Proceedings of MAI. Electronic journal. 2002. No. 9. pp. 1–8. (in russian)
8. Li X. R., Bar-Shalom Y. Mode-Set Adaptation in Multiple-Model Estimators for Hybrid Systems // 1992 American Control Conf. Chicago, USA, 24–26 June 1992. IEEE, 1992. P. 1794–1799. doi: 10.23919/ACC.1992.4792420
9. Munir A., Atherton D. P. Adaptive interacting multiple model algorithm for tracking a manoeuvring target // IEE Proc. on Radar, Sonar and Navigation. 1995. Vol. 142, № 1. P. 11–17. doi: 10.1049/ip-rsn:19951528
10. Li X. R. Engineer's guide to variable-structure multiple-model estimation for tracking / Multitarget-multisensor tracking: applications and advances. Vol. III. Boston: Artech House, 2000. P. 499–567.
11. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev T. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
12. Zhu Zw. Shipborne radar maneuvering target tracking based on the variable structure adaptive grid interacting multiple model. J. Zhejiang Univ. Sci. C. 2013. № 14. P. 733–742. doi: 10.1631/jzus.C1200335
13. Jilkov V. P., Angelova D. S., Semerdjiev Tz. A. Design and comparison of mode-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1999. Vol. 35, № 1. P. 343–350. doi: 10.1109/7.745704
14. Sun H.-M. Adaptive Filtering Techniques in Radar Tracking System with Variable-Structured Multiple-Model Estimator // J. of C.C.I.T. 2005. № 2. P. 27–45.
15. Konovalov A. A. Fundamentals of trajectory processing of radar information. Part 2. St. Petersburg: Publishing house of ETU "LETI", 2014. 180 p. (in russian).

УДК 004.9

---

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ВРЕМЕНИ ПЕРСОНАЛА**

---

*Поремов Е.С.**РТУ МИРЭА, институт информационных технологий (ИИТ),  
г. Москва***FEATURES OF DATA MODEL DESIGN FOR AN INFORMATION SYSTEM FOR EMPLOYEE WORKING TIME PLANNING***E. Poremov**RTU MIREA, institute of information technology (IIT),  
Moscow*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2230

**АННОТАЦИЯ**

В условиях усложнения процессов управления персоналом и роста требований к точности и гибкости планирования возрастает роль информационных систем планирования рабочего времени. Ключевым компонентом таких систем является модель данных, обеспечивающая корректный учёт смен, ролей пользователей, нормативных ограничений и истории изменений. В статье рассматриваются особенности проектирования модели данных информационной системы планирования рабочего времени персонала. Предлагаемый подход учитывает требования трудового законодательства, а также возможность расширения модели для решения аналитических и управленческих задач.

**ANNOTATION**

In the context of increasing complexity of workforce management processes and growing requirements for planning accuracy and flexibility, the role of information systems for working time planning is becoming increasingly important. A key component of such systems is the data model, which ensures correct accounting of work shifts, user roles, regulatory constraints, and change history. This paper examines the features of data model design for an information system for employee working time planning. The proposed approach takes into account labor regulation requirements and provides opportunities for extending the data model to support analytical and managerial tasks.

**Ключевые слова:** планирование рабочего времени, Workforce Management, модель данных, проектирование базы данных, информационная система, управление персоналом.

**Keywords:** working time planning, Workforce Management, data model, database design, information system, personnel management.

**Введение.** В современных организациях с посменным режимом работы эффективность управления персоналом в значительной степени определяется качеством планирования рабочего времени. Рост требований к точности расписаний, оперативности внесения изменений и соблюдению нормативных ограничений приводит к усложнению соответствующих информационных систем. В этих условиях ключевую роль начинает играть модель данных, определяющая способы хранения, обработки и анализа информации о сменах, сотрудниках, правилах планирования и выявляемых нарушениях.

Информационные системы планирования рабочего времени относятся к классу WFM-систем (Workforce Management) и характеризуются высокой транзакционной нагрузкой, необходимостью строгого соблюдения регламентов и поддержкой истории изменений. В отличие от простых учетных систем, такие решения должны обеспечивать согласованность данных при частых корректировках графиков, поддерживать различные режимы планирования и быть расширяемыми для последующего аналитического использования. Непродуманная модель данных в подобных системах приводит к потере целостности

информации, снижению производительности и усложнению сопровождения.

Особую сложность при проектировании модели данных WFM-систем представляет необходимость одновременного учета нескольких аспектов: структуры персонала, шаблонов смен, календарных ограничений, параметров труда, а также фиксации отклонений от нормативов и корректировок расписаний. Это требует взвешенного выбора архитектуры хранения данных и последовательного перехода от концептуального описания предметной области к логической и физической моделям базы данных.

**Цель исследования.** Цель данной статьи заключается в анализе и формализации особенностей проектирования моделей данных информационной системы планирования рабочего времени персонала.

**Материал и методы исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо определить требования к хранению и обработке данных, а также обосновать выбор архитектуры информационной базы, способной обеспечить консистентность, масштабируемость и поддержку регламентных ограничений. Архитектура информационной базы — это совокупность

принципов и механизмов организации, хранения и доступа к данным в информационной системе. В контексте автоматизированного планирования графиков работы сотрудников она должна гарантировать точность расписаний, оперативность обновлений, надёжный учёт изменений и бесшовную интеграцию с корпоративными HR- и расчётными платформами [1]. Для решения этих задач обычно рассматривают следующие типы моделей баз данных:

- реляционная;
- документно-ориентированная;
- ключ-значение;
- графовая;
- колоночная;
- newSQL;
- многомодельная.

Рассмотрим каждый из видов подробнее.

**Реляционная модель.** Данные хранятся в табличных структурах со строгой схемой: строки — записи, столбцы — атрибуты. Связи между таблицами задаются через ключи, а SQL-запросы позволяют гибко отбирать и агрегировать информацию. ACID-транзакции обеспечивают консистентность при одновременном редактировании расписаний и надёжный откат в случае ошибок.

**Документно-ориентированная модель.** Каждый объект представляет собой самостоятельный документ (JSON, BSON и т. п.) с динамической схемой. Подходит, если шаблоны смен отличаются по структуре, и нужно быстро вносить изменения в формат хранения. Однако возможности по сложным соединениям записей и транзакционной обработке уступают реляционным СУБД [2].

**Ключ-значение.** Простейший способ — хранение произвольных данных под уникальными ключами. Отличается очень высокой скоростью операций чтения/записи, но не предназначен для аналитики или сложных выборок, требующих объединения различных сущностей (сотрудник + шаблон + отчётность).

**Графовая модель.** Информация описывается в виде узлов и рёбер, что естественно отражает иерархии, связи замещения сотрудников и другие взаимоотношения. Оптимальна для глубокой аналитики связей, но избыточна для основной OLTP-нагрузки планирования смен [3].

**Колоночная модель.** Данные хранятся столбцами, а не строками, что ускоряет массовые аналитические операции (агрегация часов, отчёты за периоды). При этом любая мелкая транзакция (частое обновление смен) выполняется менее эффективно по сравнению с реляционной СУБД.

**NewSQL.** Сочетает горизонтальную масштабируемость и распределённость NoSQL-кластера с поддержкой ACID-транзакций и интерфейсом SQL. Подходит для систем, где требуется и высокая доступность, и строгая консистентность, но требует более сложного администрирования кластера [4].

**Многомодельная платформа.** Позволяет использовать несколько моделей (реляционную, документную, графовую и др.) в рамках одной СУБД. Даёт гибкость выбора движка под конкретную задачу, но повышает сложность сопровождения и может замедлить ввод в эксплуатацию [5].

Рассмотрим Таблицу 1 со сравнением архитектур баз данных.

Таблица 1

Сравнение архитектур баз данных

Тип базы данных	Модель данных	Примеры систем	Сценарии использования	Масштабируемость	Основные недостатки	Основные достоинства
Реляционные БД	Табличная модель	PostgreSQL, MySQL	Хранение расписаний, шаблонов смен, отчётность по часам работы	Вертикальная и ограниченная горизонтальная	Сложно масштабировать горизонтально; жёсткая схема	ACID-транзакции; зрелые инструменты; гибкие SQL-запросы
Документно-ориентированные БД	JSON/BSON	MongoDB, CouchDB	Хранение гибких шаблонов смен и разнородных профилей сотрудников	Лёгкая горизонтальная	Ограниченные транзакции; возможны дублирования данных	Гибкая схема; простое изменение структуры; мощная индексация
БД «ключ-значение»	Пары «ключ-значение»	Redis, DynamoDB	Кэширование результатов построения расписаний	Очень простая горизонтальная	Минимальные возможности сложных выборок	Высокая скорость операций; простота развёртывания



На Рисунке 2 представлена логическая модель данных — это расширение концептуальной модели данных. Она включает в себя все сущности,

атрибуты, ключи и взаимосвязи, которые представляют бизнес-информацию и определяют бизнес-правила.

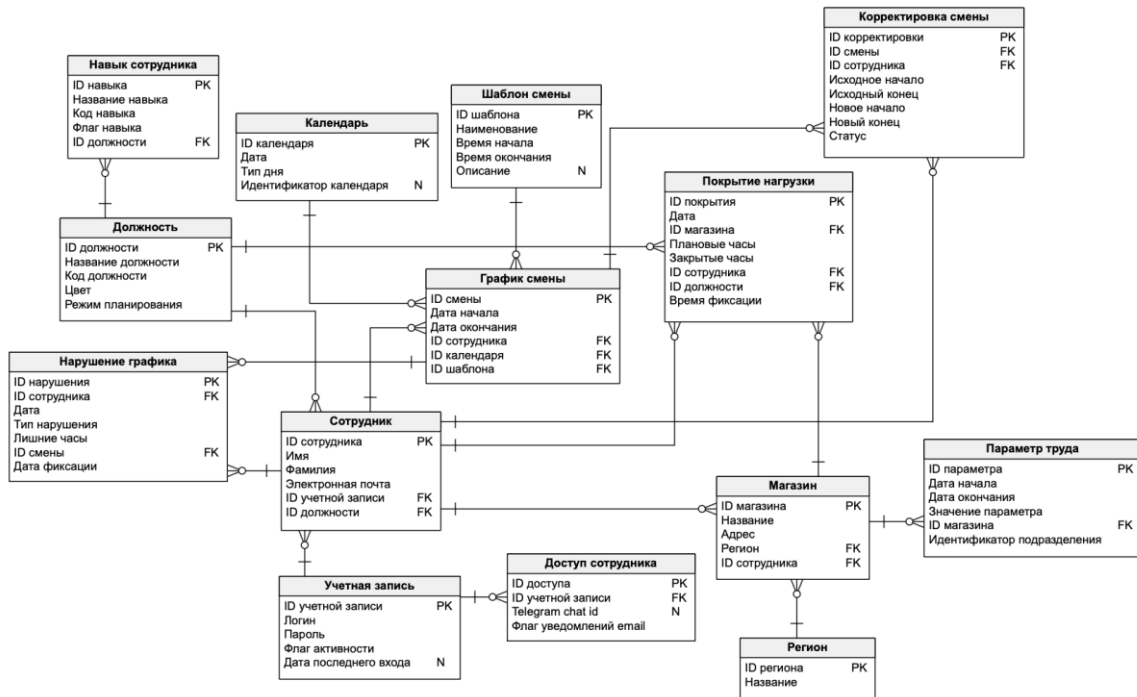


Рисунок 2 — Логическая модель базы данных в нотации Crow's Foot

Для описания логической структуры базы данных часто используют нотацию Crow's Foot, которая наглядно демонстрирует связи между таблицами. С её помощью проектировщики визуализируют, каким образом записи одной таблицы связаны с записями другой, легко распознавая отношения «один-к-одному», «один-ко-многим» и «многие-ко-многим» по специальным символам на концах соединительных линий [8].

Финальным этапом проектирования становится создание физической модели базы данных, где подробно фиксируются технические параметры хранения информации. В этом

документе задаются структуры файлов и форматы записи, схемы индексирования для ускорения выборки, а также стратегии оптимизации производительности — разбивка таблиц на разделы, кластеризация данных и распределение памяти.

Результатом перехода от концептуального и логического проектирования к физической реализации является формирование набора таблиц базы данных, отражающих ключевые сущности предметной области [9].

Представленная на Рисунке 3 физическая модель адаптирована под особенности PostgreSQL.

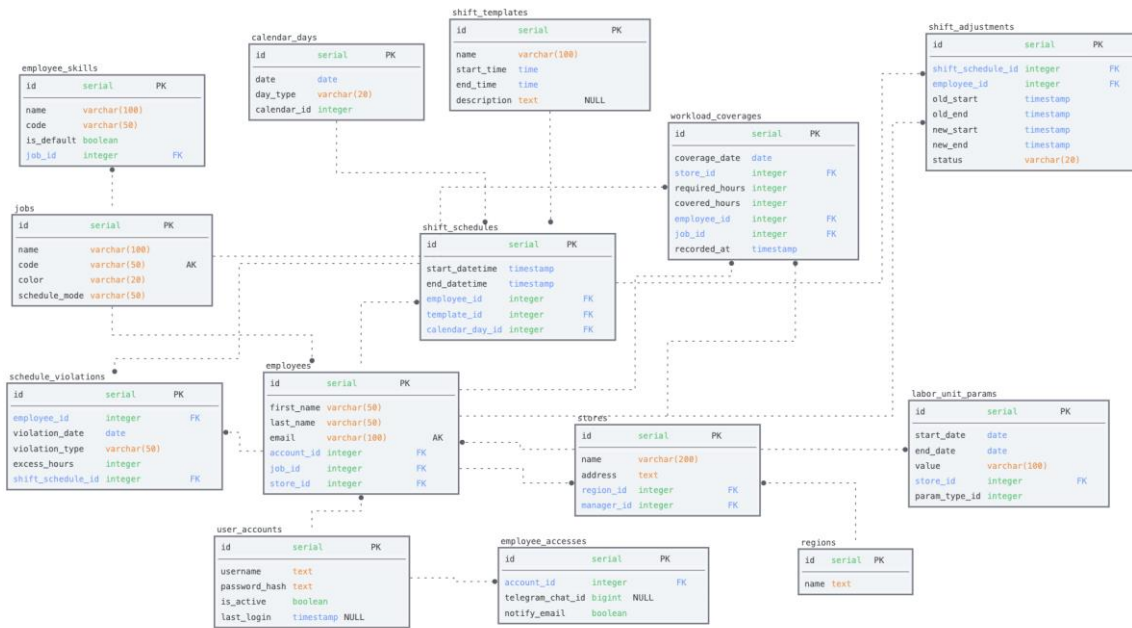


Рисунок 3 — Физическая модель базы данных

**Результаты исследования и их обсуждение.** При формировании модели данных далее рассматриваются основные сущности информационной системы, отражающие ключевые объекты предметной области и обеспечивающие хранение и обработку данных, необходимых для

функционирования системы планирования рабочего времени персонала [10].

В Таблице 2 отображен атрибутный состав таблицы user\_accounts. Данная сущность включает данные учётных записей пользователей системы, необходимые для аутентификации и управления доступом.

Таблица 2

**Описание атрибутов таблицы user\_accounts**

Атрибут	Описание	Тип данных	Индекс
id	Уникальный идентификатор записи	int	PK
username	Логин пользователя	text	
password	Пароль	text	
is_active	Флаг активности учётной записи	boolean	
last_login	Дата и время последнего входа	timestamp	

В Таблице 3 отображен атрибутный состав таблицы employees. Данная сущность хранит в себе

персональные данные и служебную информацию о сотрудниках организации.

Таблица 3

**Описание атрибутов таблицы employees**

Атрибут	Описание	Тип данных	Индекс
id	Уникальный идентификатор сотрудника	int	PK
first name	Имя сотрудника	text	
last name	Фамилия сотрудника	text	
email	Электронная почта	text	
user id	Ссылка на учетную запись	int	FK
job id	Ссылка на должность	int	FK

В Таблице 4 отображен атрибутный состав таблицы shift\_schedules. Данная сущность включает графики смен сотрудников с указанием

времени начала и окончания, а также привязку к сотруднику, должности, шаблону смены и календарному дню.

Таблица 4

Описание атрибутов таблицы `shift_schedules`

Атрибут	Описание	Тип данных	Индекс
<code>id</code>	Уникальный идентификатор смены	int	PK
<code>start date</code>	Дата и время начало смены	timestamp	
<code>end date</code>	Дата и время окончания смены	timestamp	
<code>employee id</code>	Ссылка на сотрудника	int	FK
<code>template id</code>	Ссылка на шаблон смены	int	FK
<code>calendar day id</code>	Ссылка на календарный день	int	FK

Корректность спроектированной модели данных подтверждается возможностью выполнения типовых аналитических и контрольных запросов, обеспечивающих выявление нарушений графиков и обработку данных по рабочему времени.

**Выводы.** В статье рассмотрены особенности проектирования моделей данных информационной системы планирования рабочего времени персонала. Спроектированная структура данных является ключевым фактором надёжности, расширяемости и эффективности WFM-систем, функционирующих в условиях высокой транзакционной нагрузки и строгих регламентных ограничений.

В рамках исследования обоснован выбор реляционной архитектуры базы данных, обеспечивающей поддержку и целостность данных при частых корректировках графиков. На основе анализа предметной области предложен подход к построению концептуальной, логической и физической моделей данных, учитывающий структуру персонала, шаблоны смен, календарные ограничения, а также механизмы фиксации нарушений и истории изменений.

Предложенные решения позволяют обеспечить универсальность модели данных и возможность её применения в различных организациях с посменным режимом работы. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются расширение модели для прогнозной аналитики, интеграция с системами расчёта трудозатрат и использование методов интеллектуального анализа данных для оптимизации планирования рабочего времени.

**Список литературы:**

1. Архитектура данных: что это, элементы, типы [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-arhitektura-dannyh/> — Загл. с экрана. — Яз. Рус.

2. Документоориентированные базы данных [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://sql-academy.org/ru/guide/document-oriented-databases> — Загл. с экрана. — Яз. Рус.

3. Графовая модель данных [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.tarantool.io/blog/ru/graph-db/> — Загл. с экрана. — Яз. Рус.

4. Кратко про NewSQL [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/792722/> — Загл. с экрана. — Яз. Рус.

5. Мультимодельные базы данных: обзор и принципы работы [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://bigdataschool.ru/blog/multimodel-databases-overview.html> — Загл. с экрана. — Яз. Рус.

6. Смоленцева Т. Е. Системный анализ и моделирование [Электронный ресурс]: Методические указания / Т. Е. Смоленцева, А. В. Свищев. — М.: РТУ МИРЭА, 2020. — Электрон. опт. диск (ISO).

7. Проектирование корпоративных информационных систем [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Т. Е. Смоленцева, Р. А. Исаев. — М.: РТУ МИРЭА, 2023. — Электрон. опт. диск (ISO)

8. Информационные системы управления корпоративным контентом [Электронный ресурс]: практикум / А. Д. Лагунова, В. В. Черняускас. — М.: РТУ МИРЭА, 2022. — Электрон. опт. диск (ISO)

9. Диких, В. А. Управление трудовыми ресурсами организации [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. А. Диких. — Красноярск: Научно-инновационный центр, 2022. — 62 с. — Электрон. опт. диск (ISO)

10. Лентяева Т. В. Управление жизненным циклом информационных систем [Электронный ресурс]: практикум / Т. В. Лентяева, А. Д. Лагунова. — М.: РТУ МИРЭА, 2020. — Электрон. опт. диск (ISO)

УДК66.021

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ДИГИДРАТНО-ПОЛУГИДРАТНОГО ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА  
МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ**

---

**Соболева И.В.***Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9,***Ляшенко С.Е.***Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9,***INVESTIGATION OF INDUSTRIAL DIHYDRATE - HEMIHYDRATE PROCESS OF PHOSPHORIC  
ACID PRODUCTION WITH THE USE OF KINETIC METHOD MODELING****I.V. Soboleva***Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
Russia, 125047, Moscow, Miusskaya sq., 9***S.E. Liashenko***Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
Russia, 125047, Moscow, Miusskaya sq., 9*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2231

**АННОТАЦИЯ**

Разработан новый эффективный метод производства фосфорной кислоты и фосфорных удобрений на основе кинетической математической модели, учитывающий основные физико-химические характеристики процессов.

Была предложена технологическая схема для непрерывного промышленного производства.

С использованием математического моделирования были подобраны рабочие объемы аппаратов для обеих стадий процессов. Методом математического моделирования были найдены оптимальные параметры непрерывного процесса, с помощью которых достигается максимальный коэффициент извлечения  $P_2O_5$  в раствор на первой стадии и максимальная степень перекристаллизации на второй стадии.

Разработаны рекомендации по использованию данного способа в промышленном масштабе для бедных руд фосфоритов.

**ABSTRACT**

New effective method for producing wet phosphoric acid and phosphate fertilizers was proposed on the base of kinetic mathematical model taking into account main physical - chemical features of the process.

The technological scheme for continuous process was proposed.

With the use of mathematical modeling we selected the reactor working capacities for both stages of the processes. By means of mathematical modeling optimum parameters for continuous process were found that give maximum  $P_2O_5$  recovery into the solution on the first stage and maximum degree of recrystallization on the second stage.

Recommendations were developed for the use of this method in industry for poor phosphorite ores.

**Ключевые слова:** мокрый процесс, фосфорная кислота, дигидратно-полугидратный процесс, моделирование, оптимизация, непрерывный процесс, кинетическая модель.

**Key-words:** wet process, phosphoric acid, dihydrate - hemihydrate process, simulation, optimization, continuous process, kinetic model.

**INTRODUCTION**

**Aim of the study:** Using mathematical model to find optimum technological parameters for continuous wet process of phosphoric acid production that gives maximum  $P_2O_5$  recovery into the solution on the first stage and maximum degree of recrystallization on the second stage.

Phosphorous - containing fertilizers play an important part in agriculture [1, 2]. At the moment phosphorites with varying compositions and high levels of undesired impurities are going into practice [3]. This requires new methods for their treatment. The purpose of this work was to create continuous dihydrate-hemihydrate process (DHP) for production of

phosphoric acid from low-grade phosphorites. The proposed process has several advantages in comparison with dihydrate one including reducing costs for evaporating weak phosphoric acid and eliminating waste dumps by yielding nearly pure hemihydrate which can be used as a binding material in construction [4].

In previous studies [5, 6] we have developed mathematical models for dihydrate and hemihydrate stages of the batch process, studied the kinetics of the batch process under laboratory conditions and determined coefficients for both stages.

In this work a continuous dihydrate - hemihydrate process is proposed for low-grade phosphorites to be used in industry.

## MATERIALS AND METHODS OF INVESTIGATION

Mathematical model for phosphoric acid production was developed taking into account main physical - chemical phenomena.

The composition of phosphorites was taken from Djambul plant "Chimprom". The influence of the quantity of sulfuric acid entering to the first and second stages of the process as well the concentration of recycled phosphoric acid entering the first stage and the temperature impact were studied.

The process was described using heterogeneous media mechanics which is based on physical laws of mass, impulse and energy conservation. On the first stage we used function of phosphate films particles

distribution on two parameters: the size of insoluble phosphorite grains and the thickness of sulphate films.

For solving system of mathematical model equations we used first order difference scheme.

In the system of difference equations the fractional step splitting method was used. The scheme is absolutely stable.

## MAIN PART

### 1. Experiment

According to the proposed scheme (Fig. 1) phosphorite raw material is loaded into the first stage together with recirculated phosphoric acid which goes from the hemihydrate pulp filtration stage. This pulp is fed into the dihydrate stage reactor where concentrated sulfuric acid (93-95%) also enters. At a temperature of 75—80°C the decomposition of phosphorites at the first stage occurs within 0.8—1.2 h forming calcium sulfate dihydrate (CSD).

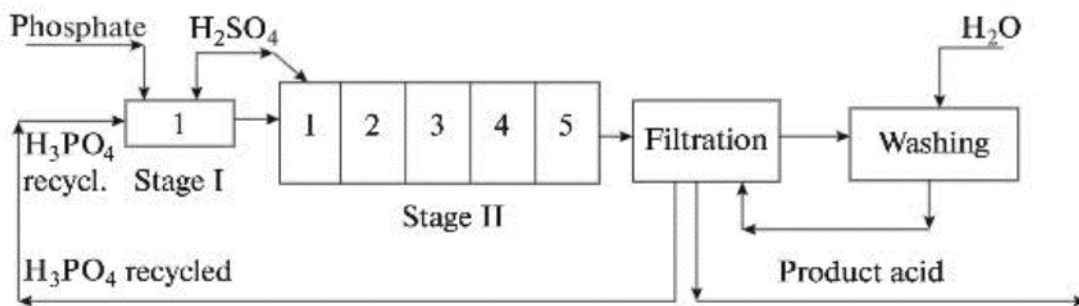


Fig. 1. Technological scheme for the production of extraction phosphoric acid using the dihydrate - hemihydrate method.

To ensure primary crystallization of CSD only a portion of the stoichiometric amount of sulfuric acid goes to the first stage. The recrystallization of CSD into calcium sulfate hemihydrate (CSH) in the second stage is conducted under conditions of increasing concentrations of  $\text{SO}_3$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  and increasing temperature in the pulp (from 83 to 95°C) using the remaining portion of sulfuric acid that is loaded at the beginning of the second stage. This process releases some  $\text{P}_2\text{O}_5$  captured by the CSD precipitate and leads to further decomposition of the raw material.

During the second stage crystallization of calcium sulfate hemihydrate (CSH) from the solution and recrystallization of the formed CSD into CSH occur. The second stage lasts for 3.5—4.0 h. After that the pulp is filtered and washed.

### 2. Mathematical simulation

While developing a mathematical model of continuous DHP we created a kinetic model so that thermodynamic conditions in the reactor were taken into account. The following assumptions were made: the reactor of the dihydrate stage is considered to be a single cell of ideal mixing. A single section "Rythm" extractor was proposed as the reactor for the first stage and a standard ten-section reactor (each cell consists of two sections) with a capacity of 740  $\text{m}^3$  was used for the second stage.

The mathematical model for continuous production was developed taking into account the material flow structure in the reactors. Coefficients  $U_1$

-  $U_6$  were introduced changing to 0 or 1 depending on the cell number. The kinetic mathematical model for dihydrate stage of the continuous process can be described by the following equations:

Equation for the balance of the number of phosphorite particles:

$$\frac{df}{dt} - \frac{\partial f \lambda}{\partial l} + \frac{\partial f \psi}{\partial h} = U_6 \frac{V_a^0}{V_g} f^0 - U_5 \frac{\sum V_{1l}}{V_g} f \quad (1),$$

where  $f^0$  is the granulometric composition of the phosphate raw materials and  $f$  is the distribution function of dissolved phosphorite particles by sizes  $l$  and  $h$ .

The first term on the right-hand side of Eq. 1 represents the input of raw materials into the reactor and the second term represents the removal of phosphorite from the apparatus. Similarly the balance of the number of CSD crystal particles was calculated.

Equation for the balance of the number of CSD crystal particles:

$$\frac{d\varphi}{dt} + \frac{\partial \varphi \eta}{\partial l} = -U_5 \frac{\sum V_{1i}}{V_g} \varphi \quad (2),$$

where the right-hand side reflects the exit of CSD particles from the reactor. Equations (1), (2) represent the qualitative and quantitative characteristics of the solid phase of the reactor pulp which depend on the

intensity of the processes occurring in it as well as on the material flows in the apparatus.

According to the same principle the balances of components of the liquid phase were developed (changes in the concentrations of the solution components), namely ones for the sulfuric acid, for the balance of phosphoric acid, for the balance of calcium sulfate in the solution.

Using a mathematical model for the dihydrate stage of the continuous process the reactor volume at the first stage  $V_g$  (for a given productivity and residence time of particles in the apparatus) was calculated as well as the consumption rates of phosphoric acid  $V_{H_3PO_4}^0$ , sulfuric acid  $V_{H_2SO_4}^0$ , and phosphorite

$$\frac{d\mu_0^{g(i)}}{dt} = -I_{3ap}^{g(i)} + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_0^{g(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_0^{g(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_0^{g(5)} \quad (3)$$

$$\frac{d\mu_1^{g(i)}}{dt} = -\lambda \mu_0^{g(i)} + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_1^{g(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_1^{g(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_1^{g(5)} \quad (4)$$

The equations for the second and third moments of the density function distribution for the number of CSD particles were developed the same way as were

$V_a^0$  were adjusted to allow maintaining the optimal concentrations and volumes of the components in the solution.

The mathematical model for the second stage (the hemihydrate stage) of the continuous process was developed as equations for the first three moments of the density function distribution for the number of particles of CSD and CSH by size, respectively, as well as the equations for changes in the concentrations of  $P_2O_5$ ,  $SO_3$ , and  $CaO$  in the solution and the equations for changes of solution density for each  $i$ -th cell of the reactor. The expressions for the first two moments of the density function distribution for the number of CSD particles are presented in the form of the equations

the equations for the moments of the density function distribution for the number of CSH particles.

Similarly we can write the balance of the number of CSH particles for the  $i$ -th cell of the recrystallizer:

$$\frac{d\mu_0^{n(i)}}{dt} = I_{3ap}^n + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_0^{n(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_0^{n(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_0^{n(5)} \quad (5)$$

$$\frac{d\mu_1^{n(i)}}{dt} = \eta \mu_0^{n(i)} + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_1^{n(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_1^{n(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_1^{n(5)} \quad (6)$$

$$\frac{d\mu_2^{n(i)}}{dt} = 2\eta \mu_1^{n(i)} + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_2^{n(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_2^{n(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_2^{n(5)} \quad (7)$$

$$\frac{d\mu_3^{n(i)}}{dt} = 3\eta \mu_2^{n(i)} + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_3^{n(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \mu_3^{n(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \mu_3^{n(5)} \quad (8)$$

The balance of the number of CSH particles shows both the increase in their quantity due to nucleation processes  $I_{3ap}^n$  and crystal growth  $\eta$  as well as changes in the number of CSD crystals due to their arrival and departure with technological flows.

Equations (3)-(8) demonstrate the characteristics of the solid phase of the pulp depending on the intensity of the processes occurring in it and the material flows in the reactor.

Let us formulate the balance of the liquid phase components. The equation for the balance of sulfuric acid in the  $i$ -th cell of the reactor is following:

$$\rho_1^{(i)} \frac{dC_1^{(i)}}{dt} = -C_1 \frac{d\rho_1}{dt} + \frac{M_1}{M_{CaSO_4}} (J_1^{(i)} - J_2^{(i)}) + U_2 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \rho_1^{(i-1)} C_1^{(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{li}}{V_i} \rho_1^{(i)} C_1^{(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \rho_1^{(5)} C_1^{(5)} + U_4 \frac{V_{H_2SO_4}^0}{V_1} \rho_{H_2SO_4}^0 C_{H_2SO_4}^0 \quad (9)$$

The right-hand side of Eq. (15) characterizes the change in the amount of sulfuric acid due to the competing processes of CSD dissolution ( $J_1$ ) and nucleation and growth of CSH crystals from the solution ( $J_2$ ), the second term on the right-hand side. The following terms on the right-hand side show the change in the amount of sulfuric acid in the cells of the second stage reactor model due to its arrival and departure with technological flows and introduction into the corresponding cell:  $V_{H_2SO_4}^0, \rho_{H_2SO_4}^0, C_{H_2SO_4}^0$ ,

$$\rho_1^{(i)} \frac{dC_3^{(i)}}{dt} = -C_3 \frac{d\rho_1^{(i)}}{dt} + \frac{M_3}{M_{CaSO_4}} (J_1^{(i)} - J_2^{(i)}) + U_2 \frac{\sum V_{1i}}{V_i} \rho_1^{(i-1)} C_3^{(i-1)} - U_5 \frac{\sum V_{1i}}{V_i} \rho_1^{(i)} C_3^{(i)} - U_3 \frac{V_\phi}{V_5} \rho_1^{(5)} C_3^{(5)} \quad (10)$$

The second term on the right-hand side of Eq. (10) represents the amount of calcium sulfate that has entered the solution due to the dissolution of CSD crystals and the consumption of calcium sulfate for the formation and growth of CSH crystals in the liquid phase volume. The quantitative characteristics reflecting the intensity of these two opposing processes are primarily determined by the difference in the degree of supersaturation of the solution with respect to CSD and CSH which depends on the difference in the solubilities of CSD and CSH crystals.

Also we developed the equation for the density change in the solution in the  $i$ -th cell of the reactor model.

In all of the equations of particle balance and liquid phase composition the terms characterizing the intensity of the material flows contain coefficients  $U_i (i = 1, \dots, 6)$  equaling 0 or 1 depending on the reactor cell number. By setting the values of the coefficients  $U_i$  not only the location of the reactant input but also the structure of the material flows can be changed depending on the type of the reactor.

### 3. Searching optimal parameters of continuous process

In this work before the mathematical simulation of the continuous DHP for processing low grade phosphorites some preliminary calculations were conducted. Assuming a slurry density of 1460 kg/m<sup>3</sup> the slurry volume  $V_n = 182$  m<sup>3</sup> per hour was obtained. Knowing that the time for the crystallization process of CSD into CSH should be at least 3.5-4 h the working volume of the apparatus that we want to use in the second stage as a recrystallizer can be calculated:

$$V_{anII} = V_n \cdot \tau_{II}; \\ V_{anII} = 182 \cdot 4 = 728 \text{ m}^3$$

The approximate value is the volume of a ten-section reactor with a working capacity of 740 m<sup>3</sup> which has found wide application in industry. Therefore during the recrystallization second stage we decided to use this type of reactor with the volume of 740 m<sup>3</sup>.

Since the process is organized without intermediate filtration between the first and second

namely: the consumption, density, and concentration of sulfuric acid.

The same way we developed the equation for the change in the concentration of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the solution.

The balance equation for the concentration of CaO in the solution reflects the difference in the intensity of the two processes: dissolution of CSD ( $J_1$ ) and formation and growth of CSH from the solution ( $J_2$ ):

stages the volumes of the slurry at these stages are approximately equal. From the study of the periodic mode [5, 6] it is known that the residence time of the particles in the dihydrate stage extractor should be at least 0.8-1.2 h. According to this assumption the working volume of the reactor in the first stage can be calculated:

$$V_{anI} = V_n \cdot \tau_I;$$

$$V_{anI} = 182 \cdot 1.1 \approx 200 \text{ m}^3$$

By fixing the volumetric flow rate of phosphorite at 55 t/h and the working volumes of the facilities in the first (200 m<sup>3</sup>) and second (740 m<sup>3</sup>) stages the volumetric flow rates of sulfuric acid in the first and second stages of the DHP and the recyclable phosphoric acid in the first stage were defined using mathematical simulation by the scanning method to achieve optimal concentrations of the solution components. Based on the preliminary calculations the volumetric flow rates were calculated:

— Volumetric flow rate of sulfuric acid in the first stage  $V_{H_2SO_4I}^0 = 15 - 35 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

— Volumetric flow rate of sulfuric acid in the second stage  $V_{H_2SO_4II}^0 = 5 - 20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

— Volumetric flow rate of recyclable phosphoric acid in the first stage

$$V_{H_3PO_4}^0 = 90 - 140 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Using mathematical simulation the following values of volumetric flow rates were obtained to maintain the optimum concentrations of the solution components:

— Volumetric flow rate of sulfuric acid in the first stage  $V_{H_2SO_4I}^0 = 25 \text{ m}^3/\text{h}$

— Volumetric flow rate of sulfuric acid in the second stage  $V_{H_2SO_4II}^0 = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,

— Volumetric flow rate of recyclable phosphoric acid in the first stage

$$V_{H_3PO_4}^0 = 130 \text{ m}^3/\text{h}.$$

In our work [6] the degree of recrystallization of CSD into CSH was studied under different temperature conditions. The optimal temperature for the second stage was found to be 95—97°C. Under these optimum

conditions the extraction coefficient of  $P_2O_5$  into the liquid phase reaches 97.5% and the degree of recrystallization of CSD into CSH is 98—99%.

#### CONCLUSION

The structure of kinetic mathematical model has been developed that takes into account the physical - chemical phenomena in reactors and the scheme of material flows as well as the design features of the modeled reactor that are the most suitable for solving practical engineering tasks.

Mathematical simulation of CSD recrystallization into CSH at given  $V_i$  values corresponding to the working volume of the sections allows us to adjust the consumption of sulfuric acid  $V_{H_2SO_4}^0$  and to maintain optimum concentrations of the components in the solution. This provides achieving maximum degree of recrystallization.

With the help of mathematical modeling the optimum consumption of sulfuric acid for the first and second stages of DHP, the consumption of reverse phosphoric acid and phosphate in the first stage as well as the optimum volume of the first stage reactor were found. This allows to maintain optimum content of the components in the liquid phase to achieve maximum extraction coefficient in the first stage and maximum degree of recrystallization in the second stage. Under optimum conditions and the temperature of 95-97°C during the recrystallization process the extraction coefficient of  $P_2O_5$  in the solution reaches 97.5—98% and the degree of CSD crystallization in CSH reaches 98-99%. Thus a technological scheme for continuous DHP operation was developed and the volume of the first-stage reactor and flow characteristics that provide maximum extraction  $P_2O_5$  yield in the first stage and maximum degree of recrystallization in the second

stage were defined using mathematical modeling. Recommendations were given for the industrial scale use of this method for low-grade phosphate rock.

#### LITERATURE

1. Zhantasov K.T., Bazhirova K.N., Toltebaeva Z.D., Zhantasova D.M., Petropavlovskii I.A., and Pochilalkina I.A. Current state, problems and prospects for the development of the phosphorus industry in Kazakhstan, *Khim. Prom-st Segodnya* (Chemical Industry today), 2013, № 5, pp. 4—6.
2. Petropavlovskii I.A., Dmitrevskii B.A., Levin B.V., Pochitalkina I.A. *Tekhnologiya mineral'nykh udobrenii* (Mineral Fertilizer Technology), Ed., S.-Pt: Prospekt Nauk, 2018, pp. 312.
3. Soboleva I.V., Koltsova E.M. Investigation of reaction kinetics for industrial dihydrate method of  $P_2O_5$  production, *CHISA 2006 -17 th. International Congress of Chemical and Process Engineering*, Prague, 2006, v. 1, pp.7-39.
4. Sari M. Calcium sulphates: their typical applications in the building industry and improvement of their properties, *Cement. and its application.*, 2009, issue 2, pp. 12—14.
5. Soboleva I.V., Liashenko S.E. Dihydrate stage investigation of production process of extraction phosphoric acid from poor phosphorites by dihydrate-hemihydrate method, *Khim. Tekhnol.* (J. Chemical Technology), 2022, v. 23, N 1, pp. 10—16. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2022-23-1-10-16>
6. Soboleva I.V., Liashenko S.E. Investigation of hemihydrate stage for extraction phosphoric acid production by dihydrate-hemihydrate method from poor phosphorites, *Khim. Tekhnol.* (J. Chemical Technology), 2022, v. 23, N 3, pp. 117-122.

УДК 613.2:582.263

---

### ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНДОГЕННЫХ АМИНОКИСЛОТ НА РОСТ И СКОРОСТЬ ПРИРОСТА БИОМАССЫ КУЛЬТУРЫ CLORELLA

---

**Яблонская Е.К.**

магистр группы ПБ 2541

**Мачнева Н.Л.**

канд.биол.наук, доцент

**Гнеуш А.Н.**

канд. с-х.наук, доцент

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т.Трубилина,  
г.Краснодар, Россия

---

### STUDY OF THE INFLUENCE OF ENDOGENOUS AMINO ACIDS ON THE GROWTH AND RATE OF BIOMASS GROWTH OF CLORELLA CULTURE

---

**E.K. Yablonskaya**

Master's student, PB 2541

**N.L. Machneva**

PhD in Biology, Associate Professor

**A.N. Gneush**

PhD of Agricultural Sciences, Associate Professor  
Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,  
Krasnodar, Russia

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2026.1.132.2232

## АННОТОЦИЯ

Культивирование микроводорослей является экономически оправданным и стратегически необходимым элементом в биоэкономике России. Особенностью хлореллы является ее способность производить различные биологически ценные компоненты, получаемые путем изменения состава питательной среды.

## ABSTRACT

Microalgae cultivation is economically viable and a strategically necessary element of Russia's bioeconomy. This microorganism can produce various biologically valuable components for human life. The synthesis of these necessary substances can be controlled by altering the composition of the nutrient medium.

**Ключевые слова:** микроводоросли, *Chlorella*, аминокислоты, прирост биомассы, скорость роста, БАВ из водорослей

**Key words:** microalgae, *Chlorella*, amino acids, biomass increase, growth rate, biologically active substances from algae

На сегодняшний день в мире одним из перспективных биотехнологических направлений для получения целевых продуктов питания животных и человека является микроводоросль *Chlorella* [1,3-5]. В сухой биомассе микроводоросли содержится до 55% белка, 25% углеводов, 12% липидов и до 8% минеральных веществ. При изменении концентрации компонентов питательной среды можно получить биомассу широкого спектра состава: 9–88% белка, 5–86% липидов, 6–38% углеводов. Белок микроводоросли по качеству не уступает известным растительным белкам, так как содержит все необходимые аминокислоты, в том числе незаменимые, такие как арахидоновая, линолевая и линоленовая, а также наиболее ценные для человека и животных полиненасыщенные аминокислоты – эйкозапентаеновая и докозагексаеновая. В 100 г общего азота хлореллы содержится: 6,4 г аспарагиновой аминокислоты; 6,2 г глицина; 7,7 г аланина; 7,8 г глутаминовой аминокислоты; 3,3 г серина; 2,8 г триптофана; 5,8 г пролина; 0,2 г цистина; 5,5 г валина; 15,8 г аргинина; 3,3 г гистидина; 3,5 г изолейцина; 6,1 г лейцина; 10,2 г лизина; 1,4 г метионина; 2,8 г фенилаланина; 2,9 г треонина; 2,1 г триптофана [1-4].

Хлорелла содержит природные соединения, обладающие свойствами антибиотиков. Синтезируемый ею комплекс БАВ под названием «хлореллин» уничтожает патогенную микрофлору: в концентрации 1:500000 и 1:1000000 он эффективен против стрептококков, стафилококков, кишечной палочки и возбудителя туберкулеза.

Культура хлореллы не особо требовательна к питательной среде и рН, оптимальная температура для роста 20–28 °С, культивируется как при естественном, так и искусственном освещении в лабораторных условиях и не зависит от сезона года. При достижении плотности клеток трех млн/мл проявляются антагонистические свойства к другой альгофлоре, бактериям и инфузориям, по данной причине при культивировании *Chlorella* не требуются стерильные условия.

Стойкого цикла развития культура микроводоросли не имеет, в культуре развивается асинхронно и эту особенность можно использовать для установления процесса синхронизации и соответственно увеличения выхода биомассы. Соответственно, изменяя питательный режим,

освещенность и формат культивирования можно получать не только отдельные необходимые человеку и животным компоненты, но и полноценный суперфуд для питания людей.

Целью исследований является изучение влияния аминокислот на жизненный цикл хлореллы путем их эндогенного внесения в стандартный питательный раствор Тамия.

Из литературных данных известно, что высокий уровень усвоения питательных веществ различными организмами обеспечивают в первую очередь такие аминокислоты, как глутаминовая кислота, лизин, гистидин, метионин, глицин, которые при соприкосновении с микроэлементами образуют хелатные соединения. Положительное влияние на метаболизм растений оказывают валин, триптофан, треонин, серин, пролин, аланин, аденин, аргинин, фенилаланин и тирозин. Они способствуют скорейшему восстановлению в стрессовых ситуациях.

Для опыта были взяты следующие аминокислоты – глутаминовая кислота (1), аргинин (2), аланин (3), треонин (4), валин (5), лизин (6), глицин (7), метионин (8), триптофан (9), аденин (10), фенилаланин (11) и пролин (12) в концентрациях 0,001, 0,0001 и 0,00001% по массе (рисунок 1).

Аминокислоты вносились отдельно друг от друга в питательную среду непосредственно в начальный момент культивирования культуры микроводоросли. Концентрация по показателю оптической плотности составила 0,6 отн.ед.

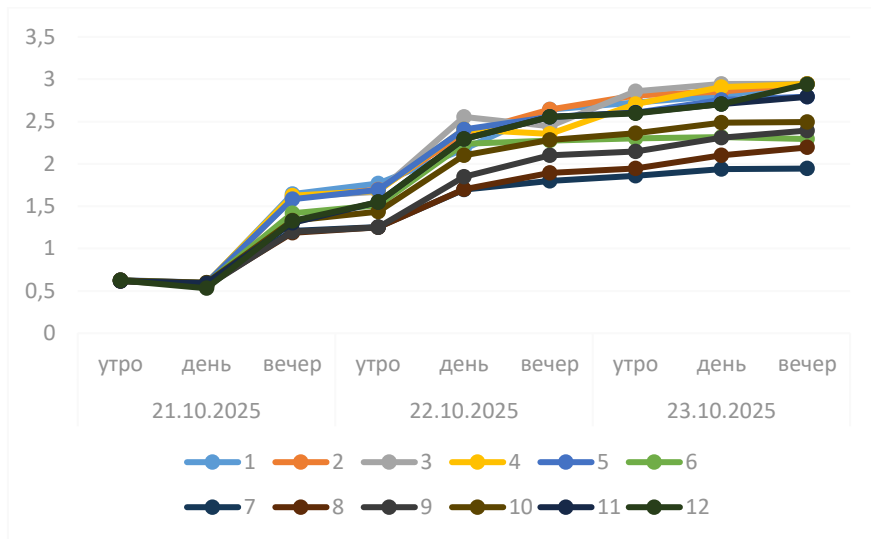
В ходе лабораторных исследований проводилось культивирование микроводоросли на питательной среде Тамия. Нарращивание биомассы микроводоросли проводилось в 3-х кратной повторности в течение 3 суток. В течение всего времени культивирования проводилось измерение оптической плотности, которое отражает количество биомассы клеток в 1 мл культуры. Измерения оптической плотности производили через каждые 8 часов (рисунок 1).

Согласно полученным данным установлено, что все внесённые аминокислоты оказали положительное воздействие в данных изучаемых концентрациях на культуру микроводоросли.

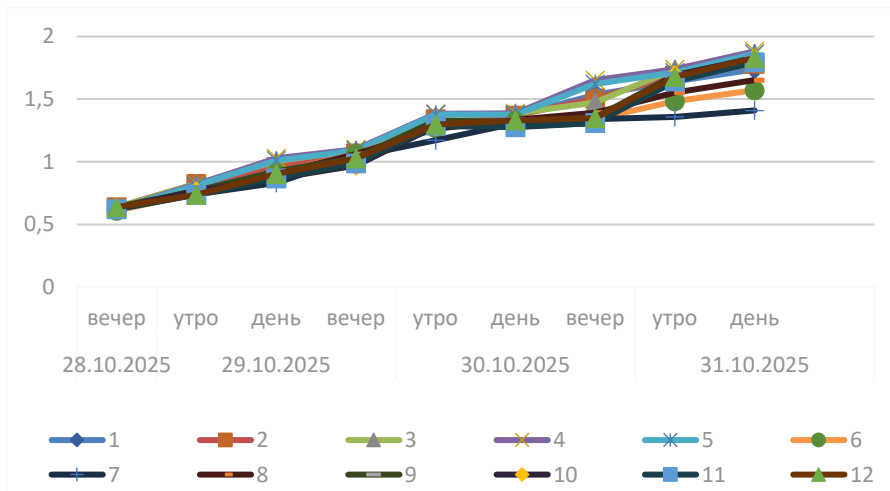
Были рассчитаны средние удельные скорости роста культуры в зависимости от внесенных аминокислот (рисунок 2).

Исходя их данных построенных диаграммы, наибольшая удельная скорость роста наблюдается при внесении следующих аминокислот: глутаминовая кислота (1), аргинин (2), аланин (3),

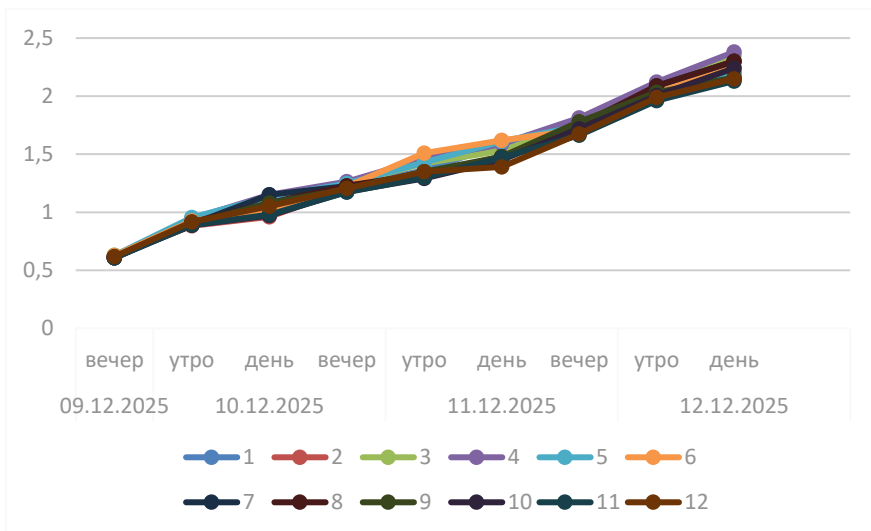
треонин (4), валин (5), фенилаланин (11) и пролин (12). А наименьшая удельная скорость роста - при внесении глицин (7), метионин (8), триптофан (9), аденин (10) (рисунок 2).



концентрация 0,001 % масс.



концентрация 0,0001 % масс.

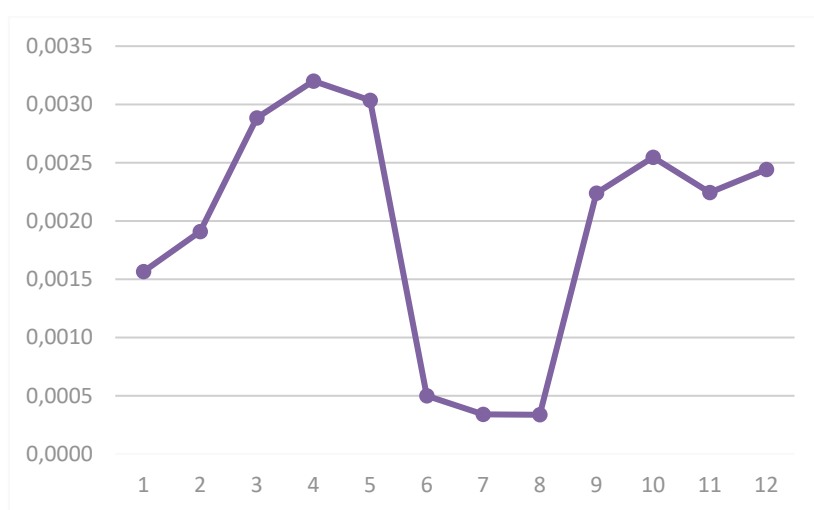


концентрация 0,00001 % масс.

Рисунок 1 – Общая тенденция роста микроводоросли при действии различных аминокислот



концентрация 0,001 % масс.



концентрация 0,0001 % масс.



концентрация 0,00001 % масс.

Рисунок 2 – Средняя удельная скорость роста культуры микроводоросли

В целом установлена положительная динамика влияния протеиногенных аминокислот на рост и развитие культуры микроводоросли. Наибольшее влияние на скорость роста и прирост биомассы оказали аминокислоты глутаминовая кислота (1), аргинин (2), аланин (3), треонин (4), валин (5),

фенилаланин (11) и пролин (12) в изучаемой концентрации 0,001% масс.

#### Используемая литература:

1. Яблонская Е.К., Мачнева Н.Л. Перспективы применения аминокислот и их комплексов в биотехнологии производства хлореллы /В сборнике

трудов «Наука, образование, общество: Тенденции и перспективы развития». Материалы II всероссийской научно-практической конференции. Чебоксары, 2025. С. 10-12.

2. Ауджанова в. К. Морфологические и систематические характеристики хлореллы. Ее производство и применение / В. К. Ауджанова // Научный Вестник. – 2014. – №1 (1). – С. 113–126.

3. Мануйлова В.С., Кизка П.Д., Мачнева Н.Л. Высокобелковые растительные компоненты в пищевых продуктах. / В сборнике: Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. // Сборник статей по материалам VII Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры технологии хранения и переработки животноводческой продукции Кубанского ГАУ. Краснодар, 2023. С. 168-170.

4. Головки И.Е., Мачнева Н.Л. Перспективы использования микроводоросли *chlorella vulgaris* в пищевых продуктах/ В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. // Сборник статей по материалам 78-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2022 год. В 3-х частях. Краснодар, 2023. С. 898-901.

5. Миронова Е.В., Мачнева Н.Л. Модифицированные питательные среды для культивирования микроводоросли / В сборнике: Научное обеспечение агропромышленного комплекса. // Сборник статей по материалам 78-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2022 год. В 3-х частях. Отв. за выпуск А.Г. Коцаев. Краснодар, 2023. С. 947-950.

# Евразийский Союз Ученых.

## Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 1 (132)/2026 Том 1

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Макаровский Денис Анатольевич**

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

**Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

**Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

**Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович  
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:  
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А  
E-mail: [info@euroasia-science.ru](mailto:info@euroasia-science.ru) ;  
[www.euroasia-science.ru](http://www.euroasia-science.ru)

Учредитель и издатель ООО «Логика+»  
Тираж 1000 экз.