

№ 1 • 2026

*Моделирование
систем
критического
применения*

Моделирование систем критического применения [электронный ресурс]: электрон. журнал Моделирование систем критического применения. – Электр. текстовые данные (3,6 МБ). – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2026. – 1 компакт-диск: 12 см.

Журнал является периодическим электронным изданием, в котором публикуются результаты научных исследований ведущих ученых и молодых авторов по техническим отраслям науки.

Минимальные системные требования: процессор Intel с частотой не менее 1,3 ГГц; ОЗУ 512 Мб; операц. система семейства Windows; Adobe Reader v. 4.0 и выше; дисковод; мышь.

Текстовое электронное издание.

© Воронежский институт МВД России

Электронное издание создано
при использовании программного обеспечения:

LibreOffice.

Редактор В. Ю. Калинская

Компьютерная верстка В. А. Никитенко

Дата выхода в свет: 30.03.2026.

Комплектация издания: 1 компакт-диск: 12 см.

Тираж: 30 компакт-дисков.

Объем издания: 3,6 МБ.

18+

Журнал распространяется бесплатно.

Учредитель:

Федеральное государственное казенное
образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский институт
Министерства внутренних дел Российской
Федерации».

Адрес редакции и издателя: 394065, г. Воронеж,
пр-т Патриотов, 53. Тел. +7 (473) 264-91-25,
+7 (473) 264-92-10.

E-mail: mocas_journal@mail.ru.

<https://ви.мвд.пф/Наука/nauchnij-zhurnal-mocas>

МИССИЯ ЖУРНАЛА

Журнал «Моделирование систем критического применения» — научный журнал, посвященный проблемам технических наук, связанных с моделированием различных процессов, а также разработки и функционирования различных систем. В журнале рассматриваются теоретические и прикладные исследования системных связей и закономерностей функционирования и развития систем и процессов с учетом отраслевых особенностей, ориентированные на повышение эффективности управления ими с использованием современных методов обработки информации. Особое место уделяется моделированию процессов деятельности подразделений федеральных органов исполнительной власти Российской Федерации, реализующих правоохранительную деятельность.

Стратегической целью является развитие российской научной школы по всему аспекту моделирования систем критического применения в рамках технических наук.

Объектами исследований в работах, публикуемых в журнале, могут быть научные проблемы, концепции, подходы, методы, модели, теоретические и экспериментальные исследования.

Журнал предназначен для публикации ведущих ученых, преподавателей, аспирантов и студентов ВУЗов, лицеев, колледжей, а также для работников производства.

Журнал проводит независимую политику отбора рукописей на основе актуальности, новизны, теоретической и практической значимости, предполагающую обязательное двойное слепое рецензирование всех работ, и является платформой для свободного научного общения.

Моделирование систем критического применения

№ 1 / 2026

Учредитель — Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Редакционная коллегия

Председатель: В. В. Меньших, профессор кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России, доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации.

Заместитель председателя: О. В. Пьянков, заместитель начальника кафедры инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России, доктор технических наук, профессор.

В. В. Алексеев, профессор кафедры информационных систем и защиты информации Тамбовского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор;

А. В. Бецов, начальник кафедры информационных технологий Академии управления МВД России, доктор технических наук, доцент;

А. В. Калач, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну Воронежского института ФСИН России, доктор химических наук, профессор;

И. А. Кубасов, профессор кафедры информационных технологий Академии управления МВД России, доктор технических наук, доцент;

М. Г. Матвеев, заведующий кафедрой информационных технологий управления Воронежского государственного университета, доктор технических наук, профессор;

А. В. Мельников, заведующий кафедрой правовой информатики, информационного права и естественнонаучных дисциплин центрального филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет правосудия имени В.М. Лебедева» (г. Воронеж), доктор технических наук, доцент;

Т. В. Мещерякова, начальник кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел Воронежского института МВД России, доктор технических наук, профессор;

Л. Е. Мистров, профессор кафедры правовой информатики, информационного права и естественнонаучных дисциплин центрального филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет правосудия имени В.М. Лебедева» (г. Воронеж), доктор технических наук, профессор;

В. А. Никитенко, старший преподаватель кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России, кандидат технических наук (*ответственный секретарь*);

В. И. Новосельцев, профессор кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Воронежского института ФСИН России, доктор технических наук, профессор;

А. С. Овчинский, профессор кафедры информационной безопасности учебно-научного комплекса информационных технологий Московского университета МВД России им. В. Я. Кикотя, доктор технических наук, профессор;

А. И. Примакин, профессор кафедры математических, естественнонаучных и общеприкладных дисциплин Военной ордена Жукова академии войск национальной гвардии Российской Федерации, доктор технических наук, профессор;

А. Б. Сизоненко, профессор кафедры Краснодарского высшего военного орденов Жукова и Октябрьской Революции Краснознаменного училища имени генерала армии С. М. Штеменко Министерства обороны Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Почетный работник сферы образования;

С. М. Ситник, профессор кафедры прикладной математики и компьютерного моделирования Института инженерных и цифровых технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, доктор физико-математических наук, профессор;

А. С. Соловьев, профессор кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Воронежского института ФСИН России, доктор технических наук, доцент;

С. Н. Тростянский, профессор кафедры техносферной и пожарной безопасности Воронежского государственного технического университета, доктор технических наук, доцент;

К. М. Холостов, профессор кафедры информационных технологий Академии управления МВД России, доктор технических наук, доцент.

System modeling critical application

№ 1 / 2026

The founder is the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, a federal state—funded educational institution of higher Education.

Editorial Board

Chairman: V. V. Menshikh, Professor of the Department of Mathematics and Systems Modeling at the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation.

Deputy Chairman: O. V. Pyankov, Deputy Head of the Department of Information and Communication Systems and Technologies at the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor.

V. V. Alekseev, Professor of the Department of Information Systems and Information Security at Tambov State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A.V. Betskov, Head of the Department of Information Technology at the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

A.V. Kalach, Head of the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Doctor of Chemical Sciences, Professor;

I. A. Kubasov, Professor of the Department of Information Technology of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

M. G. Matveev, Head of the Department of Management Information Technologies at Voronezh State University, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A.V. Melnikov, Head of the Department of Legal Informatics, Information Law and Natural Sciences of the Central Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lebedev Russian State University of Justice" (Voronezh), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

T. V. Meshcheryakova, Head of the Department of Automated Information Systems of the Russian Academy of Sciences-Ganov of Internal Affairs of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor;

L. E. Mistrov, Professor of the Department of Legal Informatics, Information Law and Natural Sciences of the Central Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Lebedev Russian State University of Justice" (Voronezh), Doctor of Technical Sciences, Professor;

V. A. Nikitenko, Senior Lecturer at the Department of Mathematics and System Modeling at the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Candidate of Technical Sciences (Executive Secretary);

V. I. Novoseltsev, Professor of the Department of Information Security of Telecommunication Systems of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. S. Ovchinsky, Professor of the Department information Security of the Educational and Scientific Complex of Information Technologies of the Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia named after V. Ya. Kikot, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. I. Primakin, Professor of the Department of Mathematical, Natural Sciences and General Disciplines of the Military Order of Zhukov of the Academy of the National Guard of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor;

A. B. Sizonenko, Professor of the Krasnodar Higher Military Orders of Zhukov and the October Revolution of the Red Banner College named after Army General S. M. Shtemenko of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker in the field of education;

S. M. Sitnik, Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Modeling, Institute of Engineering and Digital Technologies, Belgorod State National Research University, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor;

A. S. Solovyov, Professor, Department of Information Security of Telecommunication Systems, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

S. N. Trostyansky, Professor of the Department Technosphere and Fire Safety of Voronezh State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

K. M. Kholostov, Professor of the Department of Information Technology of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование

Барабаш О. П., Половинкина М. В., Половинкин И. П. ОБ УВЕЛИЧЕНИИ ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ РОСТА–РАСПРОСТРАНЕНИЯ.....	9
Солодуха Р. А., Атласов И. В. РЕДУКЦИЯ СТЕГАНОАНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ С ЗАДАННОЙ ДОСТОВЕРНОСТЬЮ	18

Управление в организационных системах

Мистров Л. Е. МЕТОД СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ.....	31
Холостов К. М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ АНКЕТНЫХ ДАННЫХ	43

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Минаев В. А., Манжула И. С. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В НАНОЖИДКОСТНОМ СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПРЯМОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ.....	51
Меньших В. В., Гришаева В. Р. ВЫБОР КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ О ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ	64

Персоналии

Валерий Васильевич Сысоев: Конфликт, который созидает	74
---	----

Информация

Информация для авторов.....	80
-----------------------------	----

CONTENT

Mathematical modeling

Barabash O. P., Polovinkina M. V., Polovinkin I. P. ON INCREASING THE ORDER OF APPROXIMATION OF THE DIFFERENCE SCHEME FOR THE GROWTH-PROPAGATION EQUATION..... 9

Solodukha R. A., Atlasov I. V. STEGANALYTICAL FEATURES REDUCTION WITH DEFINITE RELIABLE 18

Management in organizational systems

Mistrov L. E. METHOD OF STRUCTURAL-FUNCTIONAL SYNTHESIS OF SECURITY SYSTEMS OF SOCIAL AND ECONOMIC ORGANIZATIONS 31

Kholostov K. M. USING FUZZY METHODS IN ANNEX DATA PROCESSING 43

Safety in emergency situations

Minaev V. A., Manzhula I. S. MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE NANOFUIDIC DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTOR OF CRITICAL ENERGY SYSTEM 51

Menshikh V. V., Grishaeva V. R. CHOOSING QUALITIVES OF STATISTICAL DATA ON EMERGENCY SITUATIONS..... 64

Personalities

Valery V. Sysoev: The Conflict That Creates..... 74

Information

Information for authors 80

УДК: 519.63, 51-7, 51-37

ОБ УВЕЛИЧЕНИИ ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ РАЗНОСТНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ РОСТА–РАСПРОСТРАНЕНИЯ

О. П. Барабаш¹, М.В. Половинкина², И.П. Половинкин^{3,4}

¹Военно–воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина
(г. Воронеж)

² Воронежский государственный университет инженерных технологий

³Воронежский государственный университет

⁴Белгородский государственный национальный исследовательский университет

¹✉ navys9@yandex.ru ²✉ polovinkina-marina@yandex.ru

³✉ polovinkin@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос о построении двухпараметрического семейства конечно–разностных схем для квазилинейного уравнения роста–распространения, приводящих к системам линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей. Конечно–разностные схемы этого семейства имеют второй порядок аппроксимации по шагу пространственной переменной и не менее первого порядка по шагу временной переменной. В этом двухпараметрическом семействе конечно–разностных схем имеется уникальная конечно–разностная схема, аналогичная схеме Кранка–Николсон, по–прежнему дающая второй порядок аппроксимации по шагу пространственной переменной и второй порядок аппроксимации по шагу временной переменной. Найдены необходимые и достаточные условия для получения такого порядка точности в виде набора значений параметров семейства.

Ключевые слова: уравнение роста–распространения, параболические уравнения, конечно–разностная схема, порядок аппроксимации

ВВЕДЕНИЕ

Уравнение роста–распространения (уравнение реакции–диффузии, диффузионно–логистическое уравнение) в простейшем случае имеет вид

$$u_t = Du_{xx} + f(u). \quad (1)$$

Оно используется для описания поведения сред, где возможны процессы пространственно–временной самоорганизации [1]. Здесь $u = u(x, t)$ – основная искомая количественная характеристика процесса роста–распространения в точке x в момент времени t (плотность или концентрация по массе в химических процессах, температура в процессах теплопроводности, нейтронный поток в ядерных реакциях, популяционная плотность в популяционной динамике и пр.), D – коэффициент диффузии (теплопроводности), $f(u)$ – функция, описывающая вклад реакционной составляющей в процесс изменения количественных характеристик субстанции (нелинейный член реакции).

В настоящей работе мы строим метод приближенного решения начально–краевой задачи для уравнения (1) с правой частью $f(u) = Au(s-u)$.

Становление и развитие теоретических основ приближенных методов решения задач для линейных дифференциальных уравнений имеет долгую историю (см., например, [2–7]) и во многих разделах приняла завершенные очертания. Для нелинейных дифференциальных уравнений проблема построения приближенных методов решения начальных, краевых, начально–краевых задач не теряет своей актуальности, по меньшей мере, по двум причинам: невозможность во многих случаях найти точный метод решения и необходимость в совершенствовании численных методов решения (увеличение порядка аппроксимации, снижение сложности алгоритмов решения и т.п.). Исследованию порядка аппроксимации численных методов для нелинейных дифференциальных уравнений посвящено сравнительно немного работ. Отметим в связи с этим работы [8–11]. В работах [12–13] строится семейство разностных схем для уравнения (1) с правой частью $f(u) = Au(s-u)$ с порядком аппроксимации $O(h^2 + \tau)$, где h – шаг сетки по оси изменения пространственной переменной x , τ – шаг сетки по оси изменения временной переменной t . В настоящей статье мы покажем, при каких условиях порядок аппроксимации может быть увеличен до $O(h^2 + \tau^2)$.

1. СЕМЕЙСТВО РАЗНОСТНЫХ СХЕМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ ПО ВРЕМЕНИ

В этом разделе мы вкратце воспроизведем построение и выяснение порядка аппроксимации семейства разностных схем для уравнения (1) с правой частью $f(u) = Au(s-u)$ из [12–13] для полноты изложения.

Рассмотрим уравнение роста–распространения с квадратичной нелинейностью в правой части:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Au(S-u), \quad (x, t) \in \Omega = (0 < x < 1, 0 < t \leq T), \quad (2)$$

где A – постоянная роста, S – теоретический максимум функции u на множестве $\bar{\Omega} = (0 \leq x \leq 1, 0 \leq t \leq T)$.

Конечно–разностную схему построим для начально–краевой задачи для уравнения (2) с начальным условием

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad 0 \leq x \leq 1$$

и граничными условиями

$$u(0, t) = u_1(t), \quad u(1, t) = u_2(t), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Мы должны отметить, что начальные и граничные условия приведены здесь для корректности исходной рассматриваемой задачи. Краевые условия первого рода выбраны лишь по причине возможности их точной аппроксимации. Мы оставляем в стороне вопрос об аппроксимации граничных условий иных типов. Основное внимание

мы сосредоточим на исследовании порядка аппроксимации конечно-разностной схемы во внутренних узлах сетки.

Разобьем отрезки $[0,1]$ оси x и $[0,T]$ оси t на M и N частей соответственно. Тем самым мы вводим сетку

$$\overline{w_{h\tau}} = \overline{w_h} \times w_\tau = \{x_i = ih\} \times \{t_j = j\tau\}$$

$$\text{с шагами } h = \frac{1}{N} \text{ и } \tau = \frac{T}{M}, i = 0, 1, \dots, N, j = 0, 1, \dots, M.$$

Для аппроксимации оператора $L = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ используем шеститочечный шаблон, состоящий из узлов $(x_{i\pm 1}, t_{j+1}), (x_i, t_{j+1}), (x_{i\pm 1}, t_j)$ с центром в точке (x_i, t_{j+1}) [10]. Значение сеточной функции в узле (x_i, t_j) обозначим через y_i^j . Заменяем $\frac{\partial u}{\partial t}$ первой разностной производной, а $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ – второй разностной производной. Используя обозначение

$$\Lambda y_i = \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2}$$

и вводя произвольные вещественные параметры $\sigma \in (0,1)$, $\beta \in (0,A)$, рассмотрим следующее семейство разностных схем:

$$\begin{aligned} \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\tau} &= \Lambda(\sigma y_i^{j+1} + (1-\sigma)y_i^j) + \phi_i^j, \\ \phi_i^j &= (A-\beta)(S - y_i^j)y_i^{j+1} + \beta(S - y_i^{j+1})y_i^{j+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϕ_i^j – сеточная аппроксимация правой части $f(u) = Au(S-u)$ уравнения (2) на внутренних узлах сетки. Как уже отмечалось, начальные и краевые условия аппроксимируются точно:

$$y_o^j = u_1^j, y_N^j = u_2^j, \quad (4)$$

$$y_i^0 = y(x_i, 0) = u_0(x_i). \quad (5)$$

Для определения погрешности построенного семейства разностных схем необходимо оценить разность $z_i^j = y_i^j - u_i^j$ сеточной функции и решения $u = u(x, t)$ в узлах сетки. Введем безындексные обозначения:

$$y_i^j = y, y_i^{j+1} = \hat{y}, \quad y_t = \frac{\hat{y} - y}{\tau}.$$

Тогда разность z будет удовлетворять соотношениям

$$\begin{cases} z_t = \Lambda(\sigma \hat{z} + (1-\sigma)z) + \psi, (x, t) \in w_{h\tau}, \\ z(0, t) = z(1, t) = 0, t \in w_\tau, \\ z(x, 0) = 0, x \in \overline{w_h}, \end{cases}$$

а невязка схемы на решении удовлетворяет равенствам

$$\begin{aligned} \psi &= \Lambda(\sigma \hat{u} + (1-\sigma)u) - u_t + \phi, \\ \phi &= (A - \beta)(S - u)\hat{u} + \beta(S - \hat{u})u. \end{aligned} \quad (6)$$

Будем считать функцию $u = u(x, t)$ достаточно гладкой. Тогда, пользуясь разложением по формуле Тейлора в окрестности точки (x, t) и пользуясь линейностью оператора Λ , запишем (6) в виде

$$\psi = Lu - \dot{u} + \phi + O(h^2 + \tau).$$

Учитывая, что $\dot{u} = Lu + Au(S - u)$, окончательно получим

$$\psi = O(h^2 + \tau).$$

Следовательно, разностное уравнение (5) аппроксимирует (2) со вторым порядком точности по h и первым – по τ .

Отметим, что при $\sigma = 0$ схема становится явной.

2. ПОВЫШЕНИЕ ПОРЯДКА АППРОКСИМАЦИИ ПО ВРЕМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

В предыдущем разделе основной инструментальной частью исследования порядка аппроксимации разностной схемы (3) являлась формула Тейлора в окрестности точки (x, t) . В целях выяснения возможности повышения порядка аппроксимации воспользуемся теперь формулой Тейлора в окрестности точки $\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)$, полагая $u \in C^4(\overline{\Omega})$:

$$\begin{aligned} u(x \pm h, t) &= u(x, t) \pm hu_x(x, t) + \frac{h^2}{2}u_{xx}(x, t) \pm \frac{h^3}{6}u_{xxx}(x, t) + \frac{h^4}{24}u_{xxxx}(x, t) + O(h^5), \\ u(x, t + \tau) &= u\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right) + u_t\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau}{2} + \frac{1}{2}u_{tt}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^2}{4} + \frac{1}{6}u_{ttt}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^3}{8} + \\ &+ \frac{1}{24}u_t^{(4)}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^4}{16} + O(\tau^5), \\ u(x, t) &= u\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right) - u_t\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau}{2} + \frac{1}{2}u_{tt}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^2}{4} - \frac{1}{6}u_{ttt}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^3}{8} + \\ &+ \frac{1}{24}u_t^{(4)}\left(x, t + \frac{\tau}{2}\right)\frac{\tau^4}{16} + O(\tau^5). \end{aligned}$$

С учетом этих разложений для участвующих в разностной схеме разностных производных можно записать следующие соотношения:

$$\Lambda u = \frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{h^2} = \frac{h^2 u_{xx}(x, t) + \frac{h^4}{12} + O(h^5)}{h^2} = \frac{h^2 u_{xx}(x, t) + O(h^4)}{h^2} = u_{xx}(x, t) + O(h^2),$$

$$\frac{u(x, t + \tau) - u(x, t)}{\tau} = u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + \frac{\tau^2}{24} u_{ttt} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + O(\tau^4).$$

Кроме того,

$$\begin{aligned} \Lambda u(x, t + \tau) &= \Lambda \left(u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right) = \\ &= u_{xx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + u_{txx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(h^2 + \tau^2), \\ \Lambda u(x, t) &= \Lambda \left(u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) - u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right) = \\ &= u_{xx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) - u_{txx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(h^2 + \tau^2). \end{aligned}$$

Отсюда следует, что невязка

$$\Psi = \sigma \Lambda u(x, t + \tau) + \eta \Lambda u(x, t) - u_t'(x, t) + \alpha(1 - u(x, t))u(x, t + \tau) + \beta(1 - u(x, t + \tau))u(x, t)$$

для разностной схемы (5) представится в виде

$$\begin{aligned} \Psi &= \sigma \left(u_{xx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + u_{txx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(h^2 + \tau^2) \right) + \eta \left(u_{xx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) - u_{txx} \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(h^2 + \tau^2) \right) - \\ &- \left(u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + O(\tau^2) \right) + \\ &+ \alpha \left(1 - u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} - O(\tau^2) \right) \left(u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) + u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right) + \\ &+ \beta \left(1 - u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) - u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} - O(\tau^2) \right) \left(u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) - u_t \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right) \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right). \end{aligned}$$

Здесь $\eta = 1 - \sigma$. Введем обозначение $u = u \left(x, t + \frac{\tau}{2} \right)$. Тогда представление невязки запишется в виде, подобном (6):

$$\begin{aligned} \Psi &= u_{xx}(\sigma + \eta) + u_{txx}(\sigma - \eta) \frac{\tau}{2} + O(h^2 + \tau^2) - u_t + \alpha \left(u + u_t \frac{\tau}{2} - u^2 - uu_t \frac{\tau}{2} + uu_t \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right) + \\ &+ \beta \left(u - u_t \frac{\tau}{2} - u^2 + uu_t \frac{\tau}{2} - uu_t \frac{\tau}{2} + O(\tau^2) \right) = \\ &= u_{xx}(\sigma + \eta) + u_{txx}(\sigma - \eta) \frac{\tau}{2} + u_t \left(-1 + \frac{\tau}{2}(\alpha - \beta) \right) + (u - u^2)(\alpha + \beta) + O(h^2 + \tau^2). \end{aligned}$$

Из равенства $u_t = u_{xx} + Au(1 - u)$ получим представление $u_{xx} = u_t - Au(1 - u)$, откуда, подставляя полученное выражение в представление невязки, получим:

$$\Psi = (u_t - Au(1 - u))(\sigma + \eta) + u_{txx}(\sigma - \eta) \frac{\tau}{2} + u_t \left(-1 + \frac{\tau}{2}(\alpha - \beta) \right) + (u - u^2)(\alpha + \beta) + O(h^2 + \tau^2) =$$

$$= u_{\text{bx}}(\sigma - \eta) \frac{\tau}{2} + u_t \left(-1 + \frac{\tau}{2}(\alpha - \beta) + \sigma + \eta \right) + (u - u^2)(\alpha + \beta - A(\sigma + \eta)) + O(h^2 + \tau^2).$$

Теперь уже очевидно, что соотношение $\psi = O(h^2 + \tau^2)$ имеет место тогда и только тогда, когда выполняются условия

$$\begin{cases} -1 + \frac{\tau}{2}(\alpha - \beta) + \sigma + \eta = 0, \\ \alpha + \beta - A(\sigma + \eta) = 0, \\ \sigma - \eta = 0, \end{cases}$$

откуда с необходимостью получаем

$$\sigma = \eta = \frac{1}{2}, \alpha = \beta = \frac{A}{2}. \quad (7)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное, следует отметить, что двухпараметрическое семейство разностных схем (5) имеет второй порядок аппроксимации по шагу пространственной переменной и не менее первого порядка по шагу временной переменной. Однако в этом двухпараметрическом семействе разностных схем при выполнении условий (7) (и только в этом случае) выделяется уникальная разностная схема, аналогичная схеме Кранка-Николсон, дающая по-прежнему второй порядок аппроксимации по шагу пространственной переменной и второй порядок аппроксимации по шагу временной переменной. В работе [13] рассмотрен вопрос об устойчивости разностной схемы (5). Полученные в [13] достаточные условия устойчивости для схемы (5) в случае условий (7) повышенного порядка аппроксимации не выполняются. Однако, как указано в [13], численный эксперимент показывает, что устойчивость имеет место и при нарушении этих условий.

Вопрос о численной реализации построенных здесь разностных схем мы оставляем в стороне. Однако достаточно очевидно, что в рассматриваемом диапазоне изменения параметров всякая разностная схема из указанного семейства приводит к трехдиагональной системе линейных алгебраических уравнений, которая решается хорошо известным методом прогонки, алгоритм которого имеет линейную сложность. В предельном случае $\sigma = 0$ мы имеем явную разностную схему. Достаточно внушительное количество результатов численных экспериментов применения семейства разностных схем (5) к задачам изучения роста и распространения глиомы приведено в работе [13].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пухов А. А. Уравнение «Реакция–диффузия». — Москва: МФТИ, 2014. — 73 с.
2. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике — М.: Наука, 1970. — 510 с.

3. Михлин С. Г. Численная реализация вариационных методов — М.: Наука, 1966. — 432 с.
4. Цлаф Л. Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения: справочное руководство — Спб.: Лань, 2005. — 192 с.
5. Емельянов В. Н. Введение в теорию разностных схем: учебное пособие — Санкт — Петербург: БГТУ, 2006. — 191 с.
6. Марчук Г. И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы — М.: Наука, 1981. — 416 с.
7. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: Учебное пособие для вузов — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. — 432 с.
8. Матус П. П., Утебаев Б. Д. Монотонные разностные схемы повышенного порядка точности для параболических уравнений // Доклады НАН Беларуси. — 2020. — Т. 64 № 4. — С. 391–398.
9. Matus P. P., Hieu L. M., Vulkov L. G. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasilinear parabolic equations // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2017. — № 300. — P. 186–199.
10. Matus P. P. Stability of Difference Schemes for Nonlinear Time-dependent Problems // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2003. — Vol. 3. — P. 313–329.
11. Matus P. Monotone schemes of a higher order of accuracy for differential problems with boundary conditions of the second and third kind // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2002. — № 2(4). — P. 378–391.
12. Barabash, O. P., Polovinkina M. V., Polovinkin I. P., Zhadanova M. L. On a difference scheme for the Growth-Propagation Equation // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2023. — V. 44. — №. 3. — P. 989–992.
13. Barabash O. P., Polovinkin I. P. A discrete model of glioma growth and spread. Comput Math Model (2025).

Барабаш Ольга Павловна – Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, г. Воронеж, Россия, ✉ e-mail: navys9@yandex.ru

Половинкина Марина Васильевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования @Воронежский государственный университет инженерных технологий@, г. Воронеж, Россия, ✉ e-mail: polovinkina-marina@yandex.ru

Половинкин Игорь Петрович – д-р физ.-мат. наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования @Воронежский государственный университет@, г. Воронеж, Россия, ✉ e-mail: polovinkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2026

Принято к публикации 19.03.2026

ON INCREASING THE ORDER OF APPROXIMATION OF THE DIFFERENCE SCHEME FOR THE GROWTH-PROPAGATION EQUATION

O. P. Barabash¹, M.V. Polovinkina², I.P. Polovinkin^{3,4}

¹Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh)

²Voronezh State University of Engineering Technologies

³ Voronezh State University

⁴ Belgorod State National Research University

¹✉ navys9@yandex.ru ²✉ polovinkina-marina@yandex.ru

³✉ polovinkin@yandex.ru

Abstract. The article deals with the construction of a two-parameter family of finite-difference schemes for a quasi-linear growth-propagation equation leading to systems of linear algebraic equations with a tridiagonal matrix. Finite-difference schemes of this family have a second-order approximation over the step of a spatial variable and at least a first-order approximation over the step of a temporal variable. In this two-parameter family of finite-difference schemes, there is a unique finite-difference scheme similar to the Crank-Nicholson scheme, which still gives a second-order approximation over the step of a spatial variable and a second-order approximation over the step of a temporal variable. The necessary and sufficient conditions for obtaining such an order of accuracy in the form of a set of values of the family parameters were found.

Keywords: growth-propagation equation, parabolic equations, finite difference scheme, approximation order

REFERENS

1. Pukhov A. A. The «Reaction-diffusion» equation. Moscow: MIPT, 2014. 73 p. ISBN 978-5-7417-0510-0.
2. Mikhlin S. G. Variational methods in mathematical physics. — M.: Nauka, 1970. — 510 p.
3. Mikhlin S. G. Numerical implementation of variational methods. — M.: Nauka, 1966. — 432 p.
4. Tslaf L. Ya. Calculus of variations and integral equations: a reference guide. — St. Petersburg: Lan, 2005. — 192 p.
5. Emelyanov V. N. Introduction to the theory of difference schemes: textbook – St. Petersburg: BSTU, 2006. — 191 p.
6. Marchuk G. I., Agoshkov V. I. Introduction to projection-grid methods. — M.: Nauka, 1981. — 416 p.
7. Samarsky A. A. Numerical methods: Textbook for universities. — M.: Nauka, 1989. — 432 p.
8. Matus P. P., Utebaev B. D. Monotonic difference schemes of increased accuracy for parabolic equations // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. — 2020. — Vol. 64 No. 4. — pp. 391–398.
9. Matus P. P., Hieu L. M., Vulkov L. G. Analysis of second order difference schemes on non-uniform grids for quasilinear parabolic equations // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2017. — № 300. — P. 186–199.

10. Matus P. P. Stability of Difference Schemes for Nonlinear Time-dependent Problems // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2003. — Vol. 3. — p. 313–329.
11. Matus P. Monotone schemes of a higher order of accuracy for differential problems with boundary conditions of the second and third kind // Computational Methods in Applied Mathematics. — 2002. — № 2(4). — P. 378–391.
12. Barabash O. P., Polovinkina M. V., Polovinkin I. P., Zhadanova M. L. On a difference scheme for the Growth-Propagation Equation // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2023. – V. 44. – №. 3. – P. 989–992.
13. Barabash O. P., Polovinkin I. P. A discrete model of glioma growth and spread // Comput Math Model (2025).

Received 20.02.2026

Accepted 19.03.2026

РЕДУКЦИЯ СТЕГАНОАНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ С ЗАДАННОЙ ДОСТОВЕРНОСТЬЮ

Р. А. Солодуха¹, И. В. Атласов²

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий

²Московский ордена Почета университет МВД России имени В.Я. Кикотя

¹✉ standartal@list.ru ²✉ mathematic1@rambler.ru

Аннотация. Предложено решение задачи сокращения набора стеганоаналитических признаков определения размера вложения в пространственную область изображения, на примере вектора признаков Subtractive Pixel Adjacency Matrix (SPAM). Проверено предположение о том, что некоторые признаки в рамках одного вектора могут быть коррелированы. Разработана методика редукции признаков с учетом точности и достоверности в составе математической модели, алгоритма реализации модели и компьютерной программы. Теоретическая база – приближение регрессии первого рода линейной регрессией второго рода для многомерных случайных величин. Для верификации результатов выполнен численный эксперимент по сравнению метрик качества регрессии предложенного и известных методов уменьшения пространства признаков. Для обеспечения воспроизводимости эксперимента датасеты и программный код представлены в Kaggle. Предложенную методику целесообразно применять в задачах, где необходимо учитывать точность и достоверность, например, при осуществлении экспертно-криминалистической деятельности по вопросам, допускающим вероятностные выводы. С помощью данных оценок аналитик может варьировать количество признаков в зависимости от доступных вычислительных мощностей и временных рамок исследования.

Ключевые слова: стеганоанализ, редукция вектора признаков, достоверность, SPAM, стеганоаналитическая экспертиза, регрессия

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в области анализа цифровой стеганографии изображений разработаны десятки методов, отвечающих на вопрос о размере вложения. Де-факто, стандартом является использование многомерного вектора признаков с последующей классификацией. При этом, если есть возможность получить качественный датасет, то классификацию целесообразно заменить регрессией для более точной оценки размера вложения. Данная задача особенно актуальна в рамках компьютерной экспертизы при известном стеганографическом алгоритме/программе.

Стеганоаналитические методы могут быть «с открытым кодом» или в компилированном виде, т.е. представляться аналитику как "черный ящик". С учетом того, что разные методы могут отслеживать одни и те же закономерности в пустых и заполненных контейнерах, в их результатах может наблюдаться коррелированность, один метод может включать векторы признаков других и т.п. С учетом вычислительной сложности стеганоаналитических методов возникает необходимость отбросить методы, являющиеся частными случаями других методов. Или, как частный случай, уменьшить размерность вектора признаков за счет отбрасывания коррелированных.

Согласно [1] при производстве экспертизы эксперт не должен применять все методы, т.к. среди них могут присутствовать дублирующие друга. Поэтому на практике этот вопрос решается исходя из достаточности метода для решения задачи с

необходимой надежностью. При этом должны учитываться такие факторы, как экономия средств и времени.

Таким образом, если в распоряжении эксперта имеется несколько стеганоаналитических методов, то целесообразно предварительно проверить их на коррелированность, но с учетом требуемой достоверности, градация которой облегчила бы оценку и использование выводов эксперта следствием и судом [2]. При этом принятие решения на основании коэффициента корреляции требует проверки гипотезы о значимости различия между коэффициентами корреляции выборки и генеральной совокупности, а затем проверки гипотез о конкретных, интересующих аналитика, значениях генеральной совокупности [3]. Также для легитимности коэффициента корреляции результаты работы методов должны иметь совместное нормальное распределение, что накладывает дополнительное условие на выборку.

Те же рассуждения можно применить к ситуации, когда эксперт использует методы машинного обучения. Современные стеганоаналитические векторы признаков весьма объемны, например, SPAM (686D) [4], DCTR(8000D) [5], PSRM (12870D) [6], SRM (34671D) [7], что предъявляет серьезные требования к вычислительным ресурсам и обучающим выборкам. Для снижения размерности признакового пространства используются соответствующие методы, например, метод главных компонент, независимых компонент, дискриминантный анализ и т.п., однако они не позволяют оценить достоверность и точность схожести признаков. При этом, если эксперт уменьшит признаковое пространство, то это не только снизит вычислительные затраты и время, но и повлияет на достоверность и точность, а эксперт должен знать данные характеристики для соотнесения с требованиями решаемой задачи.

Таким образом, возникает задача разработки математической модели и алгоритма редукции множества стеганоаналитических методов/признаков с возможностью априорной установки схожести методов/признаков и вычисления схожести с заданным уровнем достоверности. Теоретическая база – приближение регрессии первого рода линейной регрессией второго рода для многомерных случайных величин. Применительно к машинному обучению предложенный алгоритм относится к группе методов снижения размерности признакового пространства. По математическим принципам он близок к методу главных компонент (PCA) и линейному дискриминантному анализу (LDA), но в отличие от них отбрасывает признаки, а не формирует необходимое количество новых.

Приведенный алгоритм предполагается выполнять перед стеганоанализом и по мере появления новых стеганоаналитических методов для выявления их нужного количества для обеспечения требуемой достоверности.

Теоретической основой для решения этой задачи является аппроксимация регрессии первого типа линейной регрессией второго типа для многомерных случайных величин. Теоретические вопросы для общего случая рассмотрены в работах [8, 9]. Работы [10, 11] посвящены применению предложенного метода для редукции множества стеганоаналитических методов. В данной статье приведены экспериментальные результаты по редукции стеганоаналитических признаков для частного случая попарного сравнения. Приводится сравнительный анализ качества распознавания после редукции предложенным методом с другими методами сокращения размерности признакового пространства.

1. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Формирование случайных величин. Рассмотрим выборку из N групп по g файлов в каждой. Файлы являются пустыми и заполненными контейнерами с шагом вложения 10, т.е. размер вложения $s=0,9,19...99$ в процентах от максимально возможного. В данной работе предполагается, что используется D -мерный вектор стеганоаналитических признаков.

Обозначим результаты работы второго признака применительно к первой файловой группе $x_1^2 = \{x_{1,i}^2\}_{i=1}^g$, обобщенный вектор результатов:

$$x_n^d = \{x_{n,i}^d\}_{i=g(n-1)+1}^{gn}.$$

Случайная величина $\zeta_{2,1} = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{j=1}^g x_{1,j}^g$ соответствует применению второго метода к первой группе файлов, в обобщенном виде:

$$\zeta_{d,n} = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{j=g(n-1)+1}^{gn} x_{n,j}^d.$$

Далее необходимо построить N -размерную случайную величину для каждого признака $d \in D$:

$$\zeta_d = (\zeta_{d,1}, \zeta_{d,2}, \dots, \zeta_{d,N-1}, \zeta_{d,N}) = \left(\frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{j=1}^g x_{1,j}^d, \dots, \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{j=g(N-1)+1}^{gN} x_{n,j}^d \right). \quad (1)$$

По построению, согласно центральной предельной теореме для многомерных случайных величин, случайные величины ζ_d , $d=1, \dots, D$ имеют нормальное распределение, значение g выбирается из соображений обеспечения нормальности распределения ζ_d [12].

Достоверность при оценке коэффициентов регрессии. В [13] показано, что случайные величины могут быть связаны некоторой зависимостью. Применительно к стеганоанализу можно сказать, что в многомерном векторе признаков присутствуют признаки, имеющие статистически идентичные значения при данной выборке и стеганоалгоритме. При наличии группы таких признаков для применения целесообразно оставить один. Свяжем соответствующие признакам j и k случайные величины некоторой линейной функцией f

$$f(\zeta_j) = \zeta_k$$

Тогда верно ($M(x)$ – обозначение математического ожидания):

$$\min_f M(\zeta_k - f(\zeta_j))^2 = M(\zeta_k - f_{kj}(\zeta_j))^2 = 0.$$

Также можно приближенно считать, что для некоторых $a_{k,j}$ и $b_{k,j}$

$$f_{k,j}(x) \approx a_{kj} + b_{kj}x,$$

Если для пары признаков (j, k) выполнено условие

$$M(\zeta_k - a_{kj} - b_{kj}\zeta_j)^2 < \gamma, \quad (2)$$

то случайную величину ζ_k (второй признак) можно считать лишней. Если выполнено условие

$$M(\zeta_k - a_{kj} - b_{kj}\zeta_j)^2 > \gamma, \quad (3)$$

то считаем, что случайная величина ζ_k принципиально отличается от ζ_j и мы ее оставляем (признаки различны). Значение γ представляет собой пороговое расстояние между признаками и выбирается аналитиком.

В основе предлагаемой методики сравнение каждого признака с другим признаком, с парой, с тройкой признаков и т.д. для выявления оптимальной комбинации признаков. В данной работе мы ограничимся рассмотрением самого простого частного случая (1-to-1) – сравнение двух случайных величин. Для каждой случайной величины ζ_j обозначим $m_j = M(\zeta_j)$, и после ряда преобразований, описанных в [8,9], получаем:

$$\min_a M(\zeta_k - a - \beta_{kj}\zeta_j)^2 = M(\zeta_k - m_k)^2 - \beta_{kj}^2 M(\zeta_j - m_j)^2. \quad (4)$$

Для оценки дисперсии зададимся некоторым уровнем значимости, например, $\alpha = 0.95$. Для $1 \leq k, j \leq D$ и $1 \leq n \leq N$ определим случайную величину:

$$\bar{\zeta}_j = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \zeta_{jn}. \quad (5)$$

Обозначим

$$\bar{\Theta}_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \zeta_{jn}\zeta_{kn} - \bar{\zeta}_j\bar{\zeta}_k = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N (\zeta_{jn} - \bar{\zeta}_j)(\zeta_{kn} - \bar{\zeta}_k). \quad (6)$$

Пользуясь уровнем значимости α , находим N и q , такие, чтобы выполнялось условие

$$\frac{N}{(1-q)^2} \int_{\frac{N}{(1+q)^2}}^{\frac{N}{(1-q)^2}} f_{\xi^2}^{N-1}(x) dx = \alpha, \quad (7)$$

где $f_{\xi^2}^{N-1}$ – плотность вероятности распределения хи-квадрат с $N-1$ степенями свободы. В этом случае при $0 < q < 1$ для найденного N величина $M(\zeta_k - m_k)^2$ с вероятностью α находится в промежутке

$$P\left(\bar{\Theta}_{kk}(1-q) < M(\zeta_k - m_k)^2 < \bar{\Theta}_{kk}(1+q)\right) = \alpha. \quad (8)$$

При $q \geq 1$ для найденного N величина $M(\zeta_k - m_k)^2$ с вероятностью α находится в промежутке

$$P\left(0 < M\left(\zeta_k - m_k\right)^2 < \bar{\Theta}_{kk}(1+q)\right) = \alpha. \quad (9)$$

Пользуясь уровнем значимости α , найдем t , такое чтобы выполнить условие

$$\int_{-t}^t f_{N-2}(x)dx = \alpha, \quad (10)$$

где f_{N-2} – плотность вероятности распределения Стьюдента с $N-2$ степенями свободы. В этом случае для найденного t величина β_{21} с вероятностью α находится в промежутке

$$P\left(b_{kj} - \frac{t\sqrt{\bar{\Theta}_{ij}\bar{\Theta}_{kk} - \bar{\Theta}_{kj}^2}}{\bar{\Theta}_{ij}\sqrt{N-2}} < \beta_{kj} < b_{kj} + \frac{t\sqrt{\bar{\Theta}_{ij}\bar{\Theta}_{kk} - \bar{\Theta}_{kj}^2}}{\bar{\Theta}_{ij}\sqrt{N-2}}\right) = \alpha. \quad (11)$$

2. ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ РЕДУКЦИИ

1. Определение количества групп.

1.1. Исходя из требуемой достоверности α , в соответствии с (7) подбираются значения N и q .

1.2. Выбирается пороговое расстояние между признаками γ .

2. Формирование исходных данных.

2.1. Выбирается начальное количество файлов g .

2.2. Реализуется стегановложение с заданным шагом.

2.3. Формируются группы контейнеров.

2.4. Для каждого контейнера рассчитывается вектор признаков. В соответствии с (1) строятся N -мерные реализации случайной величины ζ_d .

2.5. Проверяется нормальность распределения. Если ζ_d не распределена нормально, то увеличивается g , и данный пункт повторяется с новым g .

3. Попарное сравнение случайных величин ζ_d .

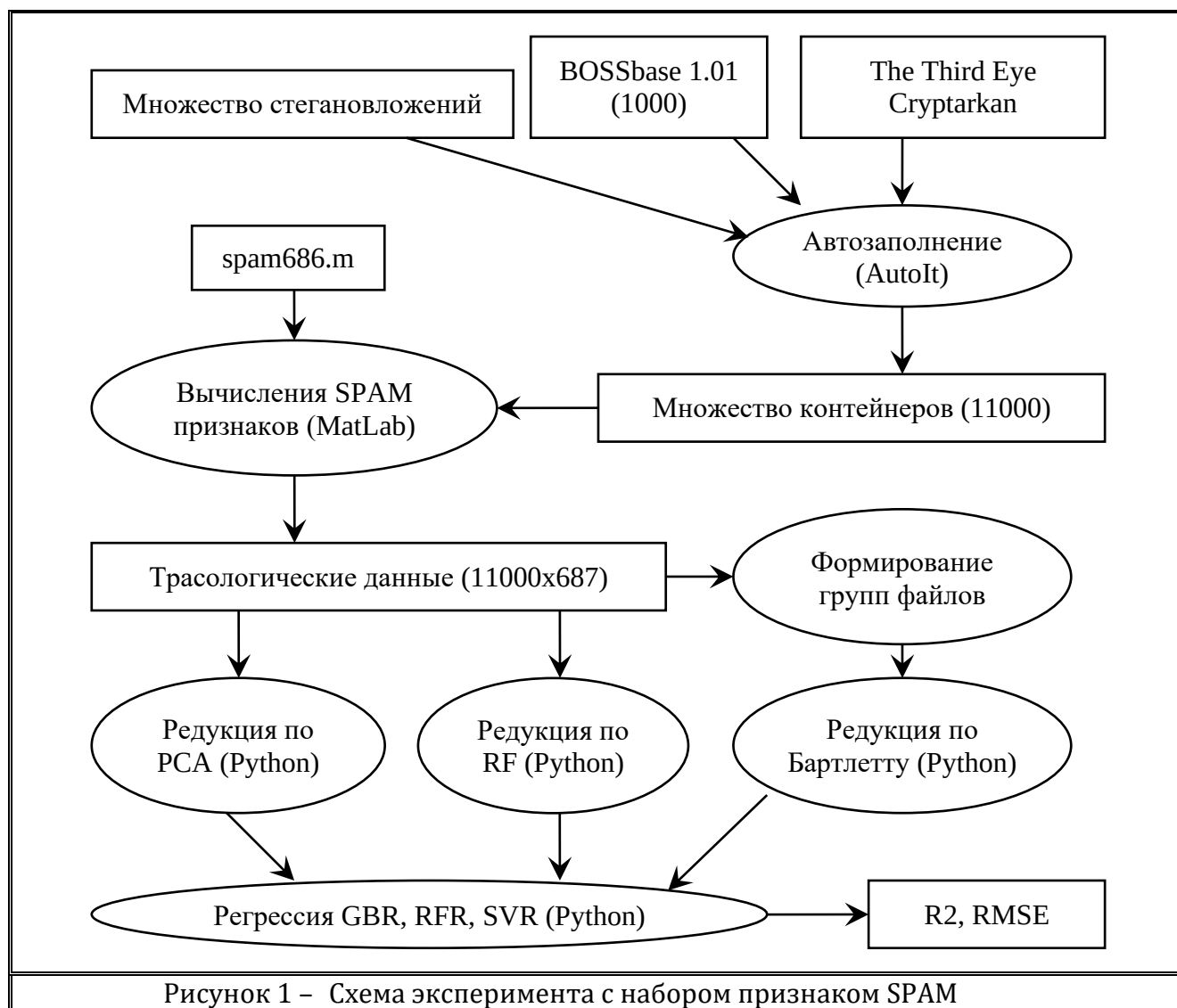
3.1. Вычисление коэффициента β . В соответствии с выбранным значением α определяется значением $t(10)$, далее по (11) и t определяется β_{ij} .

3.2. Оценка дисперсии $M\left(\zeta_k - m_k\right)^2$. В соответствии со значениями N , q и α вычисляется дисперсия по формулам (8) при $0 < q < 1$, или (9) при $q > 1$.

3.3. Принятие решения. Подставляем полученные значения $M\left(\zeta_k - m_k\right)^2$ и β_{ij} в (4). Если максимальное значение $M\left(\zeta_i - m_i\right)^2 - \beta_{ij}^2 M\left(\zeta_j - m_j\right)^2 < \gamma$, то i метод отбрасываем.

3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Проведем эксперимент по верификации предложенного алгоритма (будем называть его Bartlett в честь Мориса Бартлетта, который разработал [12, 14] теоретические основы предлагаемого алгоритма) для редукции вектора признаков, на примере 686D стеганоаналитического вектора признаков SPAM (https://dde.binghamton.edu/download/feature_extractors/download/spam686.zip) и сравним его результаты с аналогами. Схема эксперимента представлена на рис. 1.



В качестве источника контейнеров взята коллекция BOSSbase 1.01 (первые 1000 файлов, https://dde.binghamton.edu/download/ImageDB/BOSSbase_1.01.zip), которая содержит 10000 8-битных полутоновых изображений размером 512x512 пикселей в формате PGM (Portable Grey Map). Для дальнейшей работы файлы были преобразованы в формат BMP 8 бит с помощью XnConvert, затем в формат BMP 24 бит с помощью пакетного преобразования FastStone Image Viewer. Поскольку все три цветовых плоскости контейнера одинаковые, для анализа использовался только канал красного цвета. Контейнеры автоматически заполнялись [15] с шагом 10 % от максимального размера вложения от 9 до 99 %. Таким образом, выборка составила 11000 контейнеров.

Выбраны следующие стеганографические программы, реализующие LSB пространственной области изображения:

1. Cryptarkan 1.0 – не требует установки, позволяет задействовать 1, 2 или 4 LSBs файла, шифровать стегановложение. Вложение реализуется последовательно, что видно из рисунка 2 (получен с помощью программы WinMerge, <https://winmerge.org/downloads/>). Для эксперимента реализован режим LSB.

2. The Third Eye 1.0 – не требует установки, задействует плоскость младшего бита. Байты для вложения выбираются случайно, что видно из рисунка 3.



Устойчивое соответствие нормальному распределению по критерию Шапиро-Уилка на уровне значимости 0.01 было достигнуто при количестве групп $l=50$, файлов в группе $g=50$. Далее программный модуль редукции [16] запускался с различными значениями γ и отбрасывал коррелированные признаки (оставлял некоррелированные) с $\alpha = 0.99$.

Для сравнения использованы методы снижения размерности признакового пространства, представленные в библиотеке sklearn Python. Linear Discriminant Analysis (LDA) имеет ограничение на количество признаков в виде $\leq \min(\text{количество_классов} - 1, \text{количество_признаков})$, поэтому к используемому датасету с 11 классами неприменим. Выбраны: Principal Component Analysis (sklearn.decomposition.PCA), как математически близкий к предлагаемому алгоритм и ансамблевый алгоритм Random Forest (RF) на основе случайного леса (sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.feature_importances), как близкий к предлагаемому по выделению признаков из уже имеющихся без их трансформации.

Далее с помощью алгоритмов PCA и RF формировались датасеты с аналогичным количеством признаков. Учитывая значительное количество классов – 11, в качестве прогнозной модели использована регрессионная. Применялись алгоритмы машинного обучения для задачи регрессии:

- случайный лес (sklearn.ensemble.RandomForestRegressor), как пример модели обучения, ориентированной больше на обобщающую способность, чем на точность;
- градиентный бустинг (sklearn.ensemble.GradientBoostingRegressor), как пример модели обучения, ориентированной на точность, но с риском переобучения;
- машина опорных векторов Support Vector Regression (sklearn.svm.SVR), как модель со средними характеристиками, но часто применяемая в работах по стеганоанализу.

RFR и GBR применялись с параметром $n_estimators=100$. SVR применялся с гауссовским ядром RBF гиперпараметрами: $\gamma=20$ и $C=1000$. Обучающее и тестовое множества делились в соотношении 50/50. Результаты для Cryptarkan приведены в таблице 2, для The Third Eye в таблице 3. Обозначения в таблицах: RFR – Random Forest Regressor, GBR – Gradient Boosting Regressor, SVR – Epsilon-Support Vector Regression, f — количество признаков, γ — допустимое расстояния между признаками, R^2 — коэффициент детерминации, RMSE – среднеквадратическая ошибка. Датасеты и исходный код доступны по URL: <https://www.kaggle.com/datasets/romansolodukha/mskp-2026>.

Таблица 1 – Результаты для Cryptarkan

Cryptarkan		f=686		f=347		f=212		f=99		f=33	
		$\gamma=0.6$		$\gamma=0.7$		$\gamma=0.8$		$\gamma=0.9$		$\gamma=1$	
		R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
PCA	RFR	-	-	0.907	9.51	0.913	9.22	0.923	8.66	0.934	8.03
	GBR	-	-	0.939	7.69	0.939	7.68	0.940	7.66	0.938	7.78
	SVR	-	-	0.990	3.2	0.992	2.83	0.992	2.82	0.991	2.92
RF	RFR	-	-	0.965	5.84	0.965	5.82	0.964	5.91	0.955	6.62
	GBR	-	-	0.956	6.54	0.957	6.43	0.955	6.65	0.945	7.31
	SVR	-	-	0.994	2.5	0.992	2.77	0.989	3.34	0.957	6.44
Bartlett	RFR	0.964	5.89	0.965	5.81	0.963	6.01	0.961	6.12	0.947	7.21
	GBR	0.958	6.39	0.958	6.38	0.958	6.389	0.954	6.72	0.939	7.73
	SVR	0.982	4.19	0.991	3.03	0.990	3.1	0.988	3.47	0.967	5.69

Таблица 2 – Результаты для The Third Eye

The Third Eye		f=686		f=350		f=184		f=86		f=31	
		$\gamma=0.6$		$\gamma=0.7$		$\gamma=0.8$		$\gamma=0.9$		$\gamma=1$	
		R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE	R2	RMSE
PCA	RFR	-	-	0.951	6.9	0.956	6.56	0.959	6.34	0.962	6.1
	GBR	-	-	0.952	6.8	0.953	6.8	0.952	6.86	0.951	6.9
	SVR	-	-	0.988	3.4	0.993	2.55	0.995	2.3	0.991	2.9
RF	RFR	-	-	0.991	2.96	0.990	3.1	0.988	3.35	0.981	4.33
	GBR	-	-	0.987	3.62	0.984	3.89	0.982	4.2	0.968	5.56
	SVR	-	-	0.996	2.05	0.993	2.69	0.978	4.65	0.905	9.58
Bartlett	RFR	0.991	3	0.991	3	0.990	3.2	0.984	3.9	0.979	4.5
	GBR	0.987	3.6	0.987	3.57	0.983	4	0.974	5	0.958	6.4
	SVR	0.974	5	0.992	2.8	0.993	2.6	0.982	4.1	0.953	6.75

Колонка таблиц $f=686$ означает для Bartlett прямое применение SPAM, т.к. при данном значении γ ни один признак не отброшен. Также видно, что нет признаков, различающихся менее, чем на 0.6 как для Cryptarkan, так и для The Third Eye.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Программный эксперимент подтвердил эффективность вектора признаков SPAM на уровне $0.96 < R^2 < 0.99$, $3 < RMSE < 7$. В то же время при редукции признаков до некоторого уровня, который зависит от триады <стеганопрограмма, метод редукции, регрессор>, эффективность может возрасти, например, для SVR при переходе от 686D к 350D (The Third Eye), 347D (Cryptarkan), что наглядно отражено на рисунках 4, 5, где информация представлена в виде гистограмм RSME. Значения PCA и RF для $f=686$ не рассчитывались, на диаграмме для наглядности приведены значения для Bartlett.

Заметим, что результаты моделей редукции Bartlett и RF сильно коррелированы, несмотря на алгоритмические различия.

Лучшие с точки зрения метрик качества распознавания комбинации приведены в таблице 3.

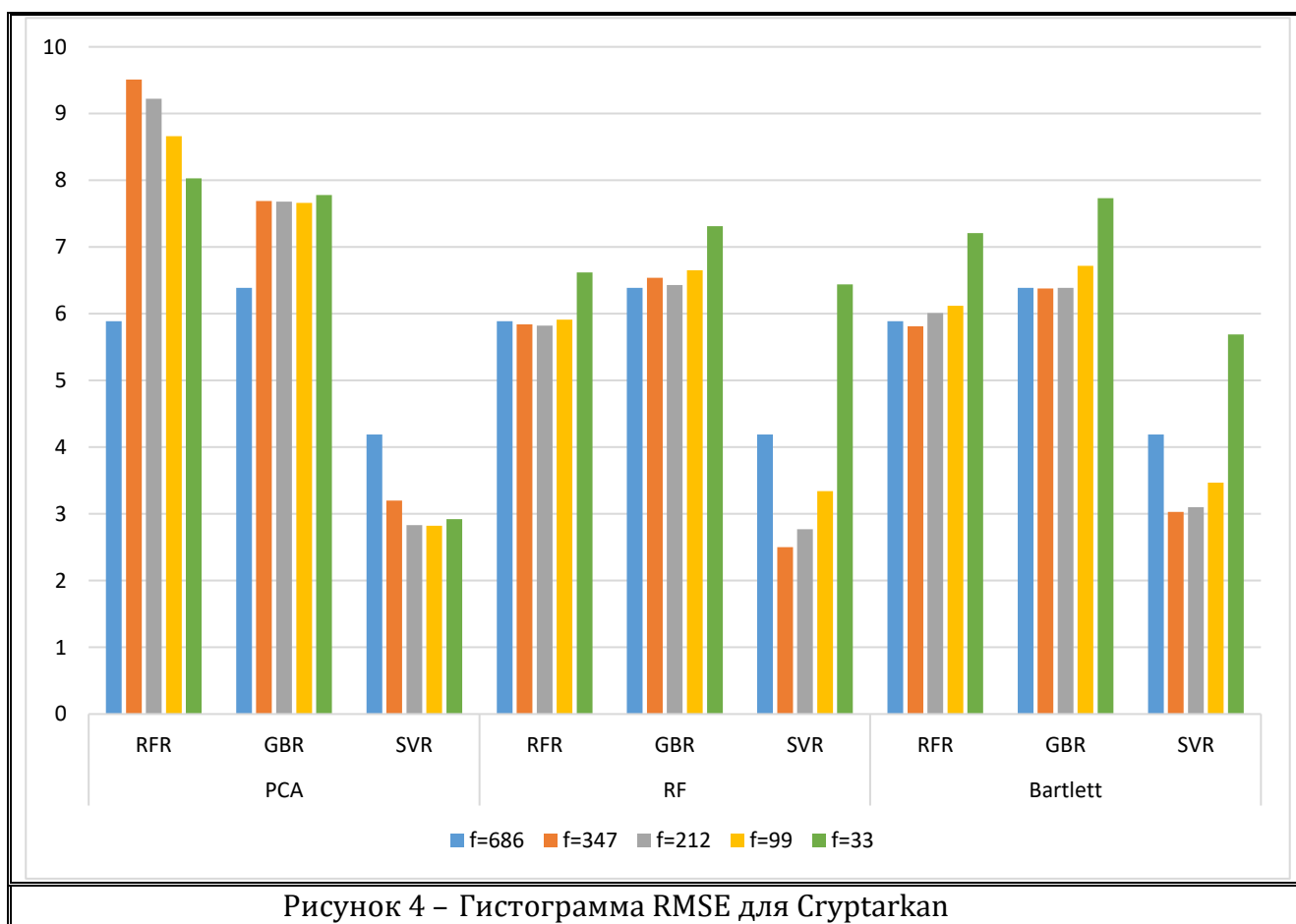


Рисунок 4 – Гистограмма RMSE для Cryptarkan

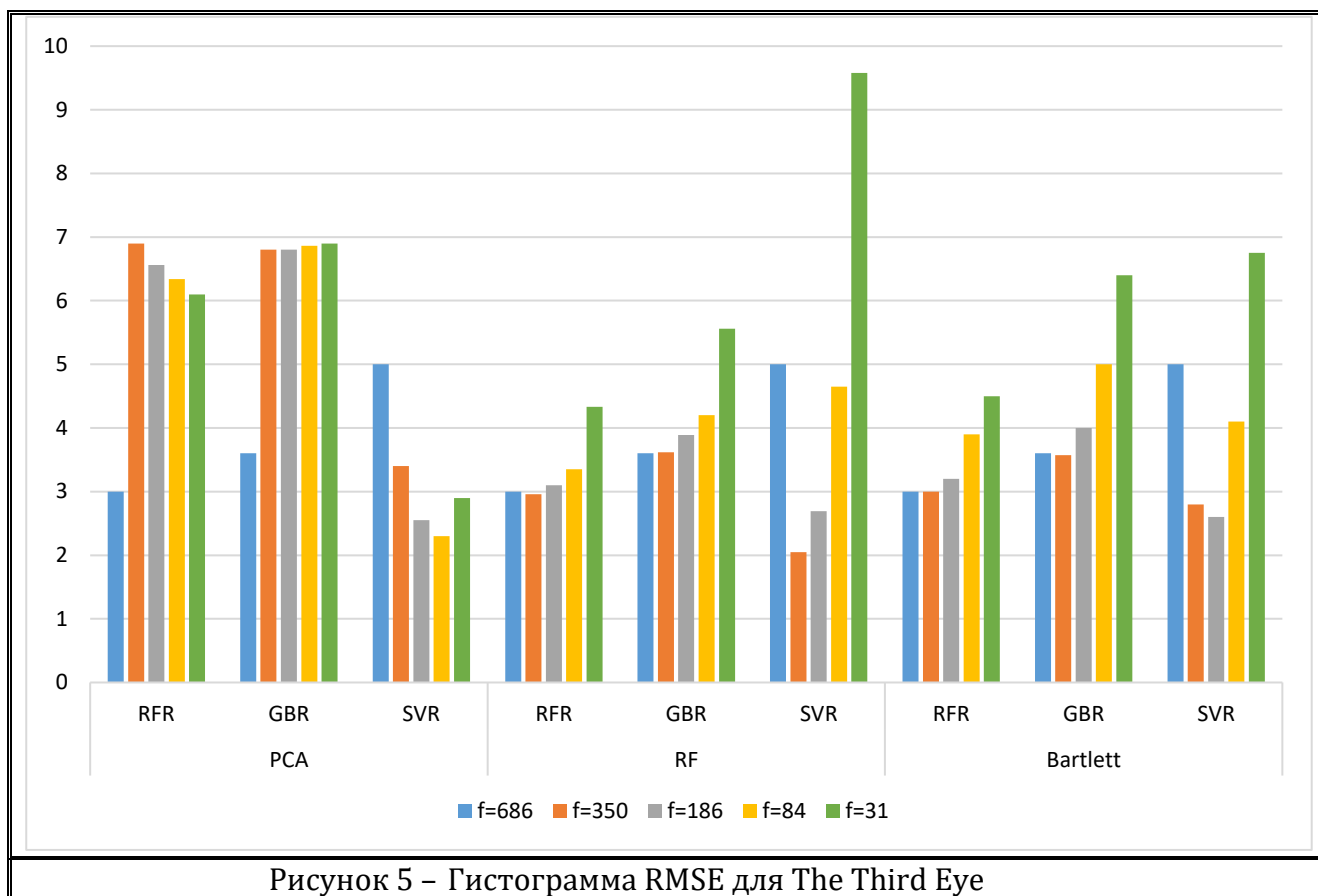


Рисунок 5 – Гистограмма RMSE для The Third Eye

Таблица 3 – Лучшие комбинации регрессора и модели редукции

	$\gamma = 0.6$	$\gamma = 0.7$	$\gamma = 0.8$	$\gamma = 0.9$	$\gamma = 1$
Cryptarkan	SVR	RF+SVR	PCA+SVR RF+SVR	PCA+SVR	Bartlett+SVR
The Third Eye	RFR	RF+SVR	PCA+SVR Bartlett+SVR RF+SVR	PCA+SVR	RF+RFR Bartlett+RFR

Таким образом, предложенный алгоритм редукции признакового пространства не уступает таким, как RF и PCA, но при этом позволяет осуществить оценку точности и достоверности редукции, что является важным аспектом применения экспертных методик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жижина М. В. Судебно-почерковедческая экспертиза документов / под ред. профессора Е.П. Ищенко. Москва: ЮРЛИТИНФОРМ, 2006. — С. 110–116.
2. Усов А. И., Градусова О. Б., Кузьмин С. А. Использование вероятностно-статистических методов при оценке значимости результатов экспертного исследования в отечественной и зарубежной судебно-экспертной практике (сравнительный анализ) // Теория и практика судебной экспертизы. — 2018. — Т. 13. №4. — С. 6–15.
3. Фёрстер Э., Рёнц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. Перевод с немецкого, М.: «Финансы и статистика», 1983 г. — 304 с.

4. Pevny T., Bas P., Fridrich J. Steganalysis by Subtractive Pixel Adjacency Matrix // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2010. — V. 5(2). — P. 215–224.
5. Holub V., Fridrich J. Low Complexity Features for JPEG Steganalysis Using Undecimated DCT // IEEE Transactions on Information Forensics and Security 10(2):219-228. DOI:10.1109/TIFS.2014.2364918
6. Holub V., Fridrich J. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis // IEEE Transactions on Information Forensics and Security 8(12):1996-2006. DOI:10.1109/TIFS.2013.2286682.
7. Fridrich J., Kodovský J. Rich models for steganalysis of digital images // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. — 2011. — V. 7(3). — P. 868–882.
8. Атласов И. В., Солодуха Р. А. Стеганоанализ цифровых изображений: автоматизация, оптимизация, достоверность: монография [Электронный ресурс]. Электр. дан. и прогн. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2020. 171 с.
9. Atlasov I., Solodukha R. Reduction of Steganalytical Methods Set with Determined Reliability // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). — 2019. — P. 126–131. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947470
10. Солодуха Р. А., Перминов Г. В., Атласов И. В. Редукция набора детекторов LSB с заданной достоверностью // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 22 (1), С.74-81.
11. Solodukha R. A., Perminov G. V., Atlasov I. V. Computing Experiment of LSB Detectors Set Reduction with Definite Reliability for 1-to-1 Pattern // 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2022, pp. 30-37, doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974065.
12. Wishart J., Bartlett M.S. The distribution of the second order moment statistics in a normal system // Proc. Cambridge Phil. Soc. — 1932. — V. 28. — P. 455–459.
13. Фишер Р. А. (Fisher R.A.) Statistical methods for research workers. Oliver and Boyd, 1925; 12th ed. 1954. [Рус. пер.: Статистические методы для исследователей. – Москва: Госстатиздат, 1958].
14. Bartlett M. S. On the theory of statistical regression // Proc. Roy. Soc. Edinburgh. — 1933. — V. 53. — P. 260–283.
15. Автоматизация стеганографических приложений / Р. А. Солодуха. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682838 от 28.11.2022.
16. Редукция предикторов на основе оценки их коррелированности / Р. А. Солодуха, Г. В. Перминов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614634 от 17.02.2026.

Солодуха Роман Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, ✉email: standartal@list.ru

Атласов Игорь Викторович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Московский ордена Почета университет МВД России им. В.Я. Кикотя, Москва, ✉email: mathematic1@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 30.01.2026
Принято к публикации 19.03.2026

STEGANALYTICAL FEATURES REDUCTION WITH DEFINITE RELIABLE

R.A. Solodukha¹, I.V. Atlasov²

¹Voronezh State University of Engineering Technologies

²Kikot Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia

¹✉ standartal@list.ru ²✉ mathematic1@rambler.ru

Annotation. A solution to the problem of reducing the set of steganalytic features for determining the payload value in a spatial domain of an image is proposed. The Subtractive Pixel Adjacency Matrix (SPAM) feature vector is used as an example. The hypothesis that some features within a single vector may be correlated is tested. A feature reduction technique is developed that takes into account the accuracy and reliability of the mathematical model, the model implementation algorithm, and the computer program. The theoretical basis is the approximation of first-kind regression by second-kind linear regression for multivariate random variables. To verify the results, a numerical experiment was conducted comparing the regression quality metrics of the proposed and known feature space reduction methods. To ensure the reproducibility of the experiment, the datasets and program code are available on Kaggle. The proposed technique is suitable for applications where accuracy and reliability must be taken into account, for example, in forensic investigations on issues that allow probabilistic inferences. Using these estimates, the analyst can vary the number of features depending on the available computing power and the time frame of the study.

Keywords: steganalysis, feature vector reduction, reliable, SPAM, forensics, regression

REFERENS

1. Zhizhina M.V. Forensic Handwriting Document Expertise. Moscow, JURLITINFORM Publ., 2006, pp. 110–116. (In Russ.).
2. Usov A.I., Gradusova O.B., Kuz'min S.A. The use of probabilistic and statistical methods to test the significance of scientific evidence: comparative analysis of current forensic practices in russia and abroad. Theory and Practice of Forensic Science, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 6–15. (In Russ.).
3. Förster E., Rönz B. Methoden der Korrelations — und Regression sanalyse. Berlin, 1979, 324 p.
4. Pevny T., Bas P., Fridrich J. Steganalysis by Subtractive Pixel Adjacency Matrix // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2010. V. 5(2). P. 215–224.
5. Holub V., Fridrich J. Low Complexity Features for JPEG Steganalysis Using Undecimated DCT // IEEE Transactions on Information Forensics and Security 10(2):219-228. DOI:10.1109/TIFS.2014.2364918
6. Holub V., Fridrich J. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis // IEEE Transactions on Information Forensics and Security 8(12):1996-2006. DOI:10.1109/TIFS.2013.2286682.
7. Fridrich J., Kodovský J. Rich models for steganalysis of digital images // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2011. V. 7(3). P. 868–882.
8. Atlasov I.V., Solodukha R.A. Steganography of Digital Images: Automatization, Optimization and Reliability. Voronezh, Voronezhskij institut MVD Rossii. (In Russ.)

9. Atlasov I., Solodukha R. Reduction of Steganalytical Methods Set with Determined Reliability // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2019. P. 126–131. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947470
10. Solodukha, R.A., Perminov, G.V. and Atlasov, I.V. Reduction of LSB detectors set with definite reliability // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2022, vol. 22, № 1, pp. 74–81. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-1-74-81>(In Russ.)
11. Solodukha R. A., Perminov G. V., Atlasov I. V. Computing Experiment of LSB Detectors Set Reduction with Definite Reliability for 1-to-1 Pattern // 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2022, pp. 30-37, doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974065.
12. Wishart J., Bartlett M.S. The distribution of the second order moment statistics in a normal system // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1932. V. 28. P. 455–459.
13. Fisher R.A. Statistical methods for research workers. Oliver and Boyd. 12th ed., revised. Edinburg, London, Oliver and Boyd, 1954.
14. Bartlett M.S. On the theory of statistical regression // Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 1933. V. 53. P. 260–283.
15. Russia Patent № 2022682838. Avtomatizaciya steganograficheskikh prilozhenii / R.A. Soloduha. (In Russ.).
16. Russia Patent № 2026614634. Predictor reduction based on correlation estimation / R. A. Solodukha, G. V. Perminov. (In Russ.).

Received 30.01.2026
Accepted 19.03.2026

УДК: 519.856

МЕТОД СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Л. Е. Мистров

Центральный филиал Российского государственного университета правосудия
им. В.М. Лебедева

✉ mistrov_le@mail.ru

Аннотация. Предлагается метод распределения ресурса активной и информационной безопасности по критерию минимизации ущерба для обеспечения конфликтной устойчивости жизнедеятельности взаимодействия конкурирующих социально-экономических организаций. Метод основывается на положениях теорий принятия решений, исследования операций, максимина и оптимального распределения ресурса

Ключевые слова: социально-экономическая организация, конфликт, ущерб, критерий, активный ресурс, ресурс индивидуальной и групповой информационной безопасности, эффективность, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях актуальной является задача обеспечения безопасности различного уровня социально-экономических организаций (СЭО) от совокупности деструктивных действий (угроз) со стороны конкурирующих организаций в борьбе за использование находящихся в их сфере ресурсов на основе синтеза систем безопасности (СБ). СБ представляет совокупность функционально объединенных единством цели элементов управления, информационного обеспечения и исполнения с определенными характеристиками и упорядоченными отношениями по управлению, информации и взаимодействию, предназначенную для обеспечения жизнедеятельности СЭО.

В настоящее время методы синтеза СБ базируются в основном на дескриптивном (эмпирическом) подходе, обеспечивающем принятие решений по частным показателям (критериям) оценки конфликтной устойчивости — жизнедеятельности СЭО с заданной (максимальной) эффективностью. Основными методическими подходами синтеза облика СБ традиционно являются проверка «лояльности» сотрудников организации, подборка компетентного руководящего состава и обеспечение активной / физической защиты и / или информационной безопасности (ИБ) СЭО при проведении финансово-экономических операций – совокупности действий для достижения поставленных целей. В их основу положено установление эмпирических зависимостей, связывающих характеристики исследуемого варианта СБ с известным, апробированными на практике ситуациями действий в операциях СЭО на множестве способов и условий их проведения. Это приводит к возникновению объективно-существующего противоречия при синтезе облика СБ, обусловленного следующими основными причинами: а) процесс принятия решений по облику СБ в большей степени базируется на логических рассуждениях ЛПР, не поддающихся формализации (соответственно, оптимизации); б) отсутствуют объективные критерии оценивания состояния СЭО, а также статистический материал, достаточный для построения вероятностных распределений (законов распределения)

результатов при разработке облика СБ; в) задача, в зависимости от уровня функциональной деятельности СЭО (соответственно, и СБ), имеет различную структурную сложность, а ее решение основывается на проведении ее декомпозиции до уровня владения ЛПР соответствующим методическим материалом (как правило, на уровне оценивания одного или нескольких признаков); г) принятие решений по облику СБ сопряжено с принятием решения, учитывающем объективную и субъективные стороны прогнозируемых угроз жизнедеятельности СЭО. Объективная сторона принятия решения определяется совокупностью структурированных ЛПР идентификационных (диагностических) признаков прогнозируемых конкурентных угроз, важностью и взаимосвязями элементов в структуре СЭО. Субъективная же сторона зависит от психологических свойств по отражению конкурентных угроз и элементов СБ в сознании ЛПР, влияющих на результат принятия решения и д) как правило, отсутствует обоснованная свертка частных показателей эффективности на уровне отдельных элементов СБ в интегральный на уровне СЭО. При этом применение СБ, как и защищаемой ею СЭО в различных формах проводимых операций является функцией деструктивных действий конкурирующих организаций (СЭО {В}), трансформированных СЭО в систему исполнительных и защитных действий, методы решения которых являются неоднозначными и иногда противоречивыми. Ее структура, отражающая статические и динамические функциональные свойства СЭО, адаптируется выбором состава и типа элементов активного и / или информационного воздействия в зависимости от степени прогнозируемых угроз. В этой связи актуальной является задача разработки метода структурно-функционального синтеза СБ для обеспечения конфликтной устойчивости применения СЭО в финансово-экономических операциях на основе оптимизации ресурса активного / физического (исполнительных и защитных элементов исходя из предметной области организации – ЭИ, ЭЗ) и информационного (элементов индивидуальной и групповой информационной безопасности – ИРБ, ГРБ) воздействия, нейтрализующего наступательные и защитные действия конкурирующей СЭО. При этом ресурс ГРБ используется для повышения эффективности разноцелевого ИРБ, обеспечивающего защиту наиболее важных элементов СЭО в сравнительно узком диапазоне условий применения.

1. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определяющим элементом синтеза облика СБ является выбор критерия эффективности, вытекающего из функционального анализа протекания основных информационных процессов конфликтного взаимодействия СЭО на основе технико-экономического анализа сопоставления эффекта и затрат для разработки СБ; выявления и оценивания технических, экономических и других составляющих ее эффективности; сопоставимости частного и интегрального при формировании критериев на разных уровнях анализа; сравниваемого качества элементов, а также простоты при вычислении и удобства практического использования вводимого критерия. Основным принципом его обоснования является строгое соответствие цели применения СЭО в операции, которая должна быть достигнута в результате синтеза СБ. Исходя из этого, его обоснование осуществляется на основе: а) анализа системы предпочтений (принципов, модели) ЛПР и б) формирование принципа предпочтительности.

Синтез облика СБ осуществляется в терминах минимизации затрат на ее создание при минимаксном значении показателя эффективности применения СЭО не выше

требуемого, изоморфного условиям их конфликтного взаимодействия, при заданных ограничениях:

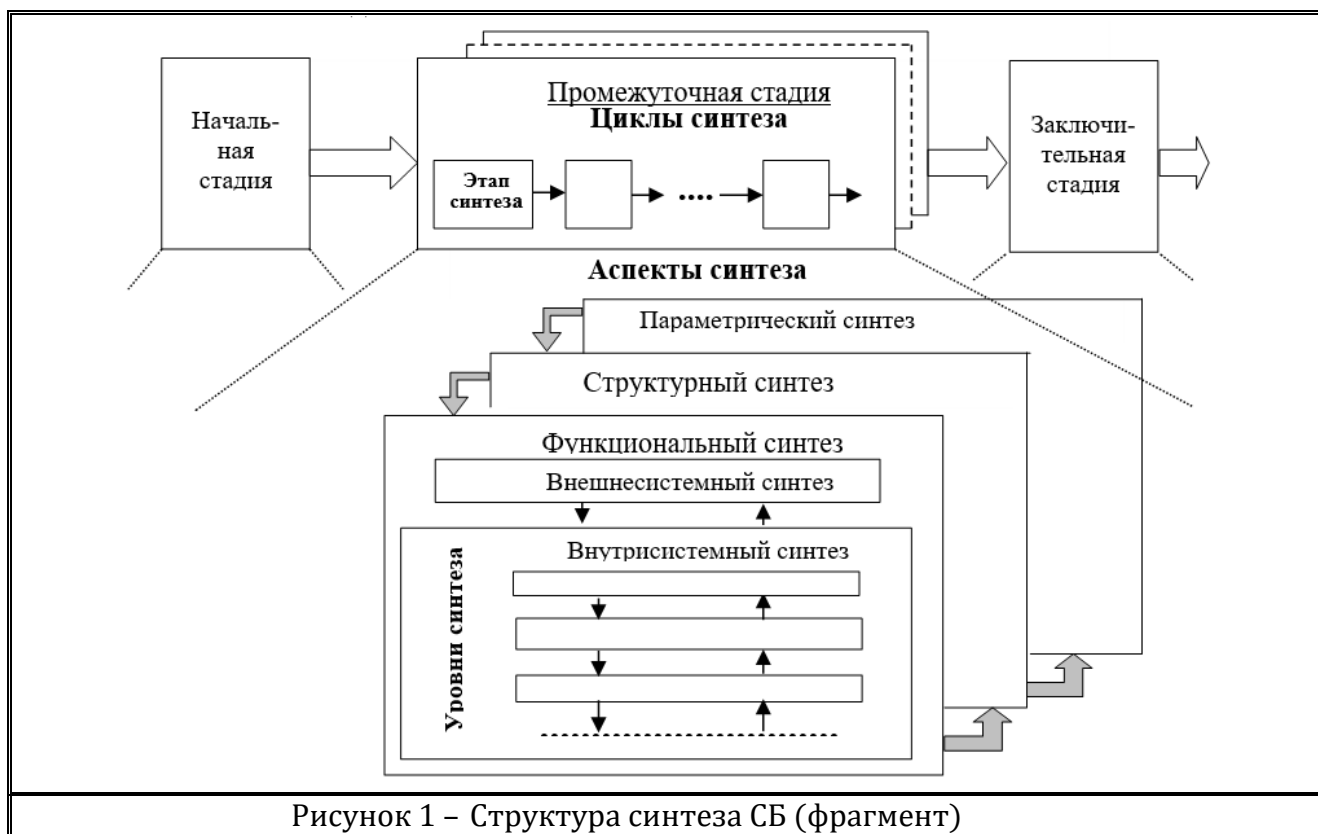
$$X^* = Arg \min_{X \in \{X_\partial\}} C(X), \quad (1)$$

$$\{X_\partial\} = \{X : \min_{X \in \{X_\partial\}} \max_{B \in \{B\}} U(X, B) \leq U_{mp}\},$$

$$\Phi_i[g(X), \mathcal{E}(X), R(X)] \leq \Phi_{i\text{зад}}, \quad i = \overline{1, N},$$

где $C(X)$ – затраты на создание X варианта СБ из подмножества $X_\partial \in \{X_\partial\}$ допустимых вариантов на множестве возможных; $\{B\}$ – множество параметров облика СБ, влияющих на эффективность применения СЭО U ; Φ_i – функционал ограничений (массогабаритных g , энергетических $\mathcal{E}$, пространственно-временных R), которым должен удовлетворять облик СБ; N – число ограничиваемых параметров облика СБ; U_{mp} – требуемое значение эффективности СБ; $\Phi_{i\text{зад}}$ – заданный порог значений i -го функционала ограничений.

Непосредственно решить задачу (1) вследствие её структурной сложности и большой размерности практически невозможно. Основным методом её решения является метод иерархической декомпозиции задачи по взаимообусловленной системе категорий (аспектам, уровням, стадиям и этапам) синтеза [1], позволяющей не только разукрупнить общую задачу на совокупность задач «известной» сложности на множестве типовых условий взаимодействия СЭО в соответствии со структурой синтеза облика СБ на основе установления отношения “целое-часть”, но и реализовать принципы “право вмешательства верхнего уровня” и “зависимость верхнего уровня от нижних уровней”. В соответствии с ним, основные подходы к решению задачи синтеза СБ заключаются в проведении ее декомпозиции, разделении множества варьируемых внешне- и внутрисистемных параметров на два условно независимых подмножества, описывающих конкурирующие СЭО, парирования имеющих место неопределенностей заменой стохастических параметров на их средние, интервальные или экстремальные значения, разработке альтернативных вариантов обликовых параметров, оценки их эффективности и выбор предпочтительного в соответствии с определенным критерием эффективности. Обобщенное представление метода реализации информационного процесса синтеза облика СБ приведено на рис. 1.



Технологически разработка метода синтеза для решения задачи (1) начинается с представления облика СБ в виде иерархической многоуровневой системы, характеризующейся множеством критериев (показателей), варьируемых параметров и многоэкстремальностью частных целевых функций ее элементов, которое дает общее представление об ее иерархичном строении. Глубина же описания, уровни детализации конфигурации облика СБ вытекают из структуры выполняемых СЭО задач и приводится на иерархических уровнях, раскрывающих механизм получения полного представления об ее основных свойствах, полном перечне ее элементов и связей между ними. В основе метода лежит учет функциональных свойств СБ, которые определяются способом интегрального объединения элементов в эффекторные (способные преобразовывать управляющие действия в исполнительные), рецепторные (способные преобразовывать управляющее воздействие в информационные сигналы, передавать и переносить информацию) и рефлексивные (способные воспроизводить внутри себя процессы на информационном уровне) элементы. На основе выявления и установления свойств – выделенных, устойчиво различимых и содержательно интерпретированных признаков элементов СБ, осуществляется установление существенных свойств, подлежащих установлению, изменению и корректировке на основе соответствия или взаимной зависимости их свойств (параметров). Их анализ на этапе функционального синтеза позволяет сформировать иерархическую структуру дерева целей (задач) и их наполнить конкретным составом различного типа и уровня функционально значимыми элементами с установлением их функциональной целостности, обеспечения устойчивого единства и отношений.

Формулируемая задача синтеза СБ, как задача оптимального распределения ресурса сводится к определению качественно-количественного состава ее активных и информационных элементов на множестве вариантов способов применения и основных характеристик СЭО. Задача относится к классу задач многоцелевой многоуровневой оптимизации нелинейных функционалов с экстремальными ограничениями и

взаимозависимыми переменными. Поскольку существует, хотя и сложная, детерминированная монотонная взаимосвязь критериальных функционалов каждого верхнего иерархического уровня СБ с функциями нижних уровней, то в основе подхода к решению такого класса задач допустимо использование принципа последовательного “сужения” множества частных экстремумов от нижних уровней к верхним. Для этого облик СБ представим в виде морфологического описания $X = (X^\phi, X^c, X^n)$ функций X^ϕ , структуры X^c и параметров X^n , то есть совокупности функционального, структурного и параметрического облика СБ. Применительно к условиям синтеза, когда верхний уровень занимает функциональный синтез, а нижний – параметрический синтез, декомпозиция задачи (1) приобретает вид:

а) аспект функционального синтеза

$$\begin{aligned} \{X^*\}^\phi &= \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}^\phi} C(X), \\ \{X_\phi\}^\phi &= \{X^\phi : X^\phi \in X = (X^\phi, \tilde{X}^c, \tilde{X}^n) = \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}} \max_{B^\phi} U(X, B^\phi) \leq U_{mp}, \\ \Phi_j^\phi[g(X), \mathcal{E}(X), R(X)] &\leq \Phi_{j_{\text{зад}}}^\phi, \quad j = \overline{1, M}, \quad B^\phi \subset B; \end{aligned}$$

б) аспект структурного синтеза

$$\begin{aligned} \{X^*\}^c &= \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}^c} C(X), \\ \{X_\phi\}^c &= \{X^c : X^c \in X = (\tilde{X}^\phi, X^c, \tilde{X}^n) = \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}} \max_{B^c} U(X, B^c) \leq U_{mp}, \\ \Phi_k^c[g(X), \mathcal{E}(X), R(X)] &\leq \Phi_{k_{\text{зад}}}^c, \quad k = \overline{1, L}, \quad B^c \subset B; \end{aligned}$$

в) аспект параметрического синтеза

$$\begin{aligned} \{X^*\}^n &= \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}^n} C(X), \\ \{X_\phi\}^n &= \{X^n : X^n \in X = (\tilde{X}^\phi, \tilde{X}^c, X^n) = \text{Arg} \min_{X \in \{X_\phi\}} \max_{B^n} U(X, B^n) \leq U_{mp}, \\ \Phi_l^n[g(X), \mathcal{E}(X), R(X)] &\leq \Phi_{l_{\text{зад}}}^n, \quad l = \overline{1, H}, \quad B^n \subset B \end{aligned}$$

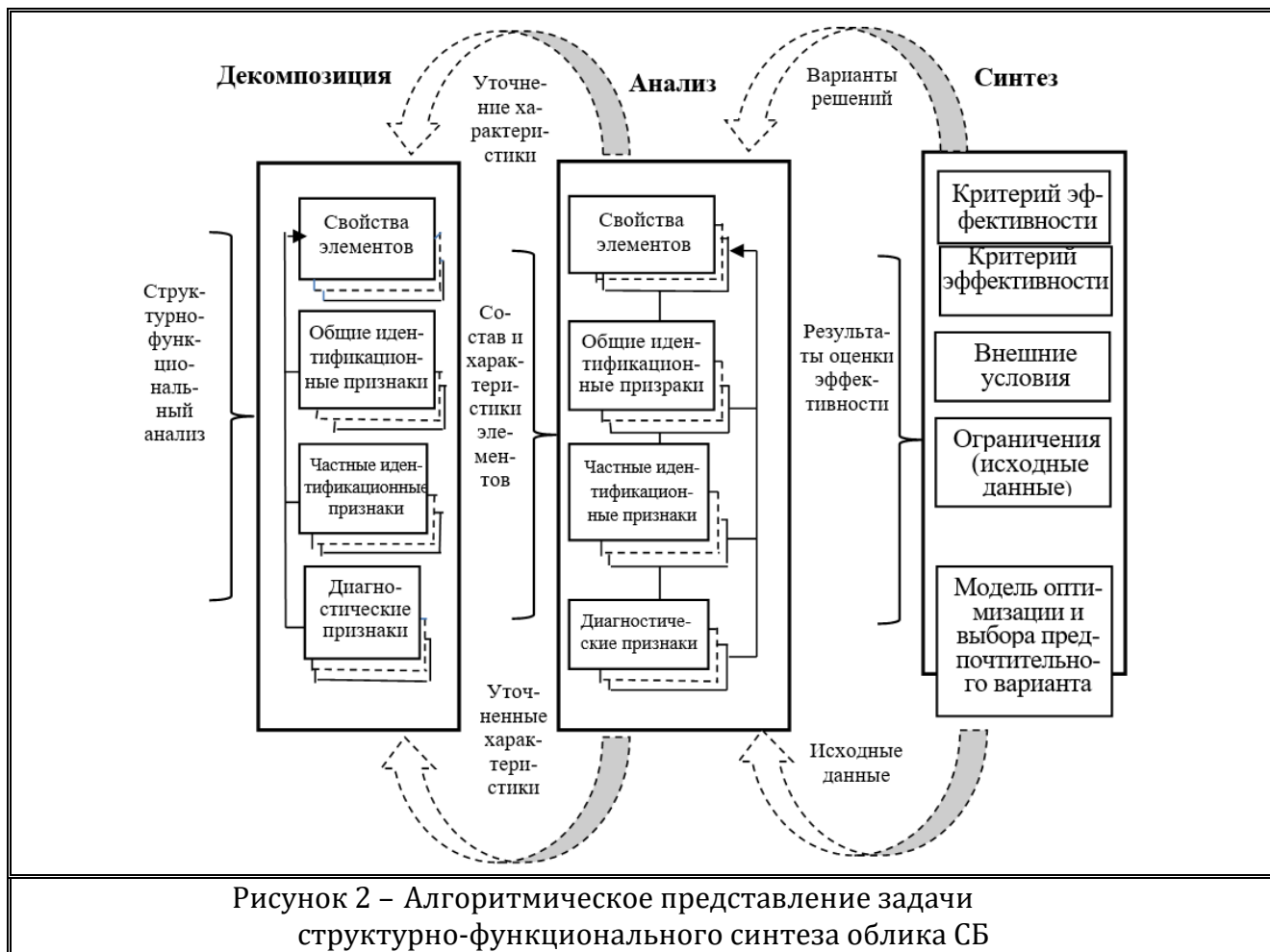
В этих структурированных постановках задачи синтеза СБ используется одна и та же целевая функция $C(X)$, но разные ограничения $(\Phi_j^\phi, \Phi_k^c, \Phi_l^n)$, разные подмножества варьируемых параметров (B^ϕ, B^c, B^n) модели СЭО $\{B\}$ и разные допустимые множества вариантов СБ $(\{X_\phi\}^\phi, \{X_\phi\}^c, \{X_\phi\}^n)$, служащие объединяющим принципом для осуществления синтеза элементов, их отношений и целостных свойств ее облика в едином представлении его структуры. В зависимости от конкретного их сочетания устанавливаются соответствующие иерархические отношения между составными частями синтеза СБ, а также их очередность выполнения. На практике из-за итерационного процесса синтеза ее составные части, переплетаясь и сочетаясь различными способами, образуют многосвязную и подвижную структуру синтеза облика СБ. Это обуславливает необходимость наличия соответствующей гибкой и структурно сложной системы методов синтеза ее облика. Для каждой из составных частей синтеза используются свои принципы и категории, разворачиваемые по времени и глубине представления, модели и методы, позволяющие исследовать каждый элемент i -го уровня СБ в виде элементов управления, информационного обеспечения и исполнения на различных аспектах и уровнях рассмотрения, временных стадиях, циклах и этапах процесса синтеза. Так как решения структурированных задач по аспектам синтеза не совпадают, то есть $\{X^*\}^\phi \neq \{X^*\}^c \neq \{X^*\}^n$, а пересечение этих множеств,

полученных за один цикл синтеза, не содержит оптимальный вариант X^* , то решение задач синтеза по аспектам основывается на предварительном определении промежуточных вариантов $\{\tilde{X}^*\}^\phi, \{\tilde{X}^*\}^c, \{\tilde{X}^*\}^n$. В результате неоднократного циклического перехода от одного аспекта к другому эти решения уточняются, и при получении “устойчивых” множеств $\{X^*\}^\phi, \{X^*\}^c, \{X^*\}^n$ итерационный процесс (цикл) останавливается (он является повторяющимся, законченным и замкнутым процессом, переводящим цель исследований в желаемый результат). При этом можно математически строго показать, что $X^* \in \{X^*\}^\phi \cap \{X^*\}^c \cap \{X^*\}^n$, $\{X_\phi\} = \{X_\phi\}^\phi \cap \{X_\phi\}^c \cap \{X_\phi\}$ [3].

Алгоритмическое представление решения задачи (1) в виде концептуально выделенных по категориям синтеза процессов декомпозиции, анализа и синтеза облика СБ, реализация которых обеспечивает исследование существенных свойств, общих и частных идентификационных и диагностических признаков, а также оценку степени решения задачи (1) на основе анализа множества альтернативных вариантов решения и выбора предпочтительного (рис. 2). В соответствии с ним структура метода представляется в виде итерационного процесса последовательного уточнения облика на основе удовлетворения принципам полноты и непротиворечивости. Каждому уровню представления структуры облика СБ поставлены в однозначное соответствие соответствующие характеристики, обеспечивающие агрегатирование облика по мере возрастания информационного представления о нем. Межуровневая неопределенность показателей эффективности и исходных данных на уровнях исследований парируется введением системы принципов, обеспечивающей вычленение и сужение области допустимых решений. Непротиворечивость системы принципов достигается функциональной полнотой и последовательностью их применения по мере формирования полного представления о слабо предсказуемом облике СБ.

2. РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МЕТОДА

Рассмотрение решения задачи (1) предполагает осуществление перехода от векторных к вещественным аргументам и представление критерия оптимизации $U(S, A^*, B^*)$ облика СБ в виде непрерывной функции аргументов S, A^*, B^* на основе детализации аргументов целевого функционала (1) в виде системы структурно взаимосвязанных элементов различного функционального назначения: S – количество элементов СЭО, эффективность применения которых основывается на применении ЭЗ; a_j – важность j -го элемента СЭО; M – количество ЭЗ, используемых для защиты j -ых элементов СЭО; N – количество ЭИ для деструктивного воздействия на j -е элементы СЭО; p_j – вероятность отражения (снижения эффективности) одним ЭЗ j -го количества действий одного ЭИ на j -ый элемент СЭО в условиях применения ИРБ и ГРБ; r_j – вероятность поражения j -го элемента СЭО одним ЭИ при применении ИРБ и ГРБ.



Это позволяет постановку задачи (1) преобразовать к следующему виду: *требуется* определить оптимальные стратегии поведения (действий) СБ по оптимизации имеющегося ресурса $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_S^*)$, $\sum_{j=1}^S x_j^* = M$ ЭЗ, ИРБ и ГРБ СЭО $\{A\}$ и

$Y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_S^*)$, $\sum_{j=1}^S y_j^* = N$ ЭИ СЭО $\{B\}$ по $j=1, \dots, S$ элементам, соответствующим конфликтно-устойчивым (равновесным) стратегиям взаимодействия СЭО, отклонение от которых невыгодно ни одной из сторон.

В этом случае целевая функция задачи приобретает вид:

$$U(X, Y) = \min_{x_j \in X} \max_{y_j \in Y} \sum_{j=1}^S U_j(x_j, y_j), \quad (2)$$

в частности [4],

$$U(X, Y) = \min_{x_j \in X} \max_{y_j \in Y} \sum_{j=1}^S a_j \left(1 - (1 - q_j^{E_j+1} \cdot r_j)^{c_j} \cdot (1 - q_j^{E_j} \cdot r_j)^{y_j - c_j} \right), \quad (3)$$

где $U(X, Y)$ – математическое ожидание (МО) наносимого ущерба объектам СЭО $\{A\}$ в результате деструктивного воздействия ЭИ $\{B\}$ при выбранных стратегиях X и Y (при этом X и Y представляют векторные аргументы); $U_j(x_j, y_j)$ – МО ущерба, наносимого j -му элементу $\{A\}$ в результате деструктивного воздействия ЭИ $\{B\}$ при стратегиях X, Y ;

x_j – количество выделенных однотипных ЭЗ $\{A\}$ для защиты j -го элемента; y_j – количество выделенных однотипных ЭИ $\{B\}$ для воздействия на j -й элемент; $q_j = 1 - p_j$ – вероятность преодоления одним ЭИ зоны ответственности одного ЭЗ j -го элемента; $E_j = \text{floor}(x_j / y_j)$ – целая часть от деления x_j / y_j , если $y_j = 0$, то $U_j(x_j, y_j) = 0$; $c_j = \text{mod}(x_j / y_j) = x_j - y_j \cdot E_j$ – остаток от деления x_j / y_j ; $q_j^{E_j+1}$ – вероятность достижения c_j ЭИ $\{B\}$ j -го элемента СЭО $\{A\}$; $q_j^{E_j}$ – вероятность достижения $(y_j - c_j)$ ЭИ $\{B\}$ j -го элемента СЭО $\{A\}$; $(1 - q_j^{E_j+1} \cdot r_j)^{c_j}$ – вероятность сохранения j -го элемента СЭО при применении ЭЗ, ИРБ и ГРБ в результате воздействия c_j ЭИ $\{B\}$; $1 - (1 - q_j^{E_j+1} \cdot r_j)^{c_j} \cdot (1 - q_j^{E_j} \cdot r_j)^{y_j - c_j}$ – вероятность поражения j -го элемента СЭО $\{A\}$ при выделении для защиты x_j количества ЭЗ и y_j распределенных на него ЭИ $\{B\}$; $(1 - q_j^{E_j} \cdot r_j)^{y_j - c_j}$ – вероятность сохранения j -го элемента СЭО $\{A\}$ в результате воздействия $(y_j - c_j)$ ЭИ $\{B\}$ в условиях применения для его защиты ЭЗ, ИРБ и ГРБ.

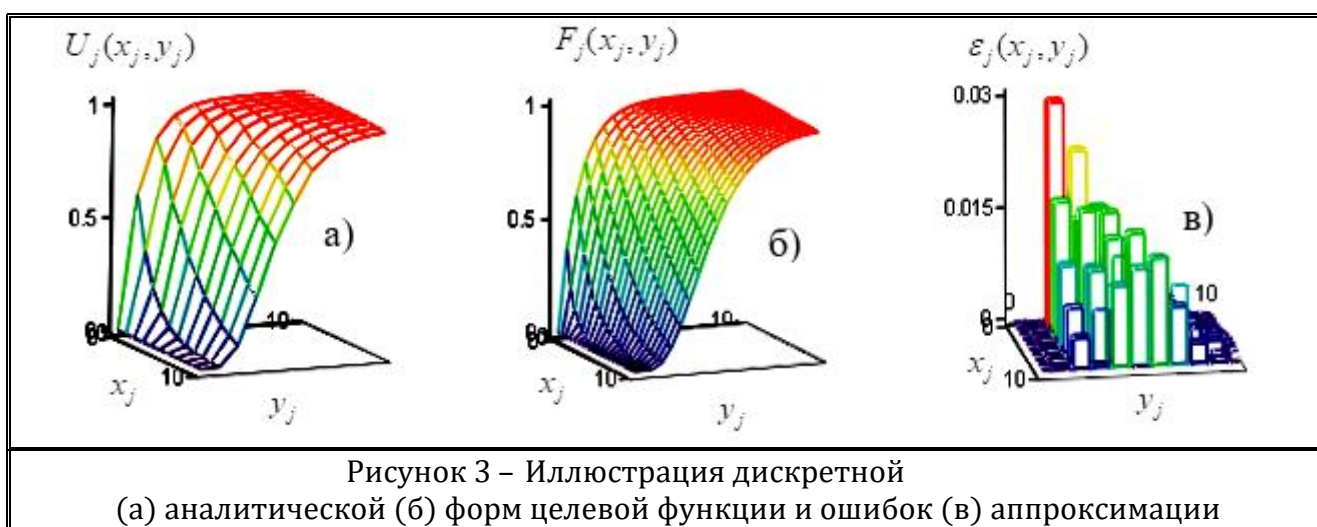
Анализ аргументов $U_j(x_j, y_j)$ целевой функции $U(X, Y)$

$$U_j(x_j, y_j) = a_j \left(1 - (1 - q_j^{E_j+1} \cdot r_j)^{c_j} \cdot (1 - q_j^{E_j} \cdot r_j)^{y_j - c_j} \right) \quad (4)$$

показывает (см. рис. 3а), что во всей области определения аргументов x_j, y_j дискретная функция $U_j(x_j, y_j)$ может быть аппроксимирована непрерывной поверхностью $F_j(x_j, y_j)$ для заданных параметров: $p_j = 0,4$; $r_j = 0,6$; $a_j = 1$; $x_j = [0, 10]$, $y_j = [0, 10]$ (см. рис. 3б) в виде

$$F_j(x_j, y_j) = a_j \left(1 - (1 - q_j^{\frac{x_j}{y_j}} \cdot r_j)^{y_j} \right); \quad F_j(x_j, 0) = 0, \quad (5)$$

с погрешностью $\varepsilon_j(x_j, y_j) = U_j(x_j, y_j) - F_j(x_j, y_j)$, не превышающей нескольких процентов (см. рис. 3в). При этом переменные x_j, y_j принимают вещественные значения на отрезках $x_j = [0, M]$, $y_j = [0, M]$, что позволяет интерпретировать их как непрерывные ресурсы СЭО, соответственно.



Возможна квазинепрерывная аппроксимация целевой функции в виде:

$$H_j(x_j, y_j) = a_j \left(1 - (1 - q_j^{E_j+1} \cdot r_j)^{c(x_j, y_j)} \cdot (1 - q_j^{E_j} \cdot r_j)^{y_j - c(x_j, y_j)} \right) \quad (6)$$

при непрерывных x_j и y_j , величина $c_j(x_j, y_j)$ также непрерывна.

Функция $H_j(x_j, y_j)$ не дифференцируема и непригодна для аналитического поиска экстремумов стратегий поведения СЭО, однако ее значения точно совпадают с исходной функцией эффективности $U_j(x_j, y_j)$ при целочисленности значений аргументов x_j и y_j .

Рассмотрим решение задачи применительно к непрерывной функции (4), выделив в структуре СЭО произвольную пару элементов с условными номерами 1 и 2. Тогда МО ущерба $F(X, Y)$, нанесённого СЭО $\{A\}$, будет определяться исходя из ущербов $F_1(x_1, y_1)$ и $F_2(x_2, y_2)$ каждого элемента:

$$F(X, Y) = F_1(x_1, y_1) + F_2(x_2, y_2), \quad X = [x_1 \ x_2]^T; \quad Y = [y_1 \ y_2]^T; \quad (7)$$

или с учётом условия $x_2 = M - x_1$, $y_2 = N - y_1$:

$$F(X, Y) = F(x_1, y_1) = a_1 \left(1 - (1 - q_1^{y_1} \cdot r_1)^{x_1} \right) + a_2 \left(1 - (1 - q_2^{N-y_1} \cdot r_2)^{M-x_1} \right) \quad F(X, 0) = 0. \quad (8)$$

Графическая иллюстрация компонент целевой функции и её общего вида с отмеченной точкой конфликтно-устойчивой (равновероятной) эффективности с координатами $x_1^* = 5,905$; $y_1^* = 5,901$ для параметров: $p_j = 0,4$; $r_j = 0,3$; $a_1 = 1$; $a_2 = 0,7$; $x_j = [0, 10]$, $y_j = [0, 10]$, $j = 1, 2$ приведена на рис. 4 в виде: а) МО потерь $H_1(x_1, y_1)$ и $H_2(M - x_1, N - y_1)$ отдельно каждого элемента; б) суммарной функции потерь $H_1(x_1, y_1)$, а также в) линии равного уровня функции $H_1(x_1, y_1)$ (для наглядности использовался квазинепрерывной вариант (7) её составляющих).

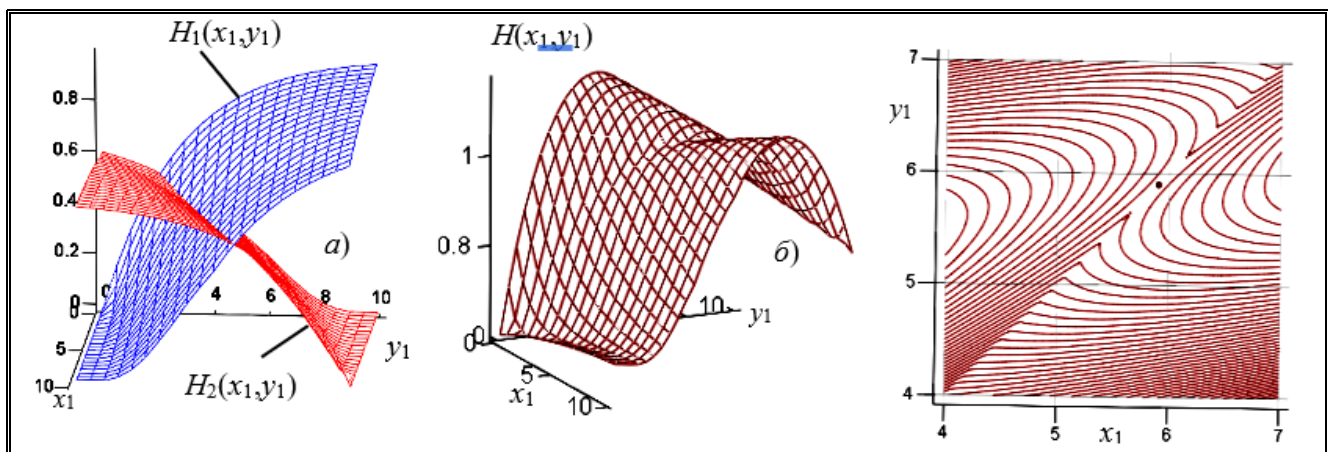


Рисунок 4 – Иллюстрация существования точки конфликтно-устойчивого равновесия взаимодействия СЭО

Поскольку результаты взаимодействия СЭО ищутся в чистых стратегиях X и Y , то седловая точка игры, определяемая как

$$F(X^*, Y) \leq F(X^*, Y^*) \leq F(X, Y^*), \quad (9)$$

в общем случае не существует [5], что подтверждается приведенными на рис. 4 результатами. Однако если условие устойчивого взаимодействия СЭО сформулировать в более общем, по сравнению с (9), виде:

$$\min_{x_1} F(X, Y) \leq F(X^*, Y^*) \leq \max_{y_1} F(X, Y) ; ; \nabla F(X^*, Y^*) = 0, \quad (10)$$

предполагающем выбор стратегии поведения каждой СЭО – отклонения стратегии конкурирующей стороны от стационарной точки с координатами X^* или Y^* , при котором отклонившаяся ее СЭО всегда окажется в проигрыше, то такие стратегии становятся невыгодными ни для одной из сторон. То есть, при стратегиях X^* , Y^* игра становится устойчивой в точке X^*, Y^* .

Анализ приведенных на рис. 4 результатов показывает, что переход от дискретной к непрерывной постановке задачи позволяет определить условия конфликтной устойчивой жизнедеятельности СЭО $\{A\}$ не в точке минимаксного значения целевой функции (верхней цены игры) в условиях априорной информированности СЭО $\{B\}$, а в виде седловой точки в предположении взаимной априорной информированности о действиях сторон.

Переход от дискретной минимаксной задачи к непрерывной задаче (10) позволяет определить необходимые условия (точку) существования решения X^* и Y^* :

$$\left. \frac{dF(x_1, y_1)}{dx_1} \right|_{x_1 = x_1^*} = 0, \left. \frac{dF(x_1, y_1)}{dy_1} \right|_{y_1 = y_1^*} = 0, 0 \leq x_1 \leq M, 0 \leq y_1 \leq N \quad (11)$$

После нахождения нескольких стационарных точек (11) осуществляется проверка условия (10) для каждой из них. Очевидно, что условие (11) справедливо только для дифференцируемых функций – функция (5) $F(X, Y)$ отвечает этому требованию.

Результаты применения условия (11) к $F(X, Y)$ с параметрами $p=0,4$; $r_j=0,3$; $a_1=1$; $a_2=0,7$; $M=10$; $N=10$, позволяют определить оптимальное решение: $X^*=[5,905 \ 10-5,905]^T$ и $Y^*=[5,901 \ 10-5,901]^T$, т.е. для СЭО $\{B\}$ лучшей стратегией является назначение 59,01% ресурсов ИЭ на элемент 1 и 40,99% на элемент 2, а для СБ – 59,05% ресурса ЭЗ, ИРБ и ГРБ следует назначить на элемент 1 (элемент 1 более важен, чем элемент 2), а 40,95% на элемент 2 (решение отмечено точкой на рис. 4в). При этом МО потерь СЭО составит $H(5,905; 5,901)=1,08$ при суммарной ценности элементов $a_1 + a_2 = 1,7$. Отклонения от оптимального стратегии СЭО $\{A\}$: $H(7; 5,901)=1,099 > 1,08$; $H(5; 5,901)=1,096 > 1,08$ приводит к увеличению потерь, что невыгодно для СЭО $\{A\}$ даже при неизменяемой стратегии СЭО $\{B\}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод решения задачи структурно-функционального синтеза облика СБ, являющегося многопараметрической функцией распределения активного и информационного ресурса в предметной области СЭО, позволяет представить слабоструктурированную задачу в виде временно-детального процесса исследований на основе системных принципов и категорий синтеза; формализовать постановку задачи синтеза и разработать математический метод её решения для обоснования состава и типа различного уровня функциональной значимости элементов СБ и точек конфликтной устойчивой жизнедеятельности СЭО на множестве условий их конкурентного взаимодействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мистров Л.Е. Метод обоснования комплексных стратегий оптимизации ресурса информационной безопасности социально-экономических организаций // Нелинейный мир. – 2019. – №4. – С. 56-70.
2. Кузнецов В.В., Шатраков А.Ю., Асланов М.А., Мальчевский А.А., Макаров Ю.Н. Системный анализ и принятие решений в деятельности учреждений реального сектора экономики, связи и транспорта. – М.: Экономика, 2010.
3. Мистров Л.Е., Сербулов Ю.С. Методологические основы синтеза информационно-обеспечивающих функциональных организационно-технических систем. – Воронеж: Научная книга, 2007. – 232 с.
4. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и теория игр. – М.: Радио и связь, 1983. – 216 с.
5. Нейман Дж. фон, Моргенштейн О. Теория игр и экономическое поведение. – Москва: Наука, 1970. – 708 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Мистров Леонид Евгеньевич — д-р техн. наук, профессор, Центральный филиал Российского государственного университета правосудия им. В.М. Лебедева, г. Воронеж
✉ e-mail: mistrov_le@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.12.2025

После доработки 05.02.2026

Принята к публикации 19.03.2026

System modeling critical application

№ 1 / 2026

METHOD OF STRUCTURAL-FUNCTIONAL SYNTHESIS OF SECURITY SYSTEMS OF SOCIAL AND ECONOMIC ORGANIZATIONS

L.E. Mistrov

Central Branch of the Russian State University of Justice named after V.M. Lebedev

✉ mistrov_le@mail.ru

Abstract. A method for distributing active and information security resources based on damage minimization criteria is proposed to ensure conflict resilience in the interactions of competing socioeconomic organizations. The method is based on the principles of decision theory, operations research, maximin, and optimal resource allocation.

Keywords: socio-economic organization, conflict, damage, criterion, active resource, resource of individual and group information security, efficiency, modeling

REFERENS

1. Mistrov L.E. Metod obosnovaniya kompleksnykh strategij optimizacii resursa informacionnoj bezopasnosti socialno-ekonomicheskix organizacij // Nelinejnyj mir. – 2019. – №4. – S. 56-70.
2. Kuzneczov V.V., Shatrakov A.Yu., Aslanov M.A., Malchevskij A.A., Makarov Yu.N. Sistemnyj analiz i prinyatie reshenij v deyatel'nosti uchrezhdenij real'nogo sektora ekonomiki, svyazi i transporta. – М.: Ekonomika, 2010.

3. Mistrov L.E., Serbulov Yu.S. Metodologicheskie osnovy sinteza informacionno-obespechivayushhix funkcionalnykh organizacionno-texnicheskix sistem. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2007. – 232 s.
4. Berzin E.A. Optimalnoe raspredelenie resursov i teoriya igr. – M.: Radio i svyaz, 1983. – 216 s.
5. Nejman Dzh. fon, Morgenshtejn O. Teoriya igr i ekonomicheskoe povedenie. – Moskva: Nauka, 1970. – 708 s.

Received 19.12.2025

Revised 05.02.2026

Accepted 19.03.2026

УДК: 004.832.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ АНКЕТНЫХ ДАННЫХ

К. М. Холостов

Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Ордена Трудового Красного Знамени Академия управления Министерства внутренних дел Российской Федерации»

¹✉ hkm_tula@mail.ru

Аннотация. Применение методов нечеткой логики при обработке результатов анкетирования позволяет получить выводы, выходящие за пределы «прямых» результатов. При этом, характер извлечения значимой информации из анкет имеет несколько иной вид, что позволяет более глубоко, а в определенных случаях, и более точно обрабатывать полученные в ходе исследований результаты. Применение методов математической статистики, аналитических и численных методов оценки не полностью раскрывают потенциал социологического или иного исследования, то есть не в полной мере используют полученный эмпирический материал. Анкетирование и интервьюирование, как процесс сбора сведений о различных явлениях и процессах, применительно к деятельности организационной системы, позволяет кроме оценок, предложений и иных явных результатов, извлекать знания о тенденциях, групповых устремлениях или даже заблуждениях, присутствующих в коллективе. Это может стать возможным при применении соответствующих методов обработки и анализа данных. Такие методы, наряду с качественными оценками по различным вопросам деятельности организации, позволяют получить и количественные, ранговые или сопоставительные оценки по вопросам организационного и обеспечивающего характера. Предлагаемый метод и алгоритм на основе нечеткой логики и мягких вычислений позволяет выделять больше значимой информации из результатов анкетирования, что позволяет руководителю принимать взвешенные и эффективные решения в направлении совершенствования деятельности организационной системы.

Ключевые слова: нечеткая логика, мягкие вычисления, организационные системы, анкетирование, лингвистические переменные, метод обработки данных

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия развития в Российской Федерации информационного общества характеризуются внедрением цифровых решений, созданием развитой информационно-коммуникационной инфраструктуры, а также целенаправленным переходом на свободное или отечественное программное обеспечение. Использование информационных технологий для сбора, хранения, обработки, передачи и представления данных различной природы стало неотъемлемой частью успешной деятельности органов внутренних дел (далее – ОВД). За счет автоматизации большого числа производственных процессов сотрудники высвобождаются от выполнения рутинных, трудоемких операций и могут значительное время выделить для выполнения аналитической работы, планирования деятельности, а также саморазвитию и совершенствованию собственной деятельности. В качестве основных направлений информатизации МВД России можно выделить:

- создание единого информационного пространства на базе ведомственных информационных ресурсов, надежное управление им и обеспечения удаленного доступа к нему на основе клиент-серверных технологий;
- разработку приложений (программных средств и комплексов) для решения прикладных задач различного характера;
- дальнейшее развитие телекоммуникационной инфраструктуры и транспортных сетей.
- обеспечение внутриведомственного и межведомственного информационного взаимодействия.

Однако разработка новых программных средств требует предварительной проработки технических заданий на создание программных продуктов (приложений), базирующихся на научно обоснованных методах, моделях и алгоритмах решения прикладных задач.

1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Задача принятия решения является наиболее сложной в деятельности руководителя любой организационной системы вне зависимости от сферы деятельности или уровня руководства. Проведение различного рода опросов, интервьюирование и анкетирование становится востребованным инструментом и одним из наиболее распространенных методов сбора данных в социологических, маркетинговых, психологических и других исследованиях. Классические методы обработки и анализа анкетных данных не всегда способны дать требуемый результат. Методы, основанные на формальной логике и математической статистике, не вполне адекватно отражают реальную ситуацию по различным причинам, в том числе из-за субъективизма респондентов, присущей человеческим суждениям и оценкам неопределенности, неточности и расплывчатости.

Один из ключевых этапов анкетных исследований – анализ и интерпретация полученных от респондентов ответов – часто осложняется из-за субъективного, неоднозначного и неформализованного характера полученной информации, что может привести к утрате искомых выводов. Эффективным инструментом преодоления размытости и неопределенности в суждениях является применение методов нечеткой логики [4, 9]. Они позволяют использовать размытые категории, агрегировать субъективные оценки и формализовать качественные суждения в форме нечётких множеств и нечётких правил. В случае применения при оценке результатов анкетирования специально разрабатываемых шкал на основе субъективного мнения экспертов, использовании оценочных суждения по задаваемым вопросам, такой подход дает наилучший результат.

Применение нечётких методов логики характерно и эффективно для решения следующих задач:

- формирование обобщённых (интегральных) результатов на основе множества нечётких данных, в том числе имеющих разнородную структуру;
- разделение оцениваемых показателей (объектов) по группам со схожими, но не обязательно четко выраженными характеристиками;
- проведение динамического моделирование возможного поведения агентов, с получением нескольких вариантов развития ситуации, на основе выявления нечетких тенденций;
- определению приоритетных направлений деятельности организации, при нечетком оценивании мотивации и целевых установок агентов;

- осуществлять количественную интерпретацию субъективных и трудно формализуемых оценок, полученных при анкетировании.

Применительно к исследованиям с использованием анкетирования, обработка результатов опросов с применением нечетких методов позволяет дополнительно решить следующие задачи, способствующие принятию верного решения:

1. Кластеризация участников исследуемой группы.
2. Формирование обобщенных показателей и оценок.
3. Формирование выводов на основе нечётких данных.
4. Прогнозирование поведения участников группы.
5. Оценка подготовленности участников группы к решению отдельных задач.

Ниже остановимся на предлагаемом методе и алгоритме обработки данных анкетирования нечеткими методами.

Так как получаемые результаты анкетирования зачастую носят качественный характер и не могут быть непосредственно применены для реализации математически методов расчетов, анализа и оценивания, то есть не подходят для непосредственной количественной обработки, то необходимо привести их к виду, позволяющему перейти от описательных форм к их количественной интерпретации. В результате преобразования исходных данных с помощью известного аппарата нечеткой логики [1, 9] появляется возможность оперировать числовыми значениями таких ответов респондентов как «хороший», «средний», «плохой» или оценками по шкале Лайкерта [6] от значения «Полностью согласен» до значения «Полностью не согласен» или открытыми лингвистическими суждениями. Перевод лингвистических переменных β на множестве A_u в числовые значения осуществляется при помощи функции принадлежности μ_{A_u} , показывающей значение вероятности, с которой элементы некоторого множества A принадлежат заданному нечеткому подмножеству A_u .

Функции принадлежности могут иметь различный вид, их выбор в качестве инструмента для преобразования лингвистических переменных [2, 3] зависит от характера данных и предпочтений авторов методик оценки. В качестве примера рассмотрим применение для обработки анкетных данных треугольные и трапециевидные функции, вследствие простоты и доступности понимания их свойств.

Так, треугольная функция определяется тремя точками – левой, вершиной и правой. Например, для показателя «низкого» уровня на шкале 0 – 100 это может быть интервал $[0, 15, 30]$, где значение 15 соответствует полной принадлежности к множеству A_u и $\mu_{A_u} = 1$, а точки 0 и 30 – нулевую принадлежность к множеству A_u , то есть $\mu_{A_u} = 0$.

Трапециевидная функция определяется четырьмя точками – левой, левым плечом, правым плечом и правой. Подходит для диапазонов с плоской зоной полной принадлежности, например, показатель «средний» может быть определен на участке $\{20, 40, 60, 80\}$. В этом случае полная принадлежность к множеству соответствует диапазону $\{40, 60\}$.

Чем больше аргумент функции принадлежности μ_{A_u} соответствует нечеткому множеству A_u , тем большее значение приобретает функция принадлежности μ_{A_u} вплоть до 1.

Например, для определения степени принадлежности обрабатываемых данных к категориям – «низкий», «умеренно низкий», «мало низкий», «средний», «мало высокий»,

«умеренно высокий», «высокий» предлагается следующий метод классификации результатов использованием методы нечеткой логики.

Функция принадлежности μ_{A_1} , соответствующая первому нечеткому множеству A_1 и принимает следующие значения (формула (1)):

$$\mu_{A_1}(\varepsilon, a_1, a_2) = \begin{cases} 1, \varepsilon \leq a_1, \\ \frac{a_2 - \varepsilon}{a_2 - a_1}, a_1 < \varepsilon < a_2, \\ 0, \varepsilon \geq a_2, \end{cases} \quad (1)$$

где a_1 – значение показателя ответов, соответствующее терму {критически низкий};
 a_2 – значение показателя ответов, соответствующее терму {низкий}.

Функция принадлежности μ_{A_9} , соответствующая последнему нечеткому множеству A_9 принимает следующие значения (формула (2)):

$$\mu_{A_9}(\varepsilon, a_8, a_9) = \begin{cases} 0, \varepsilon \leq a_8, \\ \frac{\varepsilon - a_8}{a_9 - a_8}, a_8 < \varepsilon < a_9, \\ 1, \varepsilon \geq a_9, \end{cases} \quad (2)$$

где a_8 – значение показателя ответов, соответствующее терму {высокий};
 a_9 – значение показателя ответов, соответствующее терму {критически высокий}.

Для всех промежуточных нечетких множеств, начиная с A_2 и до A_8 включительно, значение показателя ответов, соответствующих термам {низкий}, {умеренно низкий}, {мало низкий}, {средний}, {мало высокий}, {умеренно высокий} и {высокий}, функция принадлежности μ_{A_u} будет иметь треугольную форму и представляться следующим образом (формула (3)):

$$\mu_{A_u}(\varepsilon, a_{(u-1)}, a_u, a_{(u+1)}) = \begin{cases} 0, \varepsilon \leq a_{(u-1)}, \\ \frac{\varepsilon - a_{(u-1)}}{a_u - a_{(u-1)}}, a_{(u-1)} < \varepsilon < a_u, \\ \frac{a_{(u+1)} - \varepsilon}{a_{(u+1)} - a_u}, a_u < \varepsilon < a_{(u+1)}, \\ 0, \varepsilon \geq a_{(u+1)}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, представленный метод позволяет преобразовать любой ответ респондента в определенное значение лингвистической переменной, а затем оценить его с помощью значительно большего числа критериев чем те, которые можно использовать при прямой интерпретации данных анкетирования. Представленный метод обработки результатов анкетирования сходен с принципами рассуждений, характерных для человеческого мышления [7], поэтому он позволяет выяснить, обладает ли оцениваемый критерий определенным свойством в полной мере или только частично, в связи с тем, что свойство представлено в ответах нечетко.

Реализуя алгоритм нечеткого оценивания, определяем необходимое число термов в нечетком множестве, а каждому из них указываем соответствие некоторого значения показателя ответа. В результате производится преобразование показателей в

их нечеткие значения (см. рис. 1), к которым можно применять методы мягких вычислений.

Методы нечёткой логики и мягких вычислений позволяют работать с расплывчатыми понятиями и приблизительными оценками. Можно выделить следующие ключевые преимущества применения нечёткой логики при обработке данных, полученных при анкетировании:

1. Использование неопределенности и неточности при оценке. Строгие границы между категориями (множествами) заменяют на плавные переходы, что позволяет более точно оценивать категории, когда респонденты не могут дать однозначный ответ или их мнение является неточным.

2. Гибкость в настройках системы оценивания. Нечёткое оценивание и автоматизированные системы на его основе могут быть настроены с учетом имеющихся экспертных знаний в предметной области, что повышает релевантность, гибкость и точность анализа.

3. Повышение интерпретируемости результатов. Результаты опросов, обработанные и проанализированные с помощью методов нечёткой логики, могут быть представлены в понятной для аналитика лингвистической форме.

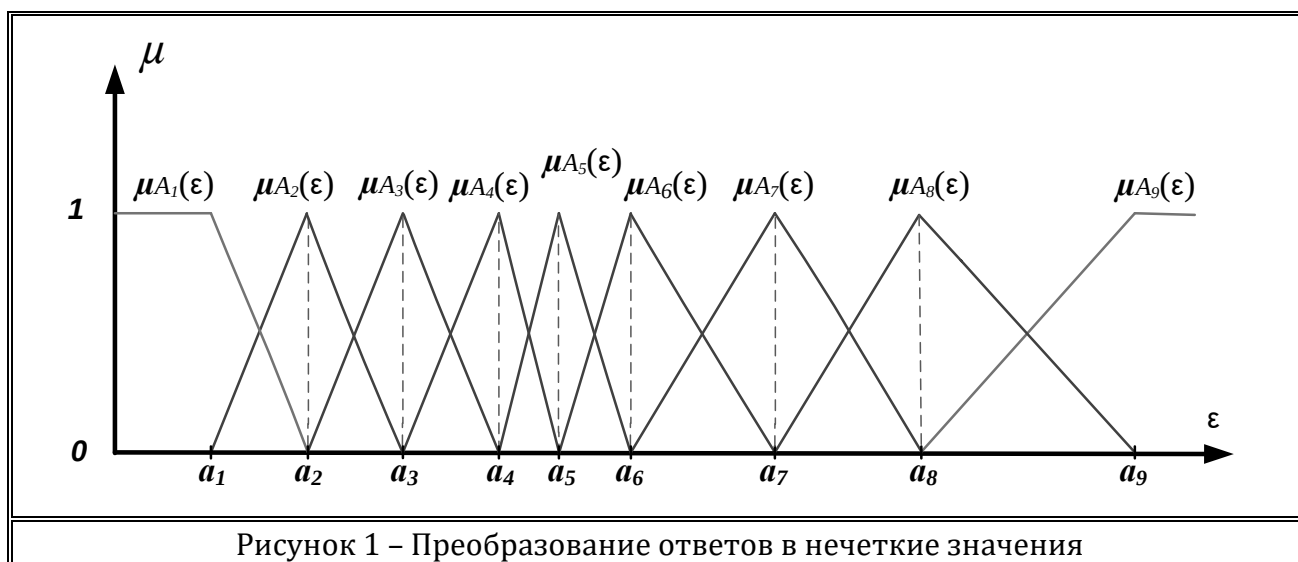


Рисунок 1 – Преобразование ответов в нечеткие значения

Алгоритм обработки данных анкетирования нечёткой методами (см. рис. 2) можно разбить на следующие основные этапы:

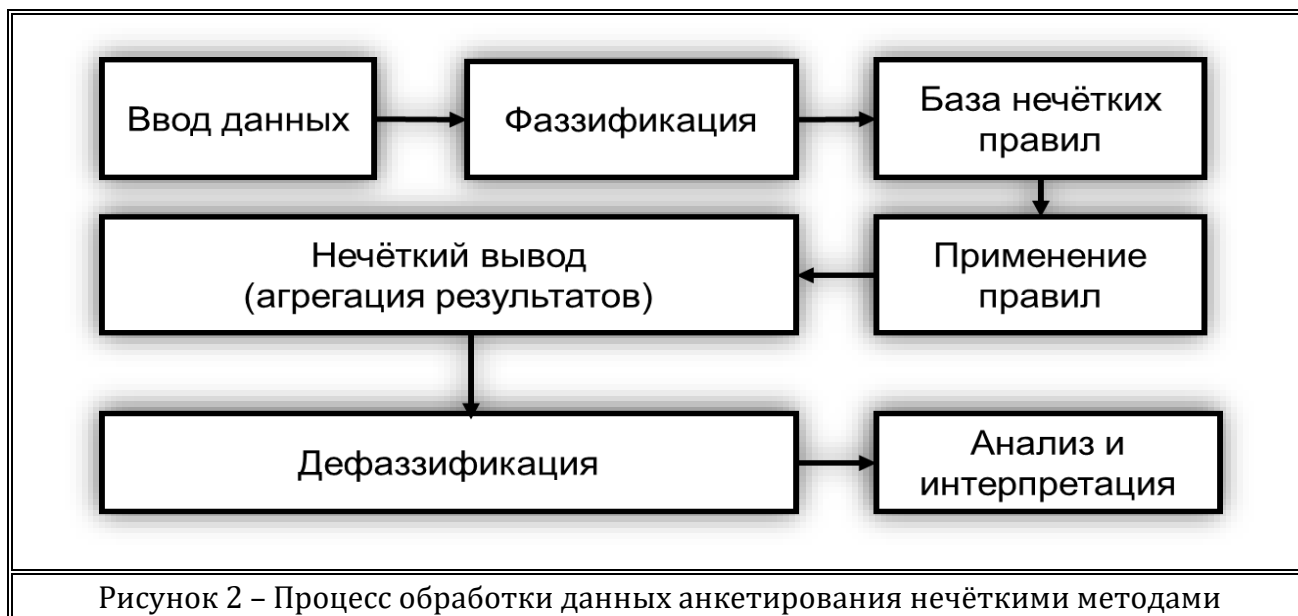
1. На первом (начальном) этапе проводится фаззификация данных, то есть производится преобразование качественных сведений из анкет в данные нечётких множеств. Для каждой лингвистической переменной определяются терм-множества (например, «большой», «средний», «маленький») и соответствующие им функции принадлежности. Функция принадлежности μ_{A_i} , принимая значение в диапазоне 0 до 1, будет определять степень, с которой соответствующее значение лингвистической переменной принадлежит тому или иному терму нечёткого множества.

2. На втором этапе проводится разработка нечётких правил вида: «Если [условие 1 и(или) условие 2 ...], то [заключение 1, заключение 2 ...]». Эти правила формируются на основе оценок экспертов или иным приемлемым способом.

3. Третий этап – применение нечетких правил (нечёткий вывод). Возможно агрегирование нескольких условий в правилах (с использованием нечётких логических операций И/ИЛИ) и определение степени истинности каждого правила. Если несколько правил приводят к одному и тому же заключению (выходному показателю), то их

результаты объединяются. Это позволяет получить итоговое нечёткое множество для каждого выходного показателя.

4. Четвертый (финальный) этап — дефаззификация. Поскольку для формулирования выводов, производства расчетов и принятия решений зачастую применяют количественные (четкие) значения, на заключительном этапе нечёткий результат преобразуется обратно в чёткое значение. Существуют различные методы дефаззификации, такие как метод центрирования масс, метод центра площади, метод среднего максимума и др. Выбор метода зависит от характера полученных данных и специфики решаемой задачи.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные метод и алгоритм на основе нечёткой логики и мягких вычислений предоставляют теоретическую базу для создания программных (приложение) или программно-технических средств (комплексов) предназначенных для глубокой и точной оценки результатов различного вида опросов, анкетирования и интервьюирования. Они позволяют преодолеть существенные недостатки традиционных методов оценивания и получить более точное, развернутое мнение относительно исследуемых проблем и явлений. С учетом сложности современных геополитических, социально-экономических процессов необходимость принимать к сведению при принятии решения все нюансы, которые содержатся в результатах опросов, применение методов нечёткой логики к обработке результатов опросов, будет постоянно возрастать.

Следует отметить, что применение предлагаемых методов накладывает и определенные ограничения в способах и методах, выбираемых для опросов. Так, дополнительно потребуется более тщательное отношение к определению искомых параметров и способам интерпретации результатов, при этом потенциальные повышения информативности, точности и релевантности анализа делают их применение востребованным.

В заключение можно констатировать, что в статье представлен перспективный метод формирования и обработки данных анкетирования, проводимого в социально-экономических системах различного типа, в том числе в органах внутренних дел с целью совершенствования их деятельности [1, 5, 8]. Данный метод способен обеспечить

поддержку принятия решений в целях обеспечения безопасности, эффективности функционирования систем критического применения различного назначения, а представленные подходы могут быть применены в широком круге исследований, для которых применяется инструментарий социологических или психологических опросов, а также иных научных и прикладных исследований, проводимых на основе сбора субъективных оценок от экспертов, являющихся специалистами в конкретных предметных областях, но при этом склонными к неточным и размытым суждениям по задаваемым вопросам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жидков В. Н. Мягкие вычисления в интегрированных системах летательных аппаратов. – М. : Изд-во МАИ, 2013. – 388 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
3. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М. : Энергоиздат, 1981. – 232 с.
4. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Тэтано Т., Асаи К., Сугэно М. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
5. Малышев Н. Г., Берштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 136 с.
6. Малхотра, Нареш К. Маркетинговые исследования. Практическое руководство. Пер. с англ. – 3-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2002. – 960 с.
7. Холостов К. М. Автоматизация процедур анализа оперативной обстановки // Труды Академии управления МВД России. 2014. № 1 (29). – С. 22-26.
8. Холостов К. М., Лемех Р. М. Метод экспертной оценки качества реализации образовательных программ // Вестник Воронежского института ФСИИ России. 2017. № 1. – С. 114-120.
9. Холостов К. М. Алгоритмы и модели на основе нечеткой логики для систем автоматизированного управления // Актуальные вопросы управления в социально-экономических системах: сборник материалов всероссийского научного семинара, Москва, 26 марта 2014 года / Редакционная коллегия: И. В. Горошко, В. Б. Коробов, В. И. Долинко, А. С. Олейник. – М. : Академия управления МВД России, 2015. – С.115-119.

Холостов Константин Михайлович – д-р техн. наук, доцент, Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Ордена Трудового Красного Знамени Академия управления Министерства внутренних дел Российской Федерации», г. Москва, ✉ hkm_tula@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.01.2026

После доработки 25.02.2026

Принята к публикации 19.03.2026

System modeling critical application
№ 1 / 2026

USING FUZZY METHODS IN ANNEX DATA PROCESSING

K. M. Kholostov

Federal State Public Educational Institution of Higher Education «Order of the Red Banner of Labor Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation»

¹✉ hkm_tula@mail.ru

Abstract. The use of fuzzy logic methods in processing survey results allows for conclusions that extend beyond "direct" results. Moreover, the method for extracting meaningful information from questionnaires is somewhat different, allowing for a more in-depth and, in certain cases, more accurate processing of the research findings. The use of mathematical statistics, analytical, and numerical evaluation methods does not fully realize the potential of sociological or other research, meaning it does not fully utilize the empirical data obtained. Surveys and interviews, as a process for collecting information on various phenomena and processes related to organizational activities, allow for, in addition to assessments, suggestions, and other clear results, the extraction of insights into trends, group aspirations, and even misconceptions within the team. This can be achieved through the use of appropriate data processing and analysis methods. Such methods, along with qualitative assessments of various organizational issues, also allow for quantitative, ranking, or comparative assessments of organizational and support issues. The proposed method and algorithm based on fuzzy logic and soft computing allows for the extraction of more meaningful information from survey results, enabling managers to make informed and effective decisions in improving the performance of the organizational system.

Keywords: fuzzy logic, soft computing, organizational systems, questionnaire, linguistic variables, data processing method

REFERENS

1. Zhidkov V. N. Soft Computing in Integrated Aircraft Systems. – Moscow : MAI Publishing House, 2013. – 388 p.
2. Zade L. The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Decision Making: Translated from English. – Moscow : Mir, 1976. – 165 p.
3. Pospelov D. A. Logical-Linguistic Models in Control Systems. – Moscow : Energoizdat, 1981. – 232 p.
4. Applied Fuzzy Systems / Ed. Tetano T., Asai K., Sugeno M. – Moscow: Mir, 1993. – 368 p.
5. Malyshev N. G., Bershtein L. S., Bozhenyuk A. V. Fuzzy Models for Expert Systems in CAD. – Moscow : Energoatomizdat, 1991. – 136 p.
6. Malhotra, Naresh K. Marketing Research. A Practical Guide. Translated from English. – 3rd ed. – Moscow : Williams Publishing House, 2002. – 960 p.
7. Kholostov K. M. Automation of Operational Situation Analysis Procedures // Transactions of the Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2014. No. 1 (29). – Pp. 22-26.
8. Kholostov K. M., Lemekh R. M. Method of Expert Assessment of the Quality of Implementation of Educational Programs // Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia. 2017. No. 1. – Pp. 114-120.
9. Kholostov K. M. Algorithms and models based on fuzzy logic for automated control systems // Current issues of control in socio-economic systems: collection of materials from the All-Russian scientific seminar, Moscow, March 26, 2014 / Editorial board: I.V. Goroshko, V. B. Korobov, V. I. Dolinko, A. S. Oleinik. - M.: Academy of Management of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2015. – Pp. 115-119.

Received 13.01.2026

Revised 25.02.2026

Accepted 19.03.2026

УДК: 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В НАНОЖИДКОСТНОМ СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПРЯМОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КРИТИЧЕСКОГО
ПРИМЕНЕНИЯ

В. А. Минаев¹, И. С. Манжула²

¹Московский ордена Почета университет МВД России имени В.Я. Кикотя

²Дальневосточный юридический институт МВД России имени И.Ф. Шилова

¹✉ m1va@yandex.ru ²✉ manzhula1994@gmail.com

Аннотация. Разработана математическая модель тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения, функционирующем как элемент автономной энергетической системы для служб чрезвычайного реагирования. Поставлена краевая задача для системы уравнений Навье–Стокса и энергии. Учтена температурная зависимость динамической вязкости наножидкости на основе этиленгликоля с наночастицами Al_2O_3 , а также спектральное поглощение излучения по закону Бугера–Ламберта–Бера. Численный анализ гидродинамической системы выполнен с применением библиотеки DOLFINx. Разработан программный модуль, показавший устойчивость решений и физически обоснованную трансформацию профиля скорости при введении градиента вязкости. А именно, симметричный параболический профиль деформировался в асимметричную структуру вследствие перераспределения касательных напряжений. Полученные результаты легли в основу проектирования отказоустойчивых мобильных солнечных энергетических установок, обеспечивающих надёжное теплоснабжение критически важных систем в условиях их автономного функционирования.

Ключевые слова: математическое моделирование, солнечный коллектор, прямое поглощение энергии, наножидкость, тепломассоперенос, температурная зависимость вязкости, критические условия, численный эксперимент

ВВЕДЕНИЕ

Растущая потребность в автономных энергетических решениях стимулирует интенсивное развитие технологий солнечной энергетики. Особую значимость приобретают энергетические системы критического применения, от функционирования которых напрямую зависит выполнение задач обеспечения безопасности населения и территорий Российской Федерации. Особую актуальность приобретают решения, обеспечивающие надёжное энергоснабжение в автономных условиях из-за удалённости и труднодоступности территорий, что принципиально важно для функционирования сил чрезвычайного реагирования страны. Специфика задач, решаемых МЧС, правоохранительными органами и вооружёнными силами России, предъявляет повышенные требования к мобильности, оперативности развёртывания и устойчивости энергетических систем в автономном режиме. Отказ таких систем в условиях чрезвычайных ситуаций или проведения специальных операций может привести к критическим последствиям, включая невозможность выполнения решаемых задач, угрозу здоровью и жизни личного состава и нарушение функционирования центров управления. В частности, при проведении аварийно-

спасательных работ в зонах чрезвычайных ситуаций, осуществлении специальных мероприятий в труднодоступных и отдалённых районах, а также при обеспечении жизнедеятельности мобильных подразделений сил чрезвычайного реагирования критически необходима возможность оперативного развёртывания автономных источников тепловой энергии, не зависящих от централизованной инфраструктуры.

Коллекторы прямого поглощения солнечного излучения (КПП) представляют собой перспективное техническое решение для указанных сценариев применения. Их конструктивная особенность совмещения функций приёмника излучения и теплоносителя в едином рабочем объёме обеспечивает минимальную инерционность системы, упрощение конструкции и снижение массогабаритных характеристик, что отражает требования мобильности, предъявляемые к техническим средствам служб оперативного реагирования. Как элемент системы критического применения КПП должен обеспечивать гарантированное теплоснабжение автономных пунктов управления, средств связи и жизнеобеспечения в условиях полной энергетической изоляции. Актуальность развития КПП обусловлена, кроме того, географической спецификой Российской Федерации: доля труднодоступных территорий, где отсутствует централизованное энергоснабжение и затруднена доставка топлива, составляет 70 – 80 % общей площади страны, что создаёт системную потребность в автономных возобновляемых источниках энергии, в том числе для обеспечения деятельности сил оперативного реагирования в указанных районах.

Вместе с тем эффективность традиционных солнечных тепловых коллекторов, включая КПП с классическими теплоносителями (вода, антифризы), остаётся недостаточной для широкомасштабного внедрения в системы энергообеспечения. Данное ограничение стимулирует поиск инновационных подходов к повышению энергетических характеристик. Одним из наиболее перспективных направлений является применение наножидкостей — устойчивых дисперсных систем, состоящих из наноразмерных частиц (металлов, оксидов, карбидов) с характерным размером 1 – 100 нм, распределённых в базовой жидкости (вода, гликоль, масло).

Использование наножидкостей в качестве рабочего тела КПП (наножидкостные коллекторы прямого поглощения, НКПП) позволяет одновременно реализовать функции селективного поглощения солнечного излучения наночастицами и его транспортировки конвективными потоками базовой жидкости, что повышает интегральную эффективность преобразования солнечной энергии до 40 % по сравнению с традиционными системами [1, 2]. Повышение эффективности напрямую связано с увеличением времени автономной работы критически важных систем и снижением рисков их отказа.

Для целенаправленной оптимизации НКПП под задачи сил чрезвычайного реагирования необходим комплексный анализ пространственно-временного распределения плотности солнечного потока в рабочем объёме коллектора с учётом спектральных оптических свойств как базовой жидкости, так и диспергированных наночастиц (коэффициенты поглощения, рассеяния, альбедо).

Математическое моделирование выступает ключевым инструментом обеспечения надёжности систем критического применения на этапе проектирования, позволяя выявить потенциальные возможности отказа и оценить устойчивость работы в экстремальных условиях без проведения ресурсоёмких натурных испытаний. Моделирование позволяет минимизировать ресурсоёмкость экспериментальных исследований и ускорить проектирование конструкций, адаптированных к специальным условиям эксплуатации (низкие температуры, высокие вибрационные нагрузки, ограниченное время развёртывания).

В научной литературе представлены модели, описывающие влияние объёмной концентрации наночастиц, геометрических параметров проточной зоны и гидродинамических условий на тепловую мощность коллектора [3]. Однако промышленное внедрение НКПП в системы энергообеспечения служб чрезвычайного реагирования сдерживается рядом факторов: краткой стабильностью наножидкостей, высокой себестоимостью наноматериалов, недостаточной предсказуемостью термофизических характеристик в условиях длительного циклического нагружения и экстремальных климатических воздействий [4]. Данные факторы напрямую влияют на риски эксплуатации систем критического применения и требуют комплексного моделирования для формирования требований к надёжности оборудования.

В связи с изложенным численное моделирование распределения интенсивности солнечного излучения и процессов тепломассопереноса в НКПП, адаптированных к требованиям мобильности и надёжности, применяемым структурами чрезвычайного реагирования, представляет актуальную научно-техническую задачу, направленную на повышение эффективности управления автономными энергетическими системами критического назначения через достоверное прогнозирование их поведения в штатных и нештатных ситуациях.

Целью настоящей работы является разработка математической модели и решение краевой задачи для системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей стационарные процессы тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения как элемента системы критического применения, а также верификация программного модуля, реализующего гидродинамическую модель. Математическая постановка учитывает температурную зависимость динамической вязкости наножидкости на основе этиленгликоля с наночастицами Al_2O_3 , спектральные оптические свойства дисперсной системы и граничные условия, соответствующие реальным режимам эксплуатации автономных энергетических модулей. Верификация выполнена посредством серии численных экспериментов с вариацией реологических параметров рабочей среды, что подтвердило адекватность гидродинамической составляющей для последующей интеграции в полную термогидродинамическую модель. Полученные результаты направлены на формирование научных принципов проектирования отказоустойчивых мобильных солнечных энергетических установок, обеспечивающих функционирование критически важных систем управления и жизнеобеспечения подразделений служб чрезвычайного реагирования в условиях энергетической автономии [4, 5].

1. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследуется плоский НКПП как элемент автономной системы энергообеспечения критического применения, предназначенной для функционирования в условиях энергетической автономии и повышенных требований к надёжности. В качестве рабочего тела используется наножидкость на основе этиленгликоля с диспергированными наночастицами оксида алюминия (Al_2O_3).

Выбор этиленгликоля в качестве базовой жидкости обусловлен не только его широким диапазоном рабочих температур и химической стабильностью, но и принципиально важной для моделирования систем критического назначения выраженной температурной зависимостью динамической вязкости. Данная особенность позволяет адекватно воспроизвести реологическое поведение теплоносителя в условиях интенсивного нестационарного нагрева, характерного для

аварийно-спасательных операций и специальных мероприятий в труднодоступных районах, где отказы системы энергообеспечения недопустимы.

Рассмотрим прямоугольную область $D = \{0 < x < L, 0 < y < H\}$, где L и H – длина и высота солнечного коллектора, через которую протекает наножидкость, и на которую сверху в вертикальном направлении падает солнечный свет (рисунок 1).

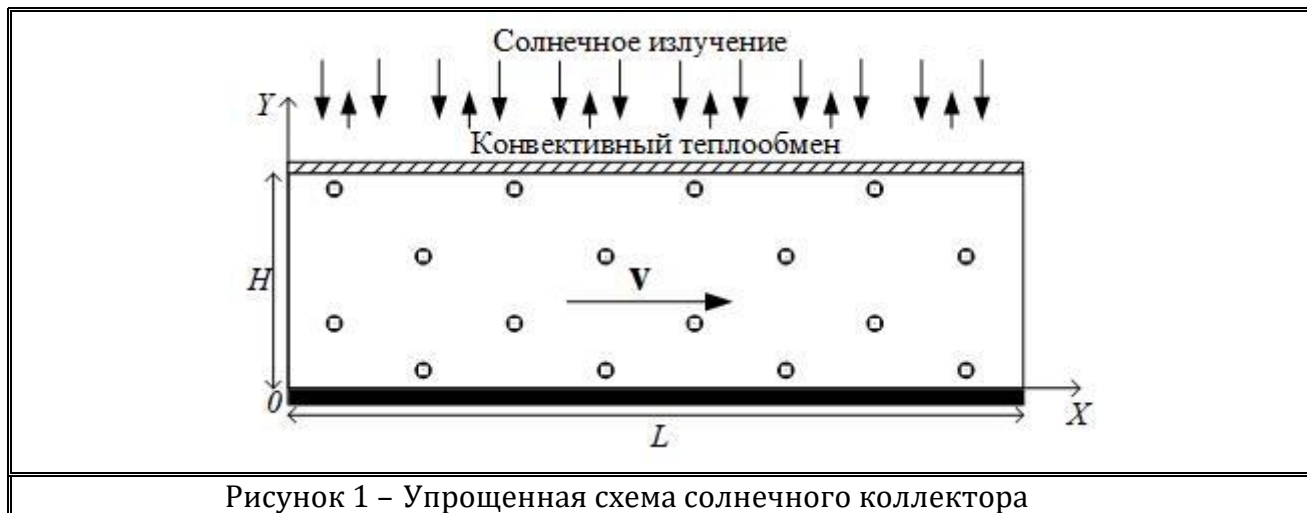


Рисунок 1 – Упрощенная схема солнечного коллектора

Верхняя поверхность НКПП закрыта высокопрозрачной стеклянной крышкой, обеспечивающей максимальную передачу солнечного излучения в рабочий объем за счёт минимальных оптических потерь. Одновременно данная граница служит основным каналом теплового взаимодействия системы с окружающей средой. Через неё осуществляется комбинированный теплообмен излучением и конвекцией, что приводит к частичной диссипации тепловой энергии, накопленной рабочей средой. Нижняя граница коллектора выполнена из непрозрачного теплоизоляционного материала и рассматривается как адиабатическая поверхность. Для повышения достоверности расчётов в постановках задачи допускается частичный тепловой контакт с внешней средой, при этом интенсивность теплообмена через нижнюю границу принимается равной 1% от соответствующего значения на верхней границе, что соответствует конструктивным реализациям мобильных энергетических модулей, предназначенных для эксплуатации в условиях низких температур.

Для систем критического применения, к которым относятся автономные энергетические установки, корректное моделирование распределения тепловых потоков по границам коллектора имеет принципиальное значение: недооценка паразитных потерь может привести к недостаточной теплопроизводительности в условиях экстремального климата, а избыточное утепление — к увеличению массогабаритных характеристик, снижающих мобильность комплекса.

Физические процессы тепломассопереноса в исследуемом коллекторе описываются замкнутой системой балансовых уравнений, включающей уравнение сохранения энергии для распределения температуры рабочей жидкости, уравнения сохранения импульса в форме стационарных уравнений Навье–Стокса для компонент вектора скорости течения, а также уравнение неразрывности для поля давления. Система дополняется членом в уравнении энергии, моделирующим внутреннее тепловыделение вследствие поглощения солнечного излучения непосредственно в объеме наножидкости, что является особенностью коллекторов прямого поглощения. Данная постановка позволяет провести комплексный анализ взаимосвязанных

гидродинамических и тепловых процессов, обеспечивающих функционирование коллектора как элемента автономной системы энергообеспечения [1 – 5]:

$$\nabla(k\nabla T) - c_v \mathbf{V} \nabla T - \nabla \mathbf{I} = 0, \quad (x, y) \in D, \quad (1)$$

$$\nabla(\mu \nabla \mathbf{V}) - \rho(\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} - \nabla p = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{V} = 0. \quad (3)$$

Здесь $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ и $\Delta = \nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ – двумерные операторы Гамильтона и Лапласа; k , $c_v = c\rho$, c , ρ , μ – удельная теплопроводность, удельная объемная теплоемкость, удельная теплоемкость, плотность и динамическая вязкость рабочей наножидкости; $\mathbf{I} = (0, -I)$, I – интенсивность светового потока солнечного излучения; p – давление; $\mathbf{V} = (v, u)$ – скорость течения рабочей жидкости внутри НКПП [7 – 9].

Математическая модель функционирования НКПП построена на основе фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии для стационарного течения несжимаемой среды. Уравнение движения сформулировано в приближении Навье–Стокса с учётом температурной зависимости динамической вязкости, что отражает изменение реологических свойств наножидкости в процессе эксплуатации и обеспечивает достоверное прогнозирование гидродинамических характеристик при критических режимах работы. Уравнение энергии дополнено источником тепловыделения, моделирующим внутреннее поглощение солнечной радиации непосредственно в рабочем объёме коллектора. Учет этой особенности систем прямого поглощения обеспечивает минимальную инерционность и высокую скорость выхода на рабочий режим, что принципиально для оперативного развёртывания энергетических модулей.

Процесс поглощения солнечного излучения описан на основе закона Бугера–Ламберта–Бера. Для каждой спектральной компоненты солнечного излучения формулируется задача Коши, решение которой позволяет определить пространственное распределение интенсивности излучения в пределах рабочего объёма. Суммарная плотность объёмного тепловыделения вычисляется путём спектрального интегрирования с учётом оптических свойств как базовой жидкости, так и наночастиц. Такой подход обеспечивает физически обоснованное моделирование распределения тепловых нагрузок внутри НКПП, что необходимо для оценки рисков локальных перегревов и обеспечения отказоустойчивости системы в условиях экстремальной инсоляции.

Температурная зависимость динамической вязкости аппроксимирована на основе экспериментальных данных с применением регрессионного и интерполяционного анализа. Полученная зависимость обеспечивает высокую точность воспроизведения реологических характеристик в диапазоне температур 20 – 150 °С, соответствующих как штатным, так и форсированным режимам работы энергетических модулей в составе мобильных комплексов МЧС России и подразделений правоохранительных органов.

Граничные условия сформулированы с учётом специфики эксплуатации систем критического применения. На поверхностях твёрдых стенок реализуется условие полного прилипания, обеспечивающее корректное моделирование пристеночных тепловых потоков. На верхней прозрачной границе задаётся плотность теплового потока, соответствующая инсоляции в различных климатических зонах Российской

Федерации, включая северные и высокогорные регионы. Боковые и нижняя стенки моделируются как теплозащищённые, что соответствует конструктивным решениям реальных мобильных энергетических модулей, предназначенных для минимизации тепловых потерь в условиях низких температур окружающей среды.

Предложенная модель обеспечивает комплексное описание сопряжённых физических процессов (оптического поглощения, гидродинамики и теплопередачи) с учётом реологической нелинейности наножидкости. Такая постановка задачи позволяет проводить системный анализ надёжности и эффективности НКПП в условиях, приближенных к реальным сценариям применения: автономное энергообеспечение пунктов управления в зонах чрезвычайных ситуаций, обеспечение тепловой энергией мобильных комплексов специального назначения, функционирование в условиях резких климатических колебаний и ограниченного технического обслуживания.

Результаты моделирования формируют научные основы для разработки стандартов проектирования и эксплуатации автономных солнечных энергетических систем критического применения, предназначенных для служб чрезвычайного реагирования.

Сформулируем задачу (1) – (3) в двумерной покомпонентной форме для составляющих вектора скорости в декартовой системе координат x, y .

$$\tilde{v}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \tilde{v}_y \frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = f_0, \quad x \in (0, L], \quad y \in (0, H), \quad (4)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad x \in (0, L], \quad y \in (0, H), \quad (5)$$

$$v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad x \in (0, L], \quad y \in (0, H), \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad x \in (0, L], \quad y \in (0, H), \quad (7)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial y} - \sigma_0 (T - T_e) + \alpha I_0 \right) \Big|_{y=0} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (8)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial y} + \sigma_H (T - T_e) \right) \Big|_{y=H} = 0, \quad x \in [0, L], \quad (9)$$

$$T|_{x=0} = T_{in}, \quad y \in [0, H], \quad (10)$$

$$x = 0 : v = v_0, \quad u = 0; \quad x = L : \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

$$y = 0 : v = 0, \quad u = 0; \quad y = H : v = 0, \quad u = 0, \quad (12)$$

$$\int_D p(x) dx = 0, \quad (13)$$

где $\tilde{v}_x = c_v v$, $\tilde{v}_y = c_v u$; I_0 и f_0 – интенсивность излучения и удельное поглощение солнечной энергии наножидкостью на заданной глубине, соответственно; T_e – температура окружающей среды; σ_0 , σ_H – коэффициенты теплоотдачи на нижней и на верхней границах коллектора, соответственно; $\theta = \text{const}$ – коэффициент отражения солнечного излучения от нижней границы, $\theta \in [0, 1]$.

2. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОТОК В НКПП

Для расчета гидродинамической составляющей при моделировании течения рабочей жидкости в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения разработан программный модуль на языке Python, а также использовалась библиотека DOLFINx, разработанная в рамках проекта FEniCS.

В целях верификации адекватности разработанного программного модуля, а также для оценки влияния реологических свойств рабочей среды на характеристики течения сформирована расчётная схема с фиксированными геометрическими и граничными параметрами. Габаритные размеры расчётной области соответствуют конструктивным ограничениям мобильных энергетических модулей критического применения: высота проточной зоны составила 0,02 м, длина — 1,0 м.

На входной границе расчётной области задано равномерное распределение скорости течения с фиксированным значением 0,002 м/с, что соответствует режиму естественной циркуляции в автономных энергетических установках. Начальное значение динамической вязкости наножидкости установлено равным 0,016 Па·с.

Указанные параметры сохранялись неизменными во всех сериях вычислительных экспериментов, проведённых в рамках этапа верификации. Варьируемым фактором выступала функциональная зависимость динамической вязкости от пространственных координат, что позволило оценить влияние реологической неоднородности среды на структуру течения без влияния температурных эффектов.

Важно отметить, что на данном этапе исследования фокус был сосредоточен исключительно на верификации вычислительных возможностей гидродинамического модуля. Термодинамическая подсистема модели была деактивирована, а зависимость вязкости от температуры в расчётах не учитывалась. Такой подход обеспечил поэтапную валидацию программного комплекса, сначала гидродинамической составляющей, а на последующих этапах – сопряжённой термогидродинамической задачи.

Результаты численных экспериментов представлены на рисунках 2–5. Визуализация выполнена в виде цветовых карт распределения модуля скорости течения в расчётной области. Цветовая шкала позволяет оценить пространственную структуру потока, выявить зоны ускорения и замедления жидкости, а также проследить эволюцию гидродинамической картины при изменении реологических свойств рабочей среды. Полученные данные формируют основу для последующего анализа влияния вязкостных характеристик наножидкости на эффективность теплосъёма в условиях, приближенных к реальным режимам эксплуатации автономных энергетических систем.

Численный эксперимент 1. Значение динамической вязкости наножидкости задано выражением $\mu = \mu_0$. Результаты моделирования представлены на рисунках 2.

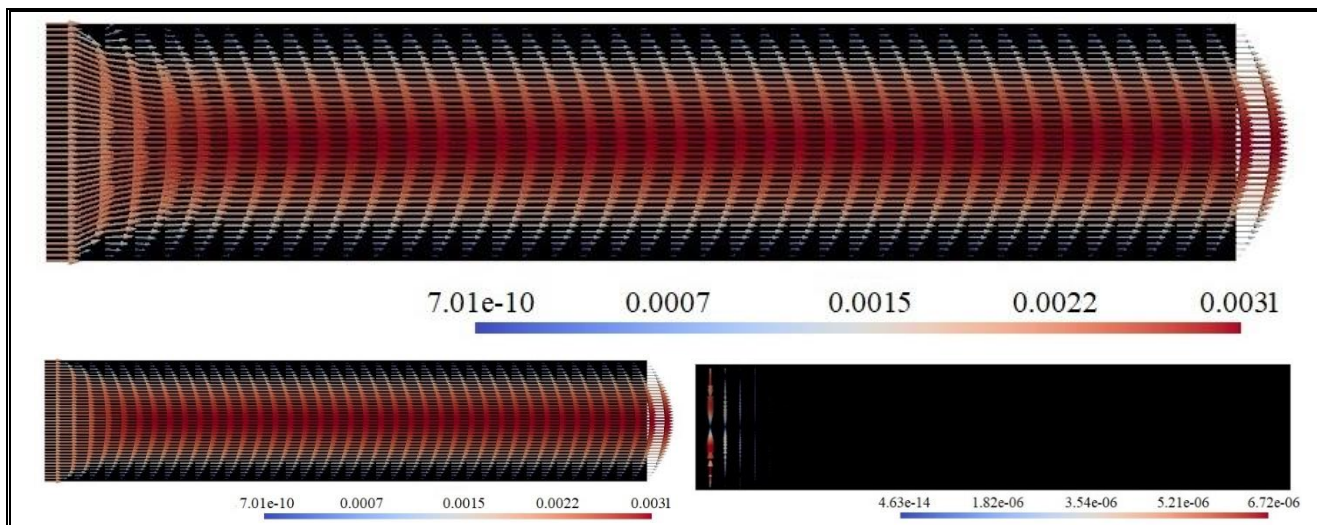


Рисунок 2 – Результаты моделирования потока рабочей жидкости внутри НКПП в численном эксперименте 1: а – общий поток скорости; б – компонента скорости u ; в – компонента скорости v

Численный эксперимент 2. Значение динамической вязкости наножидкости задано выражением $\mu = \mu_0 \left(1 + (y/H)\right)$. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

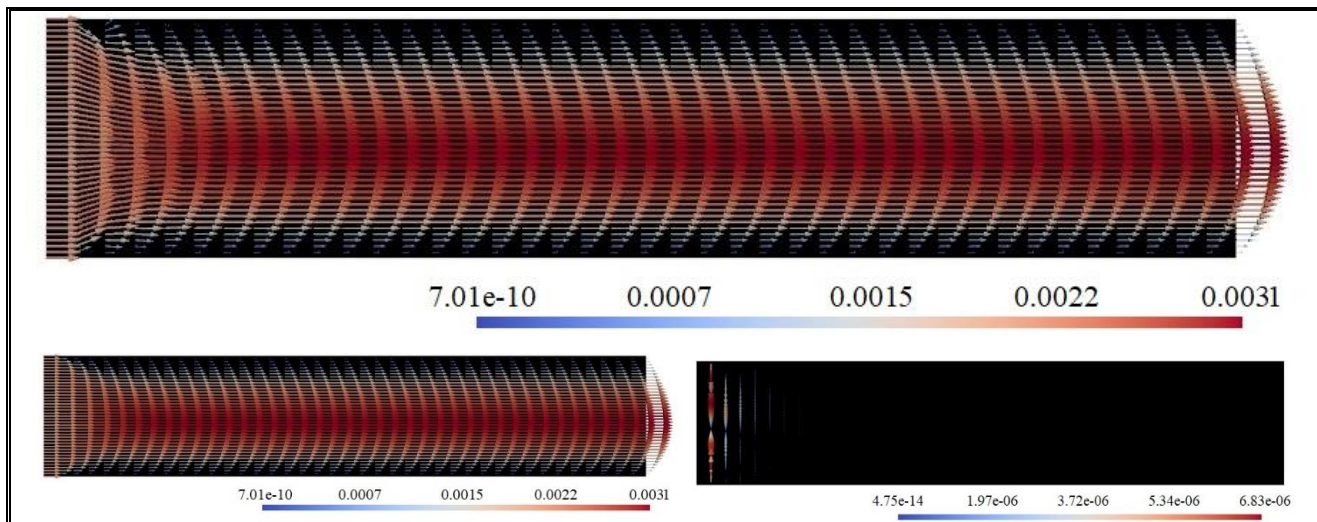
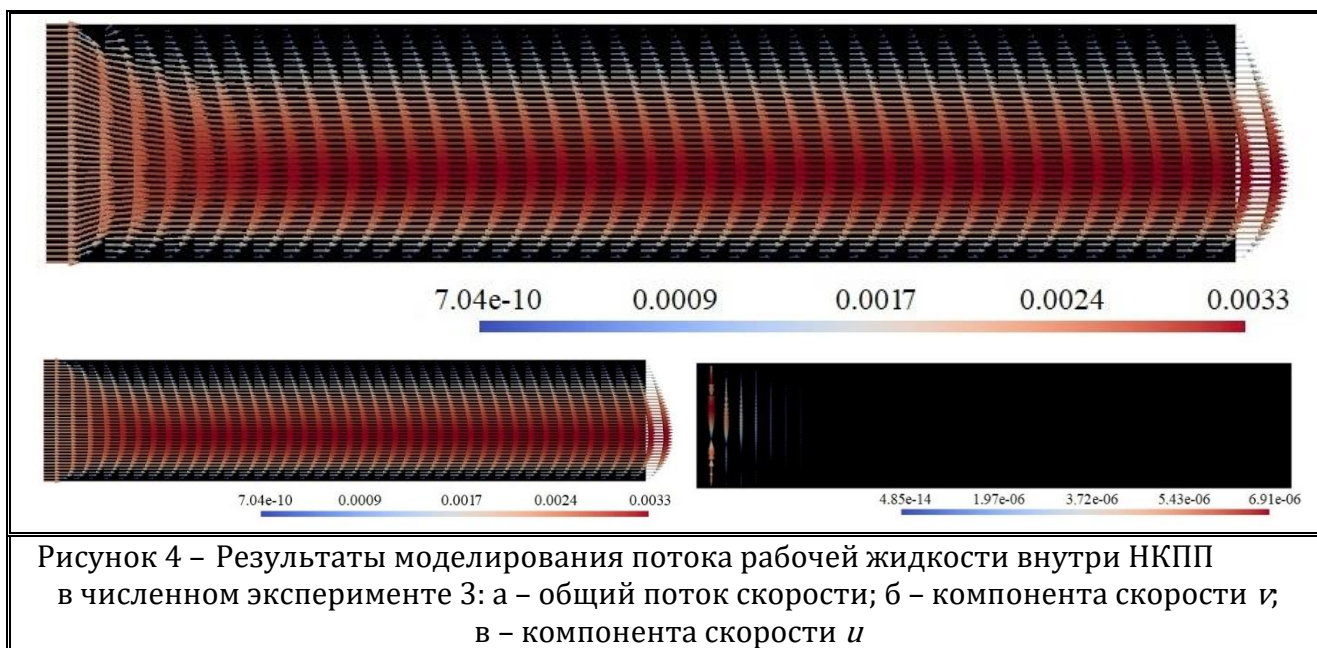
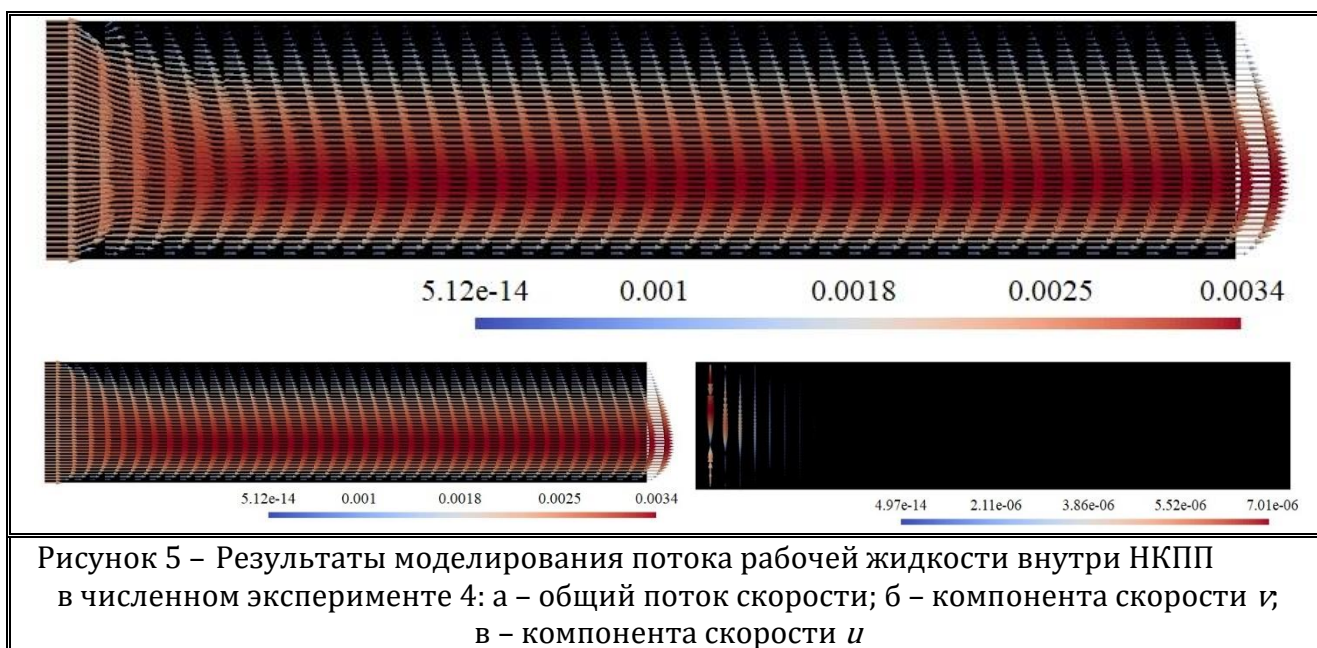


Рисунок 3 – Результаты моделирования потока рабочей жидкости внутри НКПП в численном эксперименте 2: а – общий поток скорости; б – компонента скорости u ; в – компонента скорости v

Численный эксперимент 3. Значение динамической вязкости наножидкости задано выражением $\mu = \mu_0 \left(1 + 4(y/H)\right)$. Результаты моделирования представлены на рисунке 4.



Численный эксперимент 4. Значение динамической вязкости наножидкости задано выражением $\mu = \mu_0 (1 + 9(y/H))$. Результаты моделирования представлены на рисунке 5.



Проведённая серия верификационных численных экспериментов 1-4 подтвердила корректность применения вычислительной библиотеки DOLFINx для решения задач гидродинамики в условиях, характерных для наножидкостных солнечных коллекторов прямого поглощения. Анализ распределений скорости течения выявил закономерное снижение гидродинамической активности рабочей среды с увеличением динамической вязкости, что соответствует физическим принципам движения вязких жидкостей в каналах ограниченной высоты.

В экспериментах 2-4, где динамическая вязкость моделировалась как функция поперечной координаты Y , наблюдалась трансформация профиля продольной компоненты скорости (направленной вдоль оси X): симметрия относительно продольной оси канала нарушалась, а классический параболический профиль, характерный для однородной вязкой среды (эксперимент 1), деформировался в асимметричную структуру. Данная особенность обусловлена градиентом вязкости по высоте проточной зоны и отражает физически обоснованное перераспределение касательных напряжений в поперечном сечении канала. Полученная гидродинамическая картина согласуется с теоретическими представлениями о течении неньютоновских сред и подтверждает адекватность принятой математической постановки для описания реологически неоднородных систем.

Разработанный программный модуль гидродинамической подсистемы продемонстрировал устойчивость численного решения и способность корректно воспроизводить качественные и количественные особенности течения при вариации реологических параметров рабочей среды. Результаты верификации свидетельствуют о готовности модуля к интеграции в состав полной сопряжённой термогидродинамической модели, предназначенной для прогнозирования поведения автономных энергетических систем критического применения в условиях нестационарного теплового воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана математическая модель тепломассопереноса в НКПП – элемента автономной энергетической системы критического применения, предназначенной для обеспечения деятельности служб чрезвычайного реагирования в условиях энергетической автономии. Модель в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных применена для решения краевой задачи процессов тепломассопереноса с учётом реологической нелинейности наножидкости на основе этиленгликоля с диспергированными наночастицами оксида алюминия (Al_2O_3).

Важным результатом исследования стало создание и верификация программного модуля гидродинамической подсистемы на базе библиотеки DOLFINx. Серия численных экспериментов подтвердила корректность применяемого вычислительного инструментария и выявила физические закономерности течения рабочей среды: с увеличением динамической вязкости наблюдается снижение скорости потока, а при введении градиента вязкости по поперечной координате происходит трансформация профиля скорости из симметричного параболического в асимметричную структуру, обусловленную перераспределением касательных напряжений в поперечном сечении проточной зоны. Полученные результаты согласуются с теоретическими представлениями о поведении реологически неоднородных сред и подтверждают адекватность принятой математической постановки.

Полученные результаты формируют научную основу для проектирования отказоустойчивых мобильных солнечных энергетических установок, отвечающих требованиям надёжности, мобильности и быстродействия развёртывания, предъявляемым к техническим средствам служб чрезвычайного реагирования.

Перспективы дальнейших исследований включают:

- интеграцию верифицированного гидродинамического модуля в полную термогидродинамическую модель с учётом температурной зависимости вязкости и спектрального поглощения излучения;

– проведение параметрических исследований влияния концентрации наночастиц, геометрии проточной зоны и климатических условий на тепловую эффективность коллектора;

– экспериментальную валидацию результатов моделирования на макете коллектора в составе мобильного энергетического модуля.

Таким образом, выполненная работа вносит вклад в развитие российской научной школы моделирования систем критического применения, предоставляя инструментарий для достоверного прогнозирования поведения автономных энергетических систем, что способствует повышению эффективности управления силами чрезвычайного реагирования структурами при выполнении их задач в условиях энергетического дефицита и даже отсутствия энергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tyagi H., Phelan P., Prasher R. Enhanced Specific Absorption in Nanofluid Solar Collectors // Journal of Solar Energy Engineering. – 2009. – Vol. 131, No 4. – Pp. 041004.
2. Mahian O., Kianifar A., Kalogirou S. A., Wongwises S. Recent Advances in Modeling and Simulation of Nanofluid Flows: a Review // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 130. – Pp. 1186–1223.
3. Gupta M., Singh V., Kumar R., Said Z. Challenges of Nanofluid-based Solar Collectors: a Review // Renewable Energy. – 2023. – Vol. 202. – Pp. 1458–1475.
4. Минаев В.А., Манжула И.С., Вихтенко Э.М. Моделирование тепломассопереноса в наножидкостном солнечном коллекторе прямого поглощения с учётом температурной зависимости вязкости / В.А. Минаев, И.С. Манжула, Э.М. Вихтенко // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 11. – С. 111–119. DOI: 10.17513/snt.40574.
5. Минаев В.А., Манжула И.С., Корячко А.В., Вихтенко Э.М. Математическое моделирование и численное исследование солнечных коллекторов прямого поглощения с наножидкостным теплоносителем / В.А. Минаев, И.С. Манжула, А.В. Корячко, Э.М. Вихтенко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 94. – С. 106–113.
6. Vargaftik N. B., Volkov B. N., Voljak L. D. Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases. – Boca Raton: CRC Press, 1996. – 352 p.
7. Assael M. J., Trusler J. M. H., Tsolakis T. F. Thermophysical Properties of Fluids: an Introduction to their Prediction. – London: Imperial College Press, 1996. – 324 p.
8. He Y., Men Y., Zhao Y., Lu H., Ding Y. Numerical Investigation on Thermal Performance of Nanofluid-based Direct Absorption Solar Collectors // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 113. – Pp. 1217–1227.
9. Sheikholeslami M., Farshad S. A., Ebrahimpour Z., Said Z. Recent Progress on Flat plate solar collectors and photovoltaic systems in the presence of nanofluid: A review // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 293. – P. 126119.

Минаев Владимир Александрович – д-р техн. наук, профессор, Московский ордена Почета университет МВД России имени В.Я. Кикотя, Москва, ✉ e-mail: m1va@yandex.ru

Манжула Илья Сергеевич – Дальневосточный юридический институт МВД России имени И.Ф. Шилова, Хабаровск, ✉ e-mail: manzhula1994@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.02.2026

Принята к публикации 19.03.2026

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE NANOFLUIDIC DIRECT ABSORPTION SOLAR COLLECTOR OF CRITICAL ENERGY SYSTEM

V. A. Minaev¹, I. S. Manzhula²

¹Moscow Order of Honor University of the Internal Affairs Ministry of Russia
named after V. Ya. Kikot

²Far Eastern Law Institute of the Internal Affairs Ministry of Russia named after I.F. Shilov
¹✉ m1va@yandex.ru, ²✉ manzhula1994@gmail.com

Summary. A mathematical model of heat and mass transfer in a nanofluidic direct absorption solar collector, functioning as an element of an autonomous energy system for emergency response services, has been developed. A boundary value task for the system of Navier–Stokes equations and energy is posed. The temperature dependence of the dynamic viscosity of an ethylene glycol–based nanofluid with Al₂O₃ nanoparticles, as well as the spectral absorption of radiation according to the Bouguer–Lambert–Baer law, is taken into account. The numerical analysis of the hydrodynamic system was performed using the DOLFINx library. A software module has been developed that demonstrates the stability of solutions and a physically justified transformation of the velocity profile with the introduction of a viscosity gradient. Namely, the symmetrical parabolic profile was deformed into an asymmetric structure due to the of tangential stresses. The results obtained formed the basis for the design of fault-tolerant mobile solar power plants that provide reliable heat supply to critical systems in conditions of their autonomous operation.

Keywords: mathematical modeling, solar collector, direct energy absorption, nanofluid, heat and mass transfer, temperature dependence of viscosity, critical conditions, numerical experiment

REFERENCES

1. Tyagi H., Phelan P., Prasher R. Enhanced Specific Absorption in Nanofluid Solar Collectors // Journal of Solar Energy Engineering. – 2009. – Vol. 131, No 4. – Pp. 041004.
2. Mahian O., Kianifar A., Kalogirou S. A., Wongwises S. Recent Advances in Modeling and Simulation of Nanofluid Flows: a Review // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 130. – Pp. 1186–1223.
3. Gupta M., Singh V., Kumar R., Said Z. Challenges of Nanofluid-based Solar Collectors: a Review // Renewable Energy. – 2023. – Vol. 202. – Pp. 1458–1475.
4. Minaev V.A., Manzhula I.S., Vikhtenko E.M. Modelirovanie teplomassopere-nosa v nanozhidkostnom solnechnom kollektore pryamogo pogloshcheniya s uchyotom temperaturnoy zavisimosti vyazkosti / V.A. Minaev, I.S. Manzhula, E.M. Vikhtenko // Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii. – 2025. – No. 11. – P. 111–119. DOI: 10.17513/snt.40574. (In Russian)
5. Minaev V.A., Manzhula I.S., Koryachko A.V., Vikhtenko E.M. Matematicheskoye modelirovaniye i chislennoye issledovaniye solnechnykh kollektorov pryamogo pogloshcheniya s nanozhidkostnym teplonositelem / V.A. Minaev, I.S. Manzhula, A.V. Koryachko, E.M. Vikhtenko // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta. – 2025. – No. 94. – P. 106–113. (In Russian)
6. Vargaftik N. B., Volkov B. N., Voljak L. D. Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases. – Boca Raton: CRC Press, 1996. – 352 p.

7. Assael M. J., Trusler J. M. H., Tsolakis T. F. Thermophysical Properties of Fluids: an Introduction to their Prediction. – London: Imperial College Press, 1996. – 324 p.
8. He Y., Men Y., Zhao Y., Lu H., Ding Y. Numerical Investigation on Thermal Performance of Nanofluid-based Direct Absorption Solar Collectors // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 113. – Pp. 1217–1227.
9. Sheikholeslami M., Farshad S. A., Ebrahimpour Z., Said Z. Recent Progress on Flat plate solar collectors and photovoltaic systems in the presence of nanofluid: A review // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 293. – P. 126119.

Received 03.02.2026

Accepted 19.03.2026

ВЫБОР КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ О ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

В. В. Меньших¹, В. Р. Гришаева²

^{1,2}Воронежский институт МВД России

¹✉ menshikh@list.ru ²✉ vrkvaleria.2002@mail.ru

Аннотация. Актуальность темы обусловлена необходимостью оптимизации работы с большим объемом статистических данных лиц, принимающих решения, в условиях чрезвычайных ситуаций. В качестве предмета работы был выбран переход от количественных статистических данных к качественным (лингвистическим) характеристикам. Основная цель работы заключена в выборе метода для получения качественных характеристик для принятия решений. Методология базируется на кластеризации методом k -средних с учетом весовых коэффициентов показателей и метрик близости (евклидова, манхэттенская, косинусная, расстояние Махаланобиса); число кластеров ограничено интервалом 5–9 в соответствии с числом Миллера. Результатом стала кластеризация статистических данных о количестве чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации за период с 2009 по 2025 год на 5 категорий с последующим вербальным описанием качественных характеристик чрезвычайных ситуаций. Область применения данных результатов определена для системы управления кризисами, МЧС и правоохранительных органов. Предложенный метод повышает скорость и качество принятия решений за счет перехода к качественным характеристикам.

Ключевые слова: статистические данные, качественные характеристики, вербальное описание, лингвистическая шкала, принятие решений, чрезвычайные ситуации, метод k -средних, метрики, весовые коэффициенты

ВВЕДЕНИЕ

Современный мир переживает период беспрецедентного роста сложности и многообразия чрезвычайных ситуаций, где природные катаклизмы переплетаются с техногенными угрозами, социальными вызовами и последствиями глобальных изменений. В таких условиях эффективность системы управления кризисами определяется не только оперативностью действий, но и глубиной, объективностью и всесторонностью анализа поступающей информации [1].

При работе с полными статистическими данными переход от количественных значений к качественным характеристикам представляет собой критически важный этап в процессе принятия решений, актуальный для самых различных сфер деятельности: от управления бизнесом и здравоохранения до образования и государственного администрирования [2]. В современных условиях способность осуществить переход от точных количественных показателей к качественным, категориальным или лингвистическим формулировкам становится ключевым навыком для любого специалиста, принимающего решения. Различные способы такого рода решений представлены в работах [2, 3, 4].

В данной работе рассматривается вопрос определения качественных характеристик информации, соответствующих количественным статистическим данным.

1. ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ

Одной из фундаментальных причин необходимости перехода от количественных значений к качественным характеристикам является снижение когнитивной нагрузки. Человеческий мозг эволюционно не приспособлен к оперативной обработке больших массивов точных чисел, особенно в условиях дефицита времени или повышенного стресса. Рабочая память человека способна удерживать одновременно лишь ограниченное количество объектов. Поэтому подробные отчеты с тысячами строк цифр оказываются малоэффективными для быстрого реагирования в любой профессиональной области. Мозг гораздо эффективнее распознает образы и категории: формулировки, описывающие степень серьезности ситуации, воспринимаются и обрабатываются значительно быстрее, чем анализ отклонений в процентах или абсолютных величинах [5]. Например, сотруднику, работающему с данными, связанными с ликвидацией последствий природного бедствия, проще принять решение об объявлении эвакуации населения, опираясь на статус «непосредственная угроза жизни и здоровью людей», чем ежеминутно анализировать динамику отдельных показателей, таких как скорость распространения лесного пожара в метрах в секунду, концентрация продуктов горения в воздухе в миллиграммах на кубический метр или температура в эпицентре возгорания в градусах Цельсия [1, 6, 7].

Само по себе число во многих ситуациях не имеет определенной ценности для лиц, принимающих решения (далее – ЛПР), без интерпретации в конкретной предметной области: переход к качественным характеристикам позволяет ответить не на вопрос о количественном значении показателя, а на вопрос о том, какое практическое значение имеет этот показатель для принятия решения. Например, при мониторинге химической обстановки в зоне техногенной аварии показатель концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе, равный определенному значению, сам по себе является лишь фактом, тогда как оценка «превышение порога, представляющего непосредственную опасность для жизни и здоровья человека» уже содержит четкий сигнал к действию [7].

Следует заметить, что переход к качественным характеристикам значительно снижает объем обрабатываемой ЛПР информации, что позволяет значительно увеличить скорость реакции на процессы принятия решений независимо от сферы деятельности: в условиях развития критической ситуации важнее своевременность и адекватность решения, чем математическая точность до малых величин [7].

Категоризация данных, представленных в виде качественных характеристик, реализует принцип приоритизации: она позволяет быстро отсеять незначимые события и сфокусировать внимание руководителя исключительно на тех аспектах обстановки, которые требуют немедленного вмешательства, поскольку нечисловые метки удобно привязывать к заранее разработанным регламентам действий: категория, обозначающая высокую степень угрозы массового поражения людей, автоматически запускает определенный план реагирования, тогда как точное числовое значение вероятности негативного исхода требует дополнительной интерпретации и анализа, на который в экстренной ситуации может не быть времени.

Коммуникационная функция нечисловых оценок также незаменима в любой профессиональной среде, где необходимо взаимодействие между различными группами участников. Разные участники процесса принятия решений часто обладают различным уровнем профессиональной подготовки и говорят на разных профессиональных языках. Технические метрики и специализированные показатели могут быть непонятны

широкому кругу лиц, тогда как качественные формулировки, описывающие степень опасности или требуемые действия, понятны всем сторонам без дополнительной подготовки: в условиях ликвидации последствий чрезвычайной ситуации формулировки «зона, в которой необходимо немедленное укрытие населения», «территория, требующая проведения эвакуационных мероприятий» или «участок, на котором восстановительные работы могут быть начаты» понятны как специалистам спасательных служб, так и представителям органов власти, и гражданскому населению, тогда как технические параметры, такие как уровень радиационного фона или давление в поврежденных коммуникациях, требуют специальной интерпретации.

Обратимся к описанию математических методов осуществления перехода от количественных статистических значений к их качественным характеристикам.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

При принятии решений в ходе осуществления аналитической работы ЛПР приходится сталкиваться с большим объемом статистических данных, численные значения которых могут быть как близкими друг другу, так и значительно различающимися. В связи с этим возникает необходимость оценки степени различия статистических данных.

Классификация, как указано выше, может осуществляться не по одному, а по нескольким статистическим показателям, характеризующим некоторый объект исследования. При этом для характеристики объекта показатели могут иметь различный вес, что необходимо учитывать при оценке близости данных.

Поскольку статистические данные имеют количественное выражение, подобие между данными выражается близостью числовых значений.

Статистическая информация, обрабатываемая ЛПР, как правило, является многомерной, т. е. содержит значения нескольких показателей, влияние которых на принятие решения различно: при принятии решения о введении режима чрезвычайного положения категория «вероятность катастрофических последствий» служит значительно большим основанием для активации соответствующих протоколов, чем данные о скорости ветра, уровне осадков или состоянии инженерных сооружений [7].

Пусть $X = (x_1, \dots, x_n)$ и $Y = (y_1, \dots, y_n)$ – два набора статистических данных, имеющих весовые коэффициенты $A = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0$.

Тогда в качестве меры близости могут быть использованы следующие варианты метрик [8]:

1) евклидова метрика, дополненная весовыми коэффициентами:

$$\rho_e(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \cdot (x_i - y_i)^2}; \quad (1)$$

2) манхэттенское расстояние, дополненное весовыми коэффициентами:

$$\rho_m(X, Y) = \sum_{i=1}^n |\alpha_i \cdot (x_i - y_i)|; \quad (2)$$

3) косинусная мера, дополненная весовыми коэффициентами:

$$\rho_k(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}; \quad (3)$$

4) расстояние Махаланобиса, дополненная весовыми коэффициентами:

$$\rho_M(X, Y) = \sqrt{(A \circ (X - Y))^T \cdot S^{-1} \cdot (A \circ (X - Y))}, \quad (4)$$

где S – ковариационная матрица, $\circ$ – операция покомпонентного умножения векторов.

Для эффективного осуществления аналитической работы ЛПР часто необходимо использовать не точные количественные значения статистических данных, а их качественные свойства, признаки или особенности, характеризующие эту информацию. Исследования [5] показывают, что число таких свойств, позволяющих классифицировать информацию по признаку подобия, должно находиться в интервале 7 ± 2 (число Миллера).

Для вербального описания свойств классов статистических данных могут быть использованы значения нечисловой шкалы.

Например,

1) («незначительный», «низкий», «средний», «высокий», «критический») уровень риска;

2) («крайне низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «крайне высокая») вероятность совершения преступления;

3) («крайне низкая», «низкая», «удовлетворительная», «высокая», «максимальная») эффективность профилактических мер;

4) («малая», «ниже среднего», «средняя», «выше среднего», «большая») опасность возникновения чрезвычайных ситуаций;

5) («очень медленная», «медленная», «средняя», «большая», «моментальная») скорость реагирования.

Обратимся к описанию математического метода решения задачи перехода от количественных статистических значений к их качественным характеристикам.

3. АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ

Для систематизации статистических данных в интересах нахождения их качественных характеристик следует определить внутреннюю структуру совокупности данных, что осуществляется с помощью методов кластеризации, основанных на учете степени близости этих данных [9]. Основные классы алгоритмов кластеризации можно систематизировать по принципу построения разбиения [10]:

1) иерархические методы (строят вложенную последовательность кластеров, представляемую в виде дендрограммы, что позволяет исследователю выбирать уровень детализации разбиения постфактум);

2) агломеративные алгоритмы (начинают с того, что каждый объект образует отдельный кластер, и последовательно объединяют ближайшие пары, используя стратегии одиночной, полной или средней связи);

3) итеративные методы (минимизируют целевую функцию);

4) вероятностные методы кластеризации, в частности модели смеси распределений (предполагают, что данные порождены смесью k вероятностных распределений. Обеспечивает естественную интерпретацию неопределенности

классификации и позволяет применять информационные критерии AIC и BIC для объективного выбора числа компонент модели. Оценка параметров осуществляется методом максимального правдоподобия посредством ЕМ-алгоритма).

Наиболее распространенным методом кластеризации является метод k -средних, относящийся к итеративным методам кластеризации. Целью данного метода является минимизация суммы квадратов расстояний от точек до центров их кластеров (центроидов).

Данный метод является универсальным методом для различных задач, поэтому опишем алгоритм реализации метода k -средних применительно к рассматриваемой в статье задаче.

Шаг 1. Инициализация. Выбирается k начальных центроидов (обычно случайным образом из набора данных).

Шаг 2. Назначение. Каждая точка данных X_i присваивается кластеру C_i , центроид μ_i которого находится ближе всего (по выбранному расстоянию).

Шаг 3. Обновление центроидов. Для каждого кластера C_i вычисляется новый центроид μ_j как среднее арифметическое всех точек, входящих в этот кластер (формула (5)):

$$\mu_j = \frac{1}{|C_i|} \sum_{X_i \in C_i} X_i. \quad (5)$$

Шаг 4. Определение сходимости (осуществляется путем определения близости точек к центроиду с помощью выбранной метрики). Шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центроиды μ_j и μ_i не стабилизируются или изменения функции потерь не станут меньше заданного порога ε .

4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим численный пример перехода от количественных показателей к качественным характеристикам на основе статистических данных о количестве чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации (таблица 1).

Таблица 1 – Статистические данные о количестве чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации

Год	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Количество	429	360	297	438	335	262	257	299	257
Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
Количество	266	266	331	386	242	305	272	266	

По данным в таблице 1 можно предположить, что ЛПР трудно будет принять объективное решение, так как значения находятся в разных числовых диапазонах. Именно поэтому необходимо осуществить переход от количественных показателей к качественным характеристикам с помощью метода k -средних.

Учитывая, что количество центроидов может быть в пределах 7 ± 2 , как было сказано выше, можно кластеризовать количество чрезвычайных ситуаций в кластеры с помощью метода k -средних. С помощью алгоритма метода k -средних с использованием евклидовой метрики (1) найдем центроиды μ_i для количества кластеров, лежащих в диапазоне 5–9 (таблица 2).

Таблица 2 – Центроиды μ_i

Число кластеров	Значения центроида
5	(261.0, 300.0, 333.0, 373.0, 433.5)
6	(242.0, 263.7, 300.3, 333.0, 373.0, 433.5)
7	(242.0, 263.7, 300.3, 333.0, 360.0, 386.0, 433.5)
8	(242.0, 257.0, 266.4, 300.3, 333.0, 360.0, 386.0, 433.5)
9	(242.0, 257.0, 266.4, 300.3, 333.0, 360.0, 386.0, 429.0, 438.0)

Заметим, что оптимальное число кластеров для решения данной задачи – это 5, т. к. при большем делении на кластеры выделяются отдельные статистические значения количества чрезвычайных ситуаций и не происходит перехода к качественным характеристикам, т. е. информация просто заменяется и идентифицировать ее будет довольно легко.

Исходя из этого, получим следующие кластеры и значения количества чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации, принадлежащих определенному кластеру (таблица 3).

Таблица 3 – Кластеры количества чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации

Кластер	Значения, входящие в кластер
C_1	242, 257, 257, 262, 266, 266, 266, 272
C_2	297, 299, 305
C_3	331, 335
C_4	360, 386
C_5	429, 438

После определения кластеров осуществим проверку стабильности по формуле (6). В данном случае были получены следующие центроиды: $\mu_0 = [261.0, 300.0, 333.0, 373.0, 433.5]$ и $\mu_1 = [261.00, 300.33, 333.00, 373.00, 433.50]$. Проверка сходимости показала, что $\rho_e(\mu_1, \mu_0) = 0.33$. в рассматриваемой ситуации значение заданного порога было $\varepsilon = 0.1$ (отклонение от центроидов должно быть меньше 10%), следовательно, проверка сходимости не выполнена ($0.33 > 0.1$).

При осуществлении шага 4 заметим, что центроиды практически не изменились, назначение точек не изменится. Все точки останутся в тех же кластерах. При пересчете центроидов получим те же значения $\mu_1 = \mu_2$. Отсюда следует, что сходимость достигнута, так как $\rho_e(\mu_2, \mu_1) = 0 < 0.1$.

Таким образом, зная все кластеры (таблица 2), можно осуществить переход от количественных значений чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации к качественным характеристикам исходных значений (таблица 4).

Таблица 4 – Качественные характеристики показателей количества чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации

Год	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Кластер	C_5	C_4	C_2	C_5	C_3	C_1	C_1	C_2	C_1
Год	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
Кластер	C_1	C_1	C_3	C_4	C_1	C_2	C_1	C_1	

Проведенный численный приме доказал необходимость перехода от количественных статистических данных к качественным характеристикам. На основе данных о количестве чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации за период с 2009 по 2025 год с использованием метода k -средних была выполнена кластеризация исходных значений в 5 групп, что облегчает обработку статистических данных ЛПР (см. рис. 1 и рис. 2). Оптимальность выбора пяти кластеров обусловлена тем, что при большем числе кластеров происходит дробление данных на отдельные значения без формирования содержательных категорий.

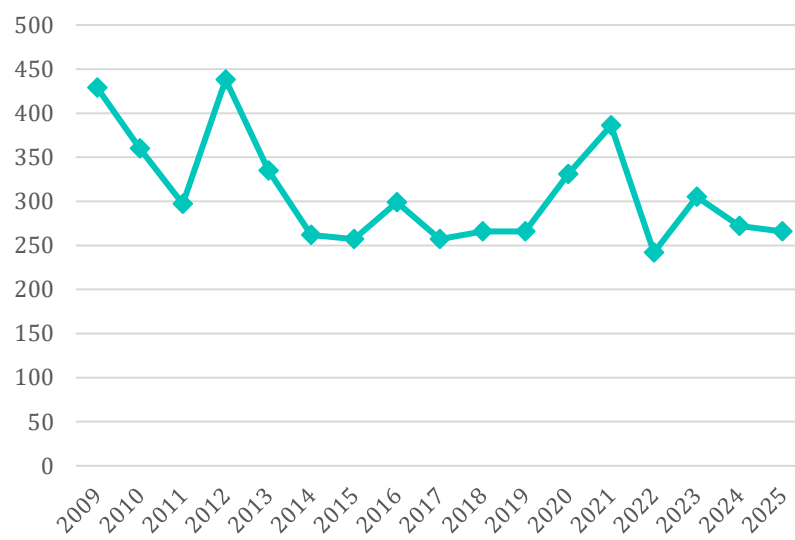
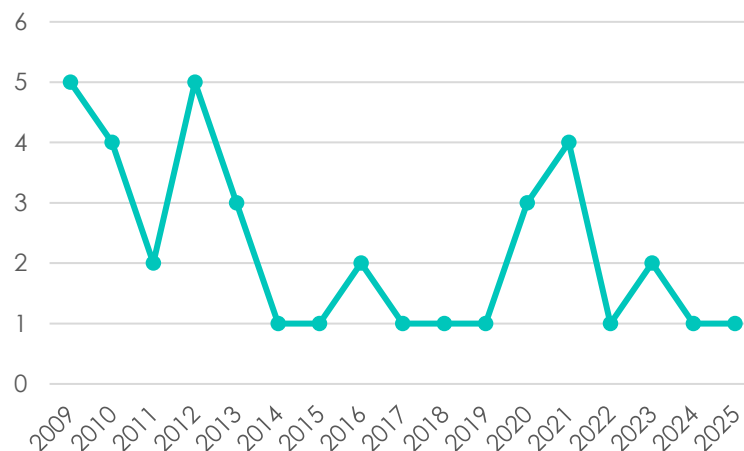


Рисунок 1 – Статистические данные о количестве чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации



Качественные характеристики показателя «Количества чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации»

Сформированные кластеры позволяют осуществить вербализацию описания количества чрезвычайных ситуаций (таблица 5).

Таблица 5 – Качественные характеристики показателя «Количество чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации»

Классы качественных характеристик ЧС	Года
Ординарный	2014, 2015, 2017, 2018, 2019, 2022, 2024, 2025
Экстраординарный	2011, 2016, 2023
Опасный	2013, 2020
Близкий к критическому	2010, 2021
Критический	2009, 2012

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход от количественных статистических данных к качественным характеристикам является необходимым условием повышения эффективности принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций. Данный подход обеспечивает снижение когнитивной нагрузки на ЛПР, смысловую интерпретацию данных, реализацию принципа приоритизации и унификацию межведомственной коммуникации. Разработанный алгоритм кластеризации на основе модифицированного метода k -средних с учетом весовых коэффициентов и выбора метрики близости демонстрирует высокую адаптивность к различным типам статистических данных и позволяет формировать содержательные категориальные оценки. Ограничение числа кластеров интервалом 5–9 в соответствии с числом Миллера обеспечивает оптимальный баланс между детализацией информации и удобством ее восприятия, что подтверждено результатами численного примера. Вербальное описание количественных статистических данных о чрезвычайных ситуациях на территории Российской Федерации за период с 2009 по 2025 год продемонстрировало возможность формирования 5 интерпретируемых категорий, пригодных для интеграции в системы кризисного управления. Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией метода для многомерных показателей статистических данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Математическое моделирование действий органов внутренних дел в чрезвычайных обстоятельствах / В. В. Меньших, А. Ф. Самороковский, В. В. Горлов [и др.]. – Воронеж : Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2016. – 187 с.
2. Орлов А. И. Нечисловая статистика / А. И. Орлов. – Москва : МЗ-Пресс, 2004. – 513 с.
3. Морозова В. О. Модели и алгоритмы оценки и прогнозирования показателей, используемых при осуществлении аналитической работы сотрудниками правоохранительных органов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозова Валерия Олеговна. – Воронеж, 2023. – 194 с.
4. Меньших А. В. Модель получения лингвистических оценок криминогенной ситуации с использованием нечетких оценок показателей правовой статистики / А. В. Меньших, Т. В. Меньших // Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – № 1. – С. 101-107.

5. Миллер Дж. А. Магическое число семь плюс или минус два. О некоторых пределах нашей способности перерабатывать информацию / Дж. А. Миллер. – Москва : Инженерная психология. – 1964. – С. 564-581.
6. Горлов В. В. Описательная модель оптимизации системы оповещения о чрезвычайных ситуациях в Российской Федерации на основе методов математического моделирования / В. В. Горлов // Моделирование систем критического применения. – 2025. – № 1. – С. 47-55.
7. МЧС России. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий : официальный сайт. – Москва. – Обновляется в течение суток. – URL : <https://mchs.gov.ru/> (дата обращения: 13.01.2026). – Текст : электронный.
8. Мандель, И. Д. Кластерный анализ / И. Д. Мандель. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
9. Гущин А. В. Теория и алгоритмы: нечеткие арифметика, кластеризация, синтез знаний и принятие решений в условиях лингвистической неопределенности : учеб. пособие для вузов / А. В. Гущин. – Самара : СамГУПС, 2012. – 96 с.
10. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Теория вероятностей и прикладная статистика : учебник для вузов : в 2 т. 2-е изд., испр. – Т. 1 / С. А. Айвазян В. С. Мхитарян. – Москва : Юнити-Дана, 2001. – 656 с.

Меньших Валерий Владимирович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский институт МВД России, Воронеж, ✉ menshikh@list.ru

Гришаева Валерия Романовна – адъюнкт, Воронежский институт МВД России, Воронеж, ✉ vrkvaleria.2002@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.02.2026

Принята к публикации 19.03.2026

System modeling critical application
№ 1 / 2026

CHOOSING QUALITIVES OF STATISTICAL DATA ON EMERGENCY SITUATIONS

V. V. Menshikh¹, V. R. Grishaeva²

^{1,2}Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia

¹✉ menshikh@list.ru ²✉ vrkvaleria.2002@mail.ru

Abstract. The relevance of this topic stems from the need to optimize the work of decision-makers with large volumes of statistical data in emergency situations. The focus of this study was the transition from quantitative statistical data to qualitative (linguistic) characteristics. The primary objective of the study was to select a method for obtaining qualitative characteristics for decision-making. The methodology is based on clustering using the means method, taking into account the weighting coefficients of indicators and proximity metrics (Euclidean, Manhattan, cosine, Mahalanobis distance); the number of clusters is limited to the interval of 5-9 in accordance with the Miller number. The result was the clustering of statistical data on the number of emergency situations in the Russian Federation

for the period from 2009 to 2025 into five categories, followed by verbalization of danger levels. The scope of application of these results is defined for the crisis management system, the Ministry of Emergency Situations, and law enforcement agencies. The proposed method improves the speed and quality of decision-making due to the transition to qualitative characteristics.

Keywords: statistical data, qualitative characteristics, verbal description, linguistic scale, decision-making, emergency situations, method of averages, metrics, weighting coefficients

REFERENS

1. Mathematical Modeling of Actions of Internal Affairs Bodies in Emergency Situations / V. V. Menshikh A. F. Samorokovsky, V. V. Gorlov [et al.]. – Voronezh : Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, 2016. – 187 p.
2. Orlov, A. I. Non-Numerical Statistics / A. I. Orlov. – Moscow : M3-Press, 2004. – 513 p.
3. Morozova V. O. Models and Algorithms for Assessment and Forecasting of Indicators Used in Analytical Work by Law Enforcement Officers : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Morozova Valeria Olegovna. – Voronezh, 2023. – 194 p.
4. Menshikh, A. V. A Model for Obtaining Linguistic Assessments of the Crime Situation Using Fuzzy Estimates of Legal Statistics Indicators / A. V. Menshikh, T. V. Menshikh // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2024. – No. 1. – P. 101–107.
5. Miller G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: On Some Limits of Our Capacity to Process Information / G. A. Miller. – Moscow : Engineering Psychology. – 1964. – P. 564–581.
6. Gorlov V. V. Descriptive Model for Optimization of the Emergency Alert System in the Russian Federation Based on Mathematical Modeling Methods / V. V. Gorlov // Modeling of Critical Application Systems. – 2025. – No. 1. – P. 47–55.
7. EMERCOM of Russia. Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergency Situations and Elimination of Consequences of Natural Disasters : official website. – Moscow. – Updated within 24 hours. – URL : <https://mchs.gov.ru/> (date of access: 13.01.2026). – Text : electronic.
8. Mandel I. D. Cluster Analysis / I. D. Mandel. – Moscow : Finance and Statistics, 1988. – 176 p.
9. Gushchin A. V. Theory and Algorithms: Fuzzy Arithmetic, Clustering, Knowledge Synthesis and Decision-Making under Linguistic Uncertainty : textbook for higher education institutions / A. V. Gushchin. – Samara : Samara State University of Railway Engineering (SamGUPS), 2012. – 96 p.
10. Aivazyán S. A. Applied Statistics. Fundamentals of Econometrics. Probability Theory and Applied Statistics : textbook for higher education institutions : in 2 vols. 2nd ed., revised. – Vol. 1 / S. A. Aivazyán, V. S. Mkhitaryan. – Moscow : Yuniti-Dana, 2001. – 656 p.

Received 24.06.2026

Accepted 19.03.2026



Персоналии

*Валерий Васильевич Сысоев:
Конфликт, который создает
(15.11.1946 — 27.02.2003)*

Имя Валерия Васильевича Сысоева навсегда вписано в историю отечественной технической кибернетики, информатики и математического моделирования технологических систем. Для его учеников он был не только крупным ученым и организатором науки, но прежде всего Учителем в подлинном, классическом смысле этого слова, человеком, который умел формировать научное мышление, прививать вкус к системному подходу и смелость в постановке задач.

НАЧАЛО ПУТИ: ОТ МАТЕМАТИКА К СИСТЕМОТЕХНИКУ

Валерий Васильевич родился в 1946 году в Воронеже, городе, которому остался верен всю жизнь. В 1970 году он окончил математико-механический факультет Воронежского государственного университета по специальности «Математика, математик-вычислитель». Уже в этот период определился его устойчивый интерес к прикладной математике, вычислительной технике и задачам автоматизации сложных технических систем.

Свою научную деятельность Валерий Васильевич начал в 1970 году в НИИ полупроводникового машиностроения. Именно здесь, на стыке теории и практики, сформировался его стиль исследователя — ориентация на строгую математическую постановку прикладных задач и обязательную проверку результатов в реальных производственных системах.

В 1973 году он поступил в аспирантуру Московского института электронного машиностроения и уже в 1974 году досрочно защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую исследованию и оптимизации параметров линейных технологических процессов полупроводникового производства. Эти работы заложили основы его дальнейших исследований в области оптимального проектирования технологических систем во второй половине 1970-х годов.

Это была эпоха, когда вычислительная техника только начинала проникать в инженерное проектирование. Молодой ученый сразу взял курс на практику – были предложены скалярные модели расчёта запусков, длительности операций, параметров оборудования и структуры производственных линий. Эти исследования стали важным шагом к отказу от интуитивного проектирования и переходу к формализованным, вычислительно реализуемым процедурам выбора. Уже тогда в работах В.В. Сысоева проявился системный подход, который станет его визитной карточкой.

РОЖДЕНИЕ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ: МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Конец 70-х – 80-е годы стали временем формирования уникальной научной школы под руководством В.В. Сысоева. Он одним из первых в стране осознал ограниченность однокритериальных (скалярных) моделей для сложных технологических систем. Под влиянием ведущих ученых страны (Л.А. Растригина, Ю.Б. Гермейера и др.) он смело повернул свои исследования в сторону векторной (многокритериальной) оптимизации.

В 1982 году выходит его фундаментальная монография «Автоматизированное проектирование линий и комплектов оборудования полупроводникового и микроэлектронного производства», где были заложены основы теории векторных моделей оптимального проектирования. Он разрабатывал двухэтапные схемы поиска решений: сначала построение множества Парето (набора компромиссных вариантов), а затем выбор наилучшего с помощью функций полезности и экспертных оценок. Это был прорыв, позволивший инженерам не просто «посчитать», а принимать обоснованные решения в условиях противоречивых критериев.

В 1985 году блестящая защита докторской диссертации подвела черту под этим этапом и открыла новый. Его мысли все больше занимало системное моделирование как методологическая основа для создания систем автоматизированного проектирования. Результатом стала монография «Структурные и алгоритмические модели автоматизированного проектирования производства изделий электронной техники» 1993 года, в которой была предложена целостная структурно-алгоритмическая модель автоматизированного проектирования. Он мыслил не отдельными задачами, а информационно-логическими схемами всего процесса, от базы данных до алгоритмов принятия решений.

Значительное место в научном наследии Валерия Васильевича занимает развитие методов системного и статистического моделирования. Им и его учениками были предложены подходы к использованию регрессионного анализа, стохастических сетей, теории массового обслуживания и надёжности для описания сложных технологических процессов.

Особое внимание уделялось переходу от формального статистического контроля к диагностическому и причинному анализу, что позволило создавать интеллектуальные системы контроля и управления производством, включая автоматизированные системы тестового контроля больших интегральных схем.

РАСЦВЕТ: ТЕОРИЯ КОНФЛИКТА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

90-е и начало 2000-х годов стали временем развития нового направления. В.В. Сысоев обобщил свои исследования сложных взаимодействий в системах в теорию конфликта, применительно к техническим системам. Он видел конфликт не как негативное явление, а как фундаментальное свойство любой сложной системы, где цели элементов или подсистем противоречат друг другу. Организованная им в 2000 году первая Всероссийская конференция «Теория конфликта и ее приложения» стала признанием этого нового научного направления. Его работы по конфликту в

многоцелевых системах управления, в сетях автоматов, в стохастических системах открыли новые горизонты для анализа и синтеза роботизированных, информационных и управляющих комплексов.

Параллельно он активно развивал прикладные информационные технологии. Под его руководством создавались автоматизированные системы для самых разных отраслей: от тестового контроля производства микросхем (система СТАН-БИС) до управления перерабатывающими предприятиями. Он был соавтором патентов на уникальные силовые импульсные системы – гидropневматические молоты, доказывая, что правильная теория порождает революционные технические решения.

С 1992 по 1996 год профессор Сысоев В.В. занимал пост проректора по научной работе Воронежской государственной технологической академии, во многом определяя стратегию её развития в сложные постсоветские годы.

Но главным своим делом он считал руководство кафедрой математического моделирования технологических систем, которую основал и возглавил в 1988 году. Здесь полностью раскрылся его талант. Под его руководством выросла целая научная школа, защитились десятки кандидатов и докторов наук. Он не просто передавал знания — он воспитывал образ мыслей, сочетающий строгость математического аппарата с инженерной интуицией и системным видением.

Его работы в области теории конфликта в технических системах логично привели его к активной роли в становлении нового научного направления — искусственного интеллекта. В те годы, когда многие ещё смотрели на искусственный интеллект с недоверием, Валерий Васильевич ясно понимал его стратегическую важность как естественного вектора развития всей технической кибернетики. Он не просто изучал теорию, а деятельно способствовал её развитию, возглавив региональное отделение Российской ассоциации искусственного интеллекта, объединяя учёных и инженеров вокруг этой перспективной темы.

Валерий Васильевич неоднократно получал гранты федерального уровня государственные стипендии, работал в редколлегиях десятков изданий, возглавлял оргкомитеты конференций.

Его вклад в науку и образование был высоко оценён. В октябре 1996 года за заслуги перед государством, многолетний добросовестный труд и большой вклад в укрепление дружбы и сотрудничества между народами В.В. Сысоеву было присуждено почетное звание "Заслуженный деятель науки Российской Федерации".

СЛЕД, КОТОРЫЙ НЕ СТИРАЕТСЯ

В жизни он был человеком деятельным, открытым и отзывчивым. Его энергия и готовность помочь коллегам и студентам стали легендой. Жизнь Валерия Васильевича оборвалась 27 февраля 2003 года. Прямо с ректорского совещания его увезли в больницу, врачи констатировали обширный инсульт, ничем не смогли помочь... Он ушёл в разгаре работы, полный планов и идей...

Проститься с ним пришли не только те люди, с которыми дружил или работал Валерий Васильевич, но и те, кого он коснулся только чуть-чуть — широкий круг людей от студента до профессора. И это не случайно, если у него была малейшая возможность помочь человеку — он реализовывал ее, причем бескорыстно, невзирая на загруженность и усталость.

К счастью, идеи Валерия Васильевича Сысоева живы. Его подход к системному и многокритериальному моделированию стал стандартом в области САПР и управления сложными системами. Разработанные им методы применяются в цифровом проектировании, в анализе данных, в создании интеллектуальных систем управления.

Его научная школа не распалась – она трансформировалась в сообщество ученых, для которого работы Учителя остаются фундаментом и источником вдохновения. Каждая конференция по системному анализу, каждое исследование в области векторной оптимизации или теории конфликта незримо несут в себе частицу его мысли.

Г.В. Абрамов, В.В. Алексеев, Н.В. Акамсина, С.В. Белокуров,
Ю.В. Бугаев, В.Е. Дидрих, А.В. Калач, А.Н. Копылов,
В.В. Лавлинский, Я.Е. Львович, М.Г. Матвеев, А.В. Мельников,
В.В. Меньших, Л.Е. Мистров, Б.Е. Никитин, В.И. Новосельцев,
О.В. Пьянков, В.А. Родин, С.В. Родин, С.В. Синегубов,
Р.А. Солодуха, В.И. Ряжских, С.М. Ситник, С.В. Скрыль,
В.И. Сумин, Д.В. Сысоев, С.В. Чикунов

ПЕРЕЧЕНЬ НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ РАБОТ В. В. СЫСОЕВА

1. Сысоев В. В. Действие системы / В. В. Сысоев, Д. В. Сысоев // Системы управления и информационные технологии. – 2005. – № 1(18). – С. 51.
2. Сысоев, В. В. Структурная модель процесса принятия решений в иерархической системе / В. В. Сысоев, Д. В. Сысоев // Системы управления и информационные технологии. – 2004. – № 4(16). – С. 49-50.
3. Сысоев В. В. Имитационное моделирование информационных и технологических систем : учебное пособие / В. В. Сысоев, И. О. Павлов, А. В. Лемешкин ; В.В. Сысоев, И.О. Павлов, А.В. Лемешкин ; Министерство образования Российской Федерации; Воронежская государственная технологическая академия. – Воронеж : Воронежская государственная технологическая академия, 2003. – 152 с.
4. Сысоев В. В. Моделирование дискретных измерительных информационных систем ситуационного управления в их структурно-параметрическом представлении / В. В. Сысоев, Ю. С. Сербулов, Р. А. Солодуха. Книга 3. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2003. – 113 с.
5. Дидрих В. Е. Современные тенденции информатизации процессов организационного управления / В. Е. Дидрих, В. В. Сысоев, Н. Г. Филонов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2003. – № 1. – С. 18-21.
6. Алгоритмизация задачи управления аппаратом приготовления резиновых смесей для шинного производства / С. А. Чепелев, К. В. Коровин, В. В. Сысоев, Н. Г. Филонов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2003. – № 2. – С. 90-92.
7. Сысоев В. В. Информационные технологии формирования класса альтернативных моделей силовых автоколебательных систем / В. В. Сысоев, Г. И. Скоморохов, Н. Г. Филонов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2003. – № 4. – С. 77-79.
8. Dolgui A. Une heuristique d'optimisation globale basée sur la Ψ -transformation / A. Dolgui, V. Sysoev // RAIRO. Recherche Operationnelle. – 2003. – Vol. 37, No. 2. – P. 119-141.
9. Меньших В. В. Декомпозиция исследования взаимоотношений элементов систем / В. В. Меньших, В. В. Сысоев // Теория конфликта и ее приложения : Материалы II Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 01 января – 31. 2002 года. – Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 2002. – С. 144-146.
10. Сысоев В. В. Об одном алгоритме построения парето-оптимального множества решений задач управления / В. В. Сысоев, В. В. Меньших, О. В. Пьянков // Компьютерные технологии автоматизированного проектирования систем

- машиностроения и аэрокосмической техники. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2002. – С. 159-165.
11. Сысоев В. В. Системное моделирование в проектировании структуры содержания региональных открытых студенческих олимпиад по программированию и компьютерному моделированию / В. В. Сысоев, О. Д. Горбенко, О. Ф. Ускова // Теория конфликта и ее приложения : Материалы II Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 01 января – 31 2002 года. – Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 2002. – С. 251.
 12. Белокуров С. В. Структурно-логическая модель отсева решений на итерациях поиска векторных задач оптимизации / С. В. Белокуров, В. В. Сысоев // Повышение эффективности лесозаготовок малолесных районов России : Межвузовский сборник научных трудов по материалам Международной конференции, Воронеж, 23–25 октября 2001 года / Председатель редколлегии Ф. В. Пошарников. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2002. – С. 61-63.
 13. Белокуров С. В. Классификация ситуаций выбора и анализ способов формализации численных векторных схем / С. В. Белокуров, В. В. Сысоев // Компьютерные технологии автоматизированного проектирования систем машиностроения и аэрокосмической техники. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2002. – С. 88-106.
 14. Sysoev V. V. Construction specific features of monitoring models of one-place and multi-place radio frequencies relations between interacting radioelectronic objects / V. V. Sysoev V. A. Dikarev, V. P. Likhachev // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2002. – Vol. 45, No. 11. – P. 19-28.
 15. Sysoev V. V. Adaptive parameters estimation of mixed random processes with a priori uncertain configuration / V. V. Sysoev, I. V. Miloserdov, V. A. Dikarev // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2002. – Vol. 45, No. 3. – P. 42-49.
 16. Sysoev V. V. Algorithm for parameter filtering of a mixed random process with a priori uncertain transition probability / V. V. Sysoev, I. V. Miloserdov, V. A. Dikarev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2002. – Vol. 36, No. 3. – P. 9-17.
 17. Menshikh V. V. Conflict interactions in the course of synthesis of the parameters of control actions in multiple-objective control systems / V. V. Men'shikh, V. V. Sysoev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2002. – Vol. 36, No. 6. – P. 29-32.
 18. Сысоев В. В. Алгоритм построения множества Парето при решении задачи векторной оптимизации / В. В. Сысоев, В. В. Меньших, О. В. Пьянков // Вестник Воронежского института МВД России. – 2002. – № 1. – С. 133-138.
 19. Сысоев, В. В. Построение пространств достижимости в структурных исследованиях систем / В. В. Сысоев, В. В. Меньших // Кибернетика и технологии XXI века : Материалы II Международной научно-технической конференции, Воронеж, 23–24 октября 2001 года / Институт системного анализа РАН; Институт проблем управления РАН. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2001. – С. 595-603.
 20. Чепелев С. А. От независимости до катастрофы / С. А. Чепелев, В. В. Сысоев // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса : межвузовский сборник научных трудов / под редакцией В. С. Петровского; Министерство образования Российской Федерации, Воронежская государственная лесотехническая академия. Том 6. – Воронеж : Воронежская государственная лесотехническая академия, 2001. – С. 358-361.

21. Скоморохов Г. И. Исчисление отношений элементов автоколебательных систем в условиях конфликта / Г. И. Скоморохов, В. В. Сысоев // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий : материалы международной конференции и Российской научной школы, Москва-Воронеж-Сочи, 01–05 октября 2001 года. Том Часть 6. – Москва-Воронеж-Сочи: Воронежский государственный технический университет, 2001. – С. 91-94. – EDN WNDYDA.
22. Сысоев В. В. Исследование взаимоотношений в системе теорией представлений графов / В. В. Сысоев, В. В. Меньших // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2001. – № 4. – С. 48-52. – EDN XDNZKP.
23. Лавлинский В. В. Модель выявления закономерностей преодоления средств защиты информации / В. В. Лавлинский, В. В. Сысоев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2001. – № 4. – С. 78-81.
24. Сысоев В. В. Исследование конфликтных взаимодействий в процессе синтеза параметров управляющих воздействий / В. В. Сысоев, В. В. Меньших // Кибернетика и технологии XXI века : Сборник трудов конференции, Воронеж, 24–25 октября 2000 года. – Воронеж: Воронежский научно-исследовательский институт связи, 2000. – С. 145-151. – EDN WBJNJF.
25. Сысоев В. В. Структурные исследования графов систем и их приложения к декомпозиции задачи исследования конфликтов / В. В. Сысоев, В. В. Меньших // Теория конфликта и ее приложения : Материалы I Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 26–29 июня 2000 года / Воронежская государственная технологическая академия. – Воронеж: Воронежская государственная технологическая академия, 2000. – С. 21-23. – EDN WBJNMH.
26. Скоморохов Г. И. Теоретико-множественный подход к синтезу функционального центра силовой импульсной системы / Г. И. Скоморохов, В. В. Сысоев // Прикладные задачи механики и тепломассообмена в авиационном строении : труды международной научно-технической конференции, Воронеж, 22–24 ноября 2000 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2000. – С. 86-90.
27. Чепелев С. А. Системы конфликтного управления / С. А. Чепелев, В. В. Сысоев // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса : межвузовский сборник научных трудов / Под редакцией В. С. Петровского; Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации, Воронежская государственная лесотехническая академия. Том Выпуск 5. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2000. – С. 331-341.
28. Исследование взаимодействий в сети конечных детерминированных автоматов / В. В. Сысоев, В. В. Меньших, Р. А. Солодуха, С. В. Забияко // Радиотехника. – 2000. – № 9. – С. 65-67.
29. Математическое моделирование детерминированных технологических систем / В. В. Сысоев, М. Г. Матвеев, Ю. В. Бугаев, В. И. Рязских. – Воронеж : Воронежский технологический институт, 1994. – 98 с.

УДК:

НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

А. А. Первый¹, Б. Б. Второй²

¹Организация первая

²Организация вторая

¹✉ pervy@mail.ru ²✉ vtoroy@mail.ru

Аннотация. Аннотация в научном журнале представляет собой источник информации о содержании статьи и изложенных в ней результатах. Основные требования к аннотации заключаются в ее информативности и оригинальности. Объем аннотации должен быть в среднем от 100 до 150 слов, т. е. аннотация должна быть развёрнутой. Не следует разбивать аннотацию на несколько абзацев. В аннотации, как правило, отражаются: предмет, тема, цель работы; применяемый метод или методология; полученные результаты и область их применения; выводы. Не следует повторять заголовок статьи, не допускаются ссылки на позиции списка литературы, сноски. Аннотация должна быть четко структурирована, её содержание должно следовать логике изложения материала статьи. Текст должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, отличаться убедительностью формулировок. Следует употреблять глаголы в прошедшем времени совершенного вида: введены, выполнен анализ, даны, доказано, изложены, исследовано, обсуждены, описаны, определены, отмечены, показаны, получены, поставлена, предложены, представлены, приведены, проиллюстрированы, сформулированы, рассмотрены, уделено внимание, указаны и т. д., и т. п.

Ключевые слова: от 3 до 10 слов или словосочетаний

ВВЕДЕНИЕ

Все стили, необходимые для оформления статьи, начинаются с аббревиатуры МСКП.

Введение и заключение не нумеруются. Для соответствующих заголовков используйте стиль «МСКП Введение/Заключение». Для основного текста по всей статье используйте стиль «МСКП Текст статьи».

Элементы текста, на которых Вам хотелось бы акцентировать внимание читателя, можно выделить полужирным шрифтом или курсивом. Не рекомендован шрифт с нижним подчёркиванием.

Для оформления заголовков других параграфов (разделов) используйте стиль «МСКП Заголовок параграфа».

1. ТАБЛИЦЫ И РИСУНКИ

Таблицам присваиваются порядковые номера, для этого используйте стиль «МСКП Номер таблицы». Если в статье одна таблица, номер ей не присваивается. Для текста внутри самой таблицы – стиль «МСКП Текст таблицы».

В головке и (или) боковике таблицы следует дать обозначения или названия величин, значения которых размещены в ячейках таблицы. Единицы измерения

указываются в системе СИ. В пустых ячейках ставятся прочерки. Также необходимо во вкладке «Макет» в группе «Размер ячейки» выбрать «Автоподбор по содержимому».

Ссылки на таблицы в тексте статьи оформляются так: таблица 1, таблица 2 и т.д.

Таблица 1 – Заголовок таблицы

Заголовок 1	Заголовок 2
ячейка 11	ячейка 12
ячейка 21	ячейка 22
ячейка 31	ячейка 32

Для оформления рисунка используйте стиль «МСКП Рисунок» для подписи рисунка используйте стиль «МСКП Название рисунка». Ссылка на рисунок должна быть до рисунка. Пример ссылки на рисунок (рис. 1 или см. рис. 1)

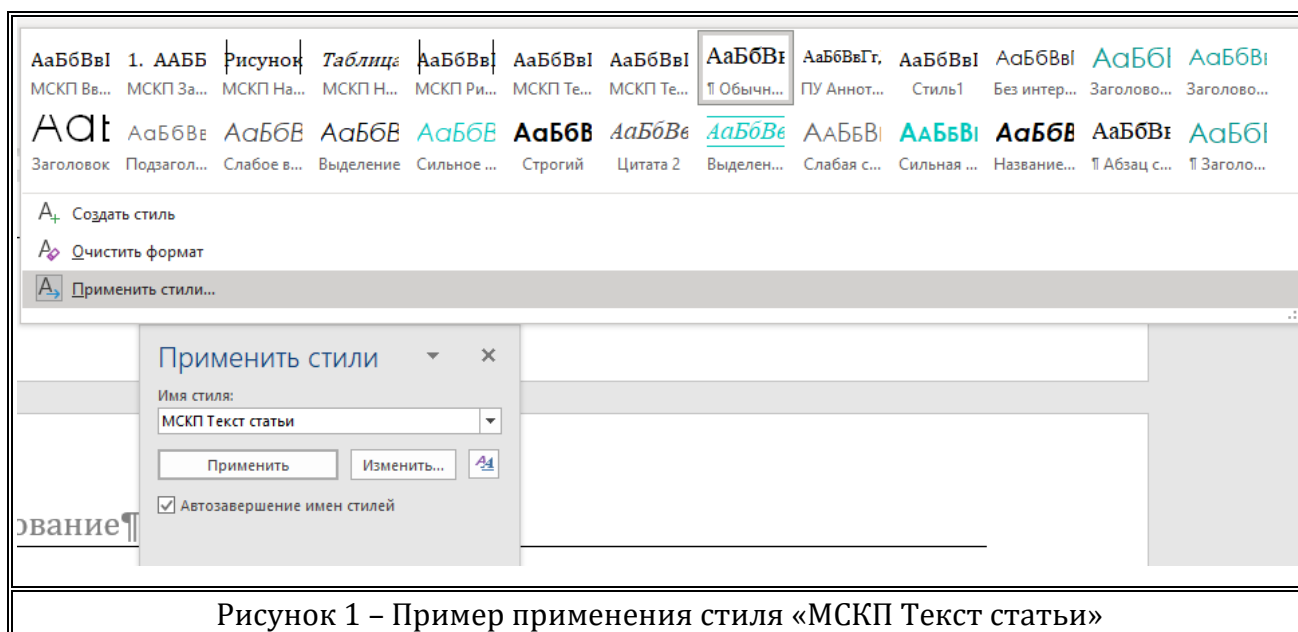


Рисунок 1 – Пример применения стиля «МСКП Текст статьи»

2. ФОРМУЛЫ

Математические формулы набирать ТОЛЬКО в формульном редакторе MathType. Для оформления формул используйте стиль «МСКП Формула». Греческие и русские буквы в формулах набираются прямым шрифтом (опция «Style\Text»), латинские – *курсивом* (опция «Style\Math»), размер шрифта (опция «Size\Define») для основных символов – 12 пт; подстрочный индекс – 70 %; подподстрочный индекс – 60 %; символ 17 pt (см. рис. 2). Все обозначения величин в формулах и таблицах должны быть раскрыты в тексте. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем изложении. Нумерация формул сквозная. Номер формулы располагается по правому краю и заключается в скобки. Рекомендуется оформлять формулы как формулу (1):

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (1)$$

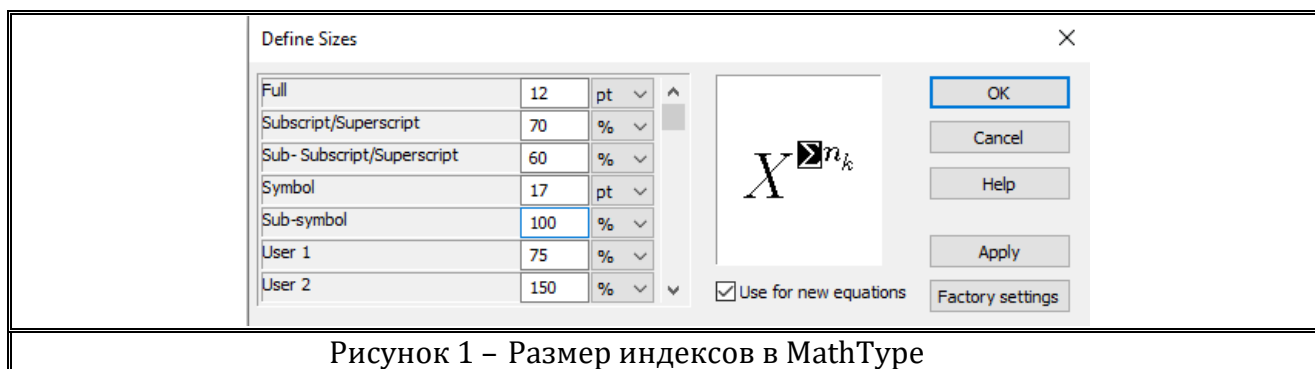


Рисунок 1 – Размер индексов в MathType

Ссылки на формулы в тексте также заключаются в скобки (см., к примеру, формулу (1)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рубрики Журнала:

Математическое моделирование;

Управление в организационных системах

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для оформления рубрики используйте стиль «МСКП Рубрика»

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список литературы должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

Для оформления заголовка раздела используйте стиль «МСКП Литература», для пунктов списка – стиль «МСКП Пункт списка литературы», при этом Ф.И.О. авторов должны быть выделены курсивом.

Источники в списке указываются в порядке появления ссылок на них в тексте статьи. Сами ссылки проставляются в виде номера, заключённого в квадратные скобки (к примеру, [1]).

Все позиции списка цитированной литературы на русском языке должны быть продублированы на английском языке, а при отсутствии англоязычных метаданных – транслитерированы по стандарту BSI (<https://transliteration.pro/bsi>).

Примеры оформления ссылок на литературу:

На книгу

1. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
2. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. – Philadelphia: SIAM, 1994. – 212 p.
3. Баландин Д.В., Коган М.М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. – М.: Физматлит, 2007. – 280 с.

На книгу под редакцией

4. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с. [*Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. A.A. Krasovskogo. – M.: Nauka, 1987. – 712 s. (In Russian)*]

На статью из журнала

5. *Белянин А.В., Бессонов В.А.* О российской экономической науке и научном сообществе // Экономический журнал ВШЭ. – 2011. – Т. 15, № 2. – С. 265–268.
6. *Мальцев А.А.* Российское сообщество экономистов: особенности и перспективы // Вопросы экономики. – 2016. – № 11. – С. 135–158
7. *Квинто Я.И., Хлебников М.В.* Верхние оценки больших отклонений в линейных системах при наличии неопределенности // Проблемы управления. – 2018. – № 3. – С. 2–7.
8. *Поляк Б.Т., Тремба А.А., Хлебников М.В.* и др. Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 6. – С. 18–41.

На доклад из сборника трудов конференции

9. *Мальцев А.А.* Роль научной диаспоры в интеграции российской экономической науки в глобальное научно-образовательное пространство // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики: Сб. науч. статей XV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Екатеринбург, 2017. – С. 342–345.

Если авторов не более четырёх, то указываются все авторы. Если авторов более четырех, то указываются только первые три автора: Первый И.И., Второй П.П., Третий С.С. и др.

В конце статьи указываются сведения об авторах в следующем формате:

Фамилия Имя Отчество (при наличии) – учёная степень (сокращённо), ученое звание, место работы, город, ✉ e-mail:

Статья поступила в редакцию ____.

Сокращение ученых степеней производить в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Сокращения ученых степеней

Сокращение	Полное написание
Учёные степени	
д-р архитектуры	доктор архитектуры
д-р биол. наук	доктор биологических наук
д-р ветеринар. наук	доктор ветеринарных наук
д-р воен. наук	доктор военных наук
д-р геогр. наук	доктор географических наук
д-р геол.-минерал. наук	доктор геолого-минералогических наук
д-р искусствоведения	доктор искусствоведения
д-р ист. наук	доктор исторических наук
д-р культурологии	доктор культурологии
д-р мед. наук	доктор медицинских наук
д-р пед. наук	доктор педагогических наук
д-р полит. наук	доктор политических наук

д-р психол. наук	доктор психологических наук
д-р социол. наук	доктор социологических наук
д-р с.-х. наук	доктор сельскохозяйственных наук
д-р техн. наук	доктор технических наук
д-р фармацевт. наук	доктор фармацевтических наук
д-р физ.-мат. наук	доктор физико-математических наук
д-р филол. наук	доктор филологических наук
д-р филос. наук	доктор философских наук
д-р хим. наук	доктор химических наук
д-р экон. наук	доктор экономических наук
д-р юрид. наук	доктор юридических наук
канд. архитектуры	кандидат архитектуры
канд. биол. наук	кандидат биологических наук
канд. ветеринар. наук	кандидат ветеринарных наук
канд. воен. наук	кандидат военных наук
канд. геогр. наук	кандидат географических наук
канд. геол.-минерал. наук	кандидат геолого-минералогических наук
канд. искусствоведения	кандидат искусствоведения
канд. ист. наук	кандидат исторических наук
канд. культурологии	кандидат культурологии
канд. мед. наук	кандидат медицинских наук
канд. пед. наук	кандидат педагогических наук
канд. полит. наук	кандидат политических наук
канд. психол. наук	кандидат психологических наук
канд. социол. наук	кандидат социологических наук
канд. с.-х. наук	кандидат сельскохозяйственных наук
канд. техн. наук	кандидат технических наук
канд. фармацевт. наук	кандидат фармацевтических наук
канд. физ.-мат. наук	кандидат физико-математических наук
канд. филол. наук	кандидат филологических наук
канд. филос. наук	кандидат философских наук
канд. хим. наук	кандидат химических наук
канд. экон. наук	кандидат экономических наук
канд. юрид. наук	кандидат юридических наук
Другие звания	
ст. науч. сотр.	старший научный сотрудник
мл. науч. сотр.	младший научный сотрудник
акад.	академик
чл.-корр.	член-корреспондент

По окончании статьи по форме, приведённой ниже, необходимо дать информацию на английском языке: заголовок, Ф.И.О. авторов, аффилиации, адреса электронной почты, аннотацию, ключевые слова; при наличии – сведения о финансировании и благодарности.

ENGLISH TITLE

A. A. Pervy¹, B. B. Vtoroy²

¹Organization of the first

²Organization of the third

¹✉ pervy@mail.ru, ²✉ vtoroy@mail.ru

Abstract.

Keywords:

REFERENS

1. Polyak B.T., Khlebnikov M.V., Shcherbakov P.S. Upravlenie lineinymi sistemami pri vneshnikh vozmushcheniyakh: Tekhnika lineinykh matrichnykh neravenstv. – M.: LENAND, 2014. – 560 s.
2. Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V. Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory. – Philadelphia: SIAM, 1994. – 212 p.
3. Balandin D.V., Kogan M.M. Sintez zakonov upravleniya na osnove lineinykh matrichnykh neravenstv. – M.: Fizmatlit, 2007. – 280 s.
4. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / pod red. A.A. Krasovskogo. – M.: Nauka, 1987. – 712 s.
5. Belyanin A.V., Bessonov V.A. O rossiiskoi ehkonomicheskoi nauke i nauchnom soobshchestve // Ehkonomicheskii zhurnal VSHEH. – 2011. – T. 15, № 2. – S. 265–268.
6. Mal'tsev A.A. Rossiiskoe soobshchestvo ehkonomistov: osobennosti i perspektivy // Voprosy ehkonomiki. – 2016. – № 11. – S. 135–158.
7. Kvinto YA.I., Khlebnikov M.V. Verkhnie otsenki bol'shikh otklonenii v lineinykh sistemakh pri nalichii neopredelennosti // Problemy upravleniya. – 2018. – № 3. – S. 2–7.
8. Polyak B.T., Tremba A.A., Khlebnikov M.V. i dr. Bol'shie otkloneniya v lineinykh sistemakh pri nenulevykh nachal'nykh usloviyakh // Avtomatika i telemekhanika. – 2015. – № 6. – S. 18–41.
9. Mal'tsev A.A. Rol' nauchnoi diasporы v integratsii rossiiskoi ehkonomicheskoi nauki v global'noe nauchno-obrazovatel'noe prostranstvo // Razvitie territorial'nykh sotsial'no-ehkonomicheskikh sistem: voprosy teorii i praktiki: Sb. nauch. statei XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh. – Ekaterinburg, 2017. – S. 342–345.

Received __.__.__

Научное издание

Коллектив авторов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Электронный журнал

Объем 3,6 МБ

Тираж 30 экз.

Воронежский институт МВД России
394065, Воронеж, просп. Патриотов, 53