

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-64098

от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»  
(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)  
Издается с сентября 2014 г.  
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:  
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство лётательных аппаратов]; 2.6. Химическая технология, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП997

Главный редактор  
**Артюшенко Владимир Михайлович,**  
д.т.н., профессор

Над выпуском работали  
Паршина Ю.С.  
Пирогова Е.В.

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-30 (доб. 138),  
E-mail: rio-kimes@mail.ru,  
Site:www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации  
Материалы приводятся в авторской редакции.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ, СТАТИСТИКА

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛИНИЙ ДВУМЕРНЫХ ПЛОТНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ.....3**

Емельянов Е.Г.

**АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ДАННЫХ КАК НАБОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ N-СЛОЕВ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ .....15**

Лукьянов А.А.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ VPN-ПРОТОКОЛОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА НА УСТРОЙСТВАХ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОЦЕССОРНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ.....24**

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Вилаков Н.В., Бочаров М.И.

**КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТЬ В БЛОКЧЕЙН СИСТЕМАХ. УГРОЗЫ ПРИВАТНОСТИ И СПОСОБЫ ДЕАНОНИМИЗАЦИИ.....35**

Орлов А.Д., Дмитренко Е.Н.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОТЕЗОМ МАНИПУЛЯТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА МИНИМАКС .....53**

Плаксин С.И.

**УПРОЩЁННАЯ СТРУКТУРА ГРАФА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПОИСКА ВЛОЖЕННЫХ ЦИКЛОВ ПО ЕЁ ИСПОЛНИМОМУ КОДУ .....65**

Самаров Е.К.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СВОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМИРОВАННОЙ МОЩНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА .....72**

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ионченкова Я.Ю., Самаров Е.К.

**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЛОКАЦИИ ЦЕЛИ В МНОГО ЭЛЕМЕНТНЫХ ПРИЕМНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....79**

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

1. **Барканов Е.Н.**, Dr.sc.ing.
2. **Васильев Н.А.**, д.т.н., профессор
3. **Леоненко Д.В.**, д.ф.-м.н., профессор
4. **Тимофеев А.Н.**, д.т.н., профессор

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

1. **Аббасов Э.М.**, к.т.н.
2. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
3. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
4. **Бершадский В.А.**, д.т.н., профессор кафедры
5. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
6. **Кучеров Б.А.**, к.т.н.
7. **Логачев И.А.**, к.т.н.
8. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
9. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
10. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
11. **Мороз А.П.**, д.т.н., профессор
12. **Мосалов О.П.**, к.ф.-м.н.
13. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
14. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
15. **Самаров Е.К.**, д.т.н., доцент
16. **Скрябин М.Л.**, к.т.н.
17. **Соляной В.Н.**, к.т.н.
18. **Стреналик Ю.В.**, д.т.н., профессор
19. **Халиуллин В.И.**, д.т.н., профессор
20. **Чесноков А.В.**, д.т.н.
21. **Щурин К.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 20.07.2025

Формат 70x100/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 10.

Тираж 500 экз.

Заказ № 3978.

Отпечатано в типографии  
ИП Копыльцов П.И. 394052,  
Россия, г. Воронеж,  
ул. Маршала Неделина, д. 27, кв.  
56. Тел.: 8 (950) 765 69 59

Карноушкин А.И., Кузьмин В.В., Клыгин А.В., Смирнов А.Е.  
**ЗАЩИТА ВЕРТОЛЁТОВ ОТ ОБЛЕДЕНИЯ.....88**

Ковалев И.И., Аббасов Э.М.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖИДКОСТНОГО  
РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ .....109**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Крутикова В.В., Логачев И.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ  
АЗОТИРО-ВАННЫХ ГРАНУЛИЗ ЖАРОПРОЧНОГО  
СПЛАВА НА ОСНОВЕ МОЛИБДЕНА .....121**

Скрябин М.Л.

**ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНей  
СРЕДЫ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....130**

Спирин Б.Л., Фролов С.В.

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ  
ВИРТУАЛЬ-НОГО ЗАКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ  
ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....137**

Цай А.С.

**РАЗРАБОТКА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСПЕРСНЫХ  
НАПОЛНИТЕЛЕЙ: УЛУЧШЕНИЕ  
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК .....152**

УДК 621.391.821:621.396

## **Восстановление параметров изолиний двумерных плотностей распределения вероятности случайных процессов**

**Владимир Михайлович Арtyушенко**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

**Владимир Иванович Воловач**, доктор технических наук, доцент, и.о. директора Высшей школы передовых производственных технологий Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,

Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрены и проанализированы различные методы восстановления параметров поверхности двумерных плотностей распределения вероятностей (ПРВ) (алгебраическими полиномами, фильтрами и другими) случайных процессов, показаны возможности применения для этого программных пакетов. На основании проведенного анализа даны конкретные рекомендации к оптимальному выбору метода и его управляющих параметров при подготовке к моделированию поверхностей ПРВ случайных процессов. Показаны достоинства и недостатки этих методов на различных стадиях восстановления параметров ПРВ. Показано, что на ранней стадии, когда объем информации (выборок) ограничен, целесообразно использовать нейронные сети.*

Двумерная цифровая модель распределения случайного процесса, восстановление параметров изолиний, методы обработки измерительной информации.

## **Reconstruction of the parameters of isolines of two-dimensional probability distribution densities of random processes**

**Vladimir Mikhailovich Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technologies and Control Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**Vladimir Ivanovich Volovach**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Director of the Higher School of Advanced Production Technologies, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Volga Region State University of Service, Tolyatti

*Various methods for reconstructing the parameters of isolines of two-dimensional probability distribution densities (by algebraic polynomials, filters, and*

others) of random processes are considered and analyzed, and the possibilities of using software packages for this are shown. Based on the analysis, specific recommendations are given for the optimal choice of the method and its control parameters in preparation for modeling the surfaces of random processes. The advantages and disadvantages of these methods are shown at various stages of restoring the parameters of the PRV. It is shown that at an early stage, when the amount of information (samples) is limited, it is advisable to use neural networks.

Two-dimensional digital model of the random process distribution, restoration of isoline parameters, methods of measuring information processing.

**Введение.** Для многих задач статистической радиотехники весьма актуальной является проблема, связанная с моделированием поверхности двумерных плотностей распределения вероятностей (ПДПРВ) случайных процессов, обычно отображаемых методом изолиний.

Пример моделирования ПДПРВ при различных коэффициентах корреляции  $r$  представлены на рисунке 1.

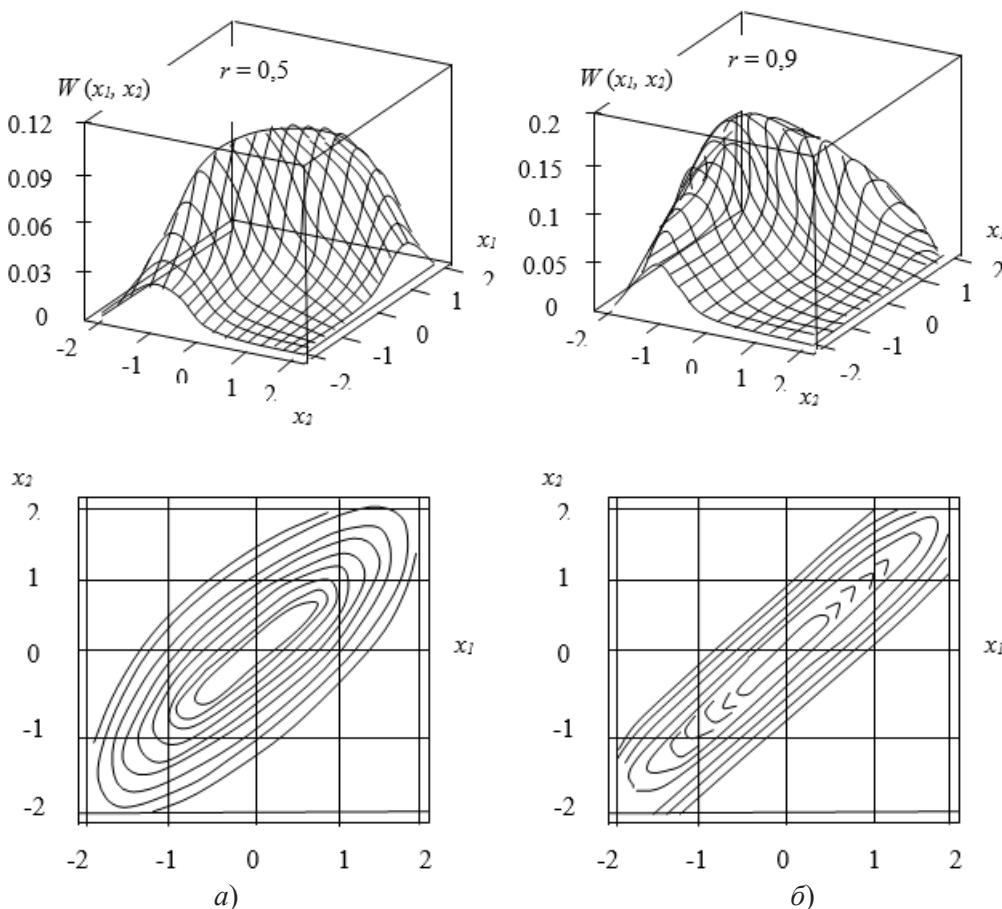


Рисунок 1 – Результаты моделирования двумерных ПРВ и изолинии их поверхностей при: а– $r=0,5$ ; б– $r=0,9$

Поскольку наблюдения обычно имеют дискретный характер, построение двумерной ПРВ случайного процесса связано с необходимостью решать задачу непрерывного восстановления параметров изолиний ПРВ. В тоже время задача восстановления параметров поверхности двумерных ПРВ далеко не тривиальна. Так, если наблюдения существенно нерегулярны, то получить в некотором смысле оптимальное решение чрезвычайно трудно. Поэтому целесообразно создавать автоматизированные банки данных различных методов восстановления поверхностей двумерных ПРВ и их параметров.

Рассмотрим и проанализируем различные методы интерполяции ПДПРВ.

### Интерполяция алгебраическими полиномами.

В этом случае, для расчета точки поверхности  $h$  с координатами  $(x, y)$  можно воспользоваться выражением вида [15]:

$$h(x, y) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{n-j} c_{jk} x^j y^k, \quad (1)$$

где  $k = \overline{0, m}; j = \overline{1, n}$  – показатели степени.

Для определения коэффициентов  $c_{jk}$  из (1) необходимо, чтобы число точек  $n$  удовлетворяло неравенству

$$n \geq \frac{(m+1)(n+2)}{2}. \quad (2)$$

Рассмотрим полином следующего вида, частный случай (1) при  $m = 2$ , то есть уравнение регрессии второго порядка

$$h(x, y) = c_{00} + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2. \quad (3)$$

Уравнение измерений выходной координаты  $h$  для этого случая записывается в виде

$$Z_h = c_{00} + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2 + \delta_h,$$

для определения коэффициентов, которого необходимо выполнить условие  $n \geq 6$ .

В матричном виде модель экспериментальных данных можно представить в виде:

$$\mathbf{Z}_h = \mathbf{X}\boldsymbol{\Theta} + \boldsymbol{\delta}_h,$$

где  $\mathbf{Z}_h = \|Z_{1h}, Z_{2h}, \dots, Z_{nh}\|$  – вектор измерений выходной координаты  $h$ ;  $n$  – количество точек наблюдений (измерений);  $\boldsymbol{\Theta} = \|c_{00}, c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}\|^T$  – вектор искомых коэффициентов; Т – математический символ транспонирования матрицы. Здесь

$$\mathbf{X} = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 \\ - & - & - & - & - & - \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 \end{vmatrix} \text{ – структурная матрица.} \quad (4)$$

Заметим, что определитель системы уравнений (3) будет обращаться в нуль, если шесть точек наблюдений будут лежать на кривой второго порядка, то есть сеть наблюдений не может располагаться произвольно [1, 14].

**Метод наименьших квадратов рекуррентной формы (фильтры).** Как известно [13], рекуррентные алгоритмы позволяют запоминать не весь объем измерительной информации, а по мере поступления новых результатов измерений получать текущие оценки исследуемых параметров, что приводит к оперативности этих алгоритмов.

Представим модель (3) в векторной форме

$$\mathbf{Z}_h(k) = \mathbf{X}(k)\boldsymbol{\theta}(k),$$

где  $\mathbf{X}(k) = \|1, x(k), y(k), x^2(k), y^2(k)\|$  – вектор входных координат;  $k$  – номер итерации.

Рекуррентная форма МНК для оценивания вектора  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  при интерполяции записывается в виде следующего фильтра:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + K(k)(\mathbf{Z}_h(k) - \mathbf{X}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)); \\ K(k) &= \mathbf{D}(k-1)\mathbf{X}^T(k)[\mathbf{D}_{\mathbf{Z}_h}(k) + \mathbf{X}(k)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{X}(k)]^{-1}; \\ \mathbf{D}(k) &= \mathbf{D}(k-1) - \mathbf{D}(k-1)\mathbf{X}^T(k)\mathbf{X}(k)\mathbf{D}(k-1) \times \\ &\times [\mathbf{D}_{\mathbf{Z}_h}(k) + \mathbf{X}(k)\mathbf{D}(k-1)\mathbf{X}(k)]^{-1}, \end{aligned}$$

где  $K(k)$  – коэффициент усиления фильтра;  $\mathbf{D}(k)$  – дисперсионная матрица погрешностей оценок;  $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = 0$ .

Использование фильтров (рекуррентных алгоритмов) для вычисления оценок приводит к уменьшению компьютерного времени и экономии оперативной памяти, так как позволяет обойтись одним обращением матрицы небольшого размера. Однако во избежание потери точности необходимо через конечное число шагов проводить обращение матрицы более высокого порядка, то есть обновлять значение  $\mathbf{X}(k)$ . Естественно, при этом теряется преимущество рекуррентных (итерационных) алгоритмов. Принято говорить, что итерационные алгоритмы «обменивают» память на время.

Таким образом, использование алгебраических полиномов, а также рациональных дробей, имеет существенный недостаток: их поведение в окрестностях какой-либо точки определяет изменчивость параметра на всей плоскости. Поэтому разработаны другие методы восстановления функций, свободные от указанного недостатка. В этом отношении хорошо зарекомендовал себя аппарат сплайн-функций, так как колебательный характер сплайнов уменьшается по мере удаления от точек наблюдения (измерений). В последнее время большой попу-

лярностью стали пользоваться различные сплайновые методы интерполяции.

**Сплайн-интерполяция.** Согласно этому методу, задача восстановления двумерной функции  $h(x, y)$  по ее значениям  $\hat{h}_i$  в точках  $(x_i, y_i), i = \overline{1, n}$  формулируется как задача построения сплайна на нерегулярной сети узлов исходных данных [14]. Если сплайн-функция  $h(x, y)$  удовлетворяет условиям

$$\iint_{\Omega} (\Delta h(x, y))^2 d\Omega = \iint_{\Omega} \left( \frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x, y)}{\partial y^2} \right)^2 dx dy = \min_{W_2^2}; \quad (5)$$

$\Omega$  – двумерная ограниченная область имеет минимальную кривизну;

$$h(x_i, y_i) = \hat{h}_i, i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

то есть функция проходит через точки измерений, а также удовлетворяет условиям гладкости и непрерывности, то она определяется формулой

$$h(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \beta_i r \ln r + \beta_{n+1} + \beta_{n+2} + \beta_{n+3} y, \quad (7)$$

где  $W_2^2$  – класс функций, имеющих суммируемые с квадратом вторые производные;  $r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ ;  $\beta_i, i = \overline{1, n+3}$  – коэффициенты, которые находятся из условий

$$h(x_i, y_i) = \hat{h}_i; \sum_{i=1}^n \beta_i = 0; \sum_{i=1}^n \beta_i x_i = 0; \sum_{i=1}^n \beta_i y_i = 0.$$

Таким образом, получаем систему  $n + 3$  линейных уравнений с  $n + 3$  неизвестными, у которых все элементы главной диагонали равны нулю ( $a_{ii} = 0$ ) и которую можно решить методом обратной матрицы [14]

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} & 1 & x_1 & y_1 \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} & 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} & . & x_n & y_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \\ \beta_{n+1} \\ \beta_{n+2} \\ \beta_{n+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{h}_1 \\ \hat{h}_2 \\ \vdots \\ \hat{h}_n \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Такое представление удачно тем, что вариационная задача (5), (6) имеет аналитическое решение (7), вследствие чего отпадает необходимость задания вида интерполирующих базисных функций.

Заметим, что с помощью сплайнов можно добиться хорошего приближения при неравномерно расположенных данных, а это позволяет учитывать при необходимости экстремальные точки и структурные линии изображений на

ПДПРВ. Однако сплайн-функция плохо отображает области резкого изменения градиентов интерполируемой поверхности. В тоже время специальные линейные функционалы от сплайнов и весовые множители позволяют использовать при интерполяции неравноточную информацию с различным весом, учитывать производные по заданному направлению.

**Геостатистический метод (кригинг).** Это наиболее сложный метод. В нем заложены некоторые принципы метода оптимальной интерполяции. Данный метод требует введения понятий регионализации переменной, вариограммы и полувариограммы; весовой функцией в нем служит, по аналогии с геополем [6], пространственная автокорреляционная функция ПДПРВ, отражающая его статистическую структуру. Рассчитанные автокорреляционные функции используются в системе уравнений для вычисления весовых соотношений, исходя из условия минимума стандартной погрешности оценки.

Простейший вид имеет кригинг некоторой точки, линейный дрифт и линейную полувариограмму остатков от дрифта [17]. Решая (8), определяем оценки весов кригинга, включающие эффект от заданного дрифта в исследуемой точке  $p$ . При этом коэффициенты  $a_{ij}$  – полу дисперсии, соответствующие расстояниям между точками  $i$  и  $j$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ), которые используются в оценивании;  $\|a_{1p}, a_{2p}, \dots, a_{np}, 1, x_p, y_p\|^T$  – вектор свободных коэффициентов в правой части (8);  $a_{ip}$  – значения полу дисперсий, соответствующие расстояниям между точками  $i = \overline{1, n}$  и  $p$ ;  $\beta_{n+1}$  – множитель Лагранжа;  $\beta_{n+2}, \beta_{n+3}$  – неизвестные коэффициенты дрифта;  $(x_p, y_p)$  – координаты кригируемой точки.

Кригинг имеет два основных преимущества перед обычными процедурами оценивания: оценки грининга в среднем имеют наименьшую возможную погрешность и обеспечивают ее явное выражение. Так, значение оцениваемой переменной определяется следующим образом:

$$\hat{h}_p = \sum_{i=1}^n \beta_i \hat{h}_i,$$

а оценка дисперсии имеет вид

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \beta_i a_{ip} + \beta_{n+1} + \beta_{n+2} x_p + \beta_{n+3} y_p.$$

Так как кригинг позволяет предсказать измеренные значения в известных точках с погрешностью, равной нулю, его рассматривают как точный интерполяционный метод. В то же время использование кригинга для построения ПДПРВ в изолиниях приводит к очень трудоемким вычислениям и невозможности создания универсальной программы [18].

**Метод взвешенного среднего.** Это один из самых распространенных методов. Его общую модель можно записать в виде

$$\hat{h} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k \omega_k}{\sum_{k=1}^n \omega_k},$$

проводят наблюдение;  $h_k$  – реальное наблюдение;  $\omega_k$  – весовая функция.

Суть метода заключается в том, что оцениваемое значение  $\hat{h}$  строится на основании взвешенной суммы  $h_k$  соседних наблюдений. Соответствующий вес определяется обратно пропорционально расстоянию, чаще всего квадрату или кубу, от оцениваемой точки до наблюдаемых точек. После вычисления в одной контрольной точке переходят к следующей.

**Метод линейного проектирования.** Он используется, как правило, для восстановления поверхностей с малым пространственным градиентом. В начале, с помощью МНК, вокруг расчетной точки подбирается плоскость, то есть оцениваются коэффициенты уравнения плоскости, проходящая настолько близко, насколько это возможно. Затем, различные оценки из этих плоскостей взвешиваются и комбинируются. Таким образом, ко всей области подбирается плоскость с минимальной кривизной, проходящая через значения в контрольных точках.

Из анализа приведенных выше методов следует, что наименее удовлетворительным является метод взвешенного среднего. Это объясняется фиксированным заданием весовых функций квадрата и куба расстояний, не отвечающих статистической структуре поверхности. Эффективнее методы кригинга и сплайна. В отличие от сплайнов кригинг точнее восстанавливает поверхность в области экстремальных значений вследствие вычисления автокорреляционной функции исследуемой поверхности. В то же время при достаточном количестве контрольных точек поверхности кригинг по качеству интерполяции уступает методу линейного проектирования. Это связано с тем, что статистический анализ поверхности не всегда может обеспечивать оптимальный подбор весовой функции в методе кригинга в связи с наличием тренда в исследуемой поверхности. По мере уменьшения числа контрольных точек и увеличения расстояния между ними метод линейного проектирования в силу своей математической структуры начинает «пропускать» в первую очередь экстремальные точки поверхности.

**Локально-полиномиальная интерполяция.** Этот метод, с использованием МНК является более универсальным и может применяться при построении поверхностей на «больших» участках. Среднеквадратический полином строится в каждой расчетной точке  $M(x_0, y_0)$  по исходным контрольным точкам  $p\{(x_0, y_0)\}$ , расположенным в некоторой ее локальной окрестности – окне (круге радиуса  $R = \text{const}$ ), причем для ослабления влияния удаленных точек вводится функция веса измерений

$$p_i = \left[ \frac{R^2 - d_i^2}{d_i^2} \right]^2 \text{ или } p_i = \left[ \frac{R^2 - d_i^2}{d_i^2 + b^2} \right]^2,$$

где  $d_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}$ ;  $b$  – определяют опытным путем.  
При этом размеры окна должны удовлетворять условию

$$d_i \leq R. \quad (9)$$

Заметим, что для интерполяции высот ПДПРВ может быть использован полином типа (3).

Типичная процедура при степени полинома  $m = 2$  строится следующим образом. За начало координат принимается точка  $M$ . Затем рассчитывается полином (3) по значениям в точках, в которых выполняется неравенство (9). Радиус  $R$  выбирается таким образом, чтобы внутрь круга попадало не менее шести точек.

Размерами окна и степенью полинома регулируется точность интерполяции. Данный метод имеет существенный недостаток, он требует большого объема вычислений [1, 12, 13].

**Оптимальная интерполяция.** Этот метод целесообразно использовать для численного анализа однородных и изотропных в статистическом смысле ПДПРВ.

Как правило, объем информации в начале моделирования ПДПРВ весьма ограничен, поэтому необходимо осуществить идентификацию параметров математической модели многомерного объекта

$$H_m = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} c_{jk} x^j y^k, j = \overline{0, m}; k = \overline{0, m}, j + k \leq m, \quad (10)$$

где  $c_{jk}$  – искомые параметры.

Найдем значения параметров  $c_{jk}$  регрессивного уравнения (10) с использованием нейронных сетей [16, 19].

### Нейросетевой метод.

При решении задач идентификации параметров  $c_{jk}$  уравнение (10) с использованием нейронной сети (НС) основной проблемой является ее обучение. Допустим, имеются статистические данные, полученные в результате наблюдений (измерений). Из этих входных и выходных данных составляем обучающие пары для обучения сети  $B, T$ . Для построения модели процесса на вход НС подаются сигналы  $B$  (рисунок 2), а выходные сигналы сравниваются с эталонными сигналами  $T$ .

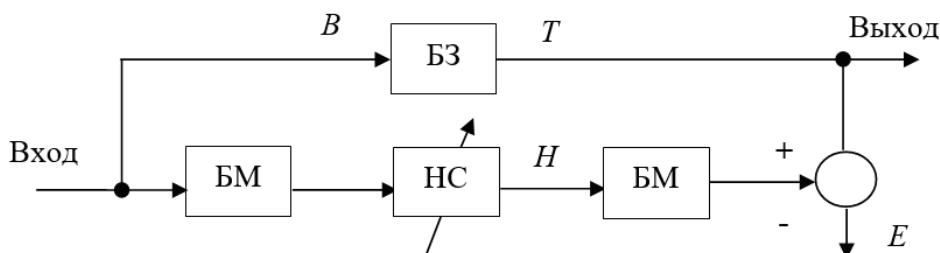
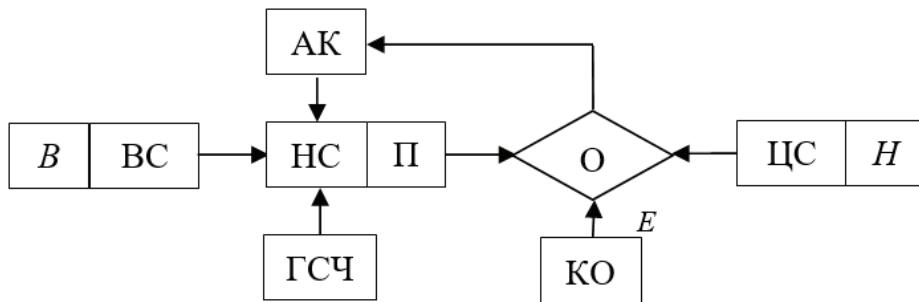


Рисунок 2 – Схема нейронной идентификации, где:  
БМ – блок масштабирования; НС – нейронная сеть;  
БЗ – база знаний (соотношение вход-выход)

Затем вычисляются отклонения

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l (H_i - T_i)^2.$$

Если для всех обучающих пар отклонение  $E$  меньше заданного, то обучение (коррекция) параметров сети заканчивается (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Схема обучения параметров сети с обратной связью,**  
где: ВС – входные сигналы; АК – алгоритмы коррекции;  
НС – нейронная сеть; ГСЧ – генератор случайных чисел; П – параметры;  
О – отклонение; КО – качество обучения; ЦС – целевые сигналы

Если нет, то оно продолжается пока  $E$  не достигнет минимума, то есть заданного качества обучения.

Коррекция параметров сети осуществляется следующим образом:

$$c_{jk}^{\text{H}} = c_{jk}^{\text{C}} + \gamma \partial E / \partial c_{jk}, \quad (11)$$

где  $c_{jk}^{\text{C}}$  и  $c_{jk}^{\text{H}}$  – старые и новые значения параметров нейронной сети;  $\gamma$  – скорость обучения.

**Пример.** Рассмотрим модель, описываемую уравнением регрессии (частный случай (10) при  $m = 2$ ):

$$H = c_{00} + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2. \quad (12)$$

Построим нейронную структуру для решения (12), где в качестве параметров сети выступают коэффициенты  $c_{00}, c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}$  (рисунок 4).

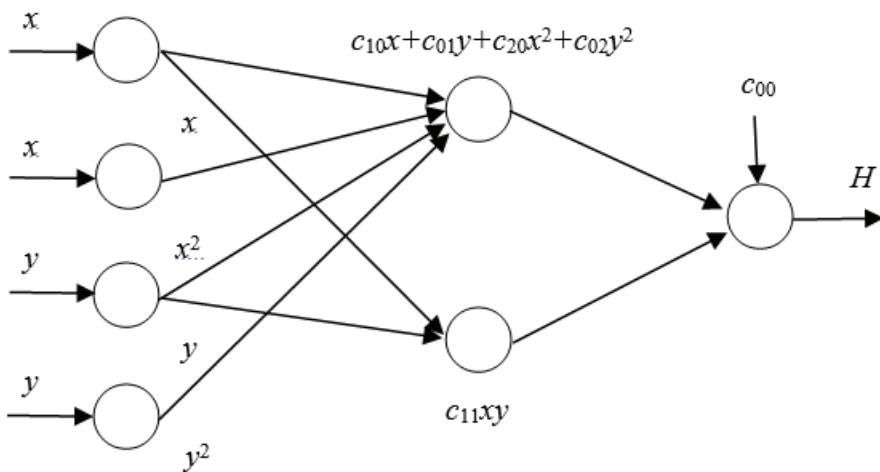


Рисунок 4 – Структура нейронной сети

Воспользовавшись (11), осуществим обучение параметров сети:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c_{10}} &= \sum_{i=1}^l (h_i - t_i)x; \quad \frac{\partial E}{\partial c_{20}} = \sum_{i=1}^l (h_i - t_i)x^2; \\ \frac{\partial E}{\partial c_{00}} &= \sum_{i=1}^l (h_i - t_i); \quad \frac{\partial E}{\partial c_{11}} = \sum_{i=1}^l (h_i - t_i)xy; \\ \frac{\partial E}{\partial c_{01}} &= \sum_{i=1}^l (h_i - t_i)y; \quad \frac{\partial E}{\partial c_{02}} = \sum_{i=1}^l (h_i - t_i)y^2. \end{aligned} \quad (13)$$

В итоге обучения (11), (13) находим параметры сети, удовлетворяющие экспериментальным статистическим данным:

$$\begin{aligned} c_{00} &= 1,42; c_{10} = 2,11; c_{01} = -2,53; \\ c_{20} &= -1,10; c_{11} = -0,87; c_{02} = 1,31. \end{aligned} \quad (14)$$

Для оценки коэффициентов  $c_{00}, c_{10}, c_{01}, c_{20}, c_{11}, c_{02}$  уравнения регрессии (12) была составлена программа, реализованная на языке C++.

Сравним указанные результаты (14) с результатами в [4], полученными при использовании модели (3) и метода наименьших квадратов (4):

$$\begin{aligned} c_{00} &= 1,45; c_{10} = 2,26; c_{01} = -2,55; \\ c_{20} &= -1,28; c_{11} = -0,85; c_{02} = 1,33. \end{aligned}$$

Главным достоинством применения многослойных нейронных сетей является способность аппроксимировать любую функцию с любой заданной точностью [7, 9, 16].

Что касается примененного алгоритма обратного распространения ошибки (backpropagation) – это итеративный градиентный алгоритм обучения, при реализации которого необходимо помнить следующее [9, 10, 19].

1. Неизвестность выбора начальных весовых коэффициентов влияет на устойчивость алгоритма обучения.

2. Сложно выбрать оптимальную скорость обучения  $\gamma$ : малая – увеличивает время обучения, большая – может сделать этот процесс расходящимся.

3. Качество обучения можно ухудшить, увеличивая объем обучающей выборки.

Следует отметить, что теория нейронных сетей и практика применения нейропакетов, а также обзор исследований по ним содержатся в [9, 10, 18, 19].

**Построение ПДПРВ в изолиниях.** В повседневной практике регулярно приходится строить различные ПДПРВ случайных процессов, отображаемых методом изолиний. Для их построения используют различные математические методы [2-6, 8, 11, 19].

Рассмотрим и проанализируем относительно метод, основанный на применении фундаментальной теоремы Пуанкаре «о возвращаемости» замкнутой физической системы. При этом задача построения изолиний сводится к решению системы из четырех дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = u_1; \\ \frac{dy}{dt} = u_2; \\ \frac{du_1}{dt} = -\frac{2R(h(x,y) - h_0(x,y)\partial h(x,y))}{dx}; \\ \frac{du_2}{dt} = -\frac{2R(h(x,y) - h_0(x,y)\partial h(x,y))}{dy}. \end{cases} \quad (15)$$

Система решается методом Рунге-Кутта четвертого порядка с начальными условиями

$$M_0 = (x^0, y^0, u_1^0, u_2^0) \quad (16)$$

на отрезке  $[0,1]$  с шагом 0,01 где  $u^0 = (u_1^0, u_2^0)$  – произвольный вектор, а точка с координатами  $(x^0, y^0)$  удовлетворяет условию  $h(x^0, y^0) = h_0$ .

Итак, найдя решение системы (15), (16) с помощью точек  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 101$ ), можно нарисовать изолинию, в каждой точке которой  $h(x_i, y_i) = h_0$  ( $i = 1, 101$ ). Для вычисления значений  $h(x, y)$  можно воспользоваться одним из функционалов (1), (3), (7), (10). Для зарисовки изолиний с уменьшенным количеством расчетных точек можно воспользоваться кубическими периодическими сплайнами [14].

**Выводы.** Из приведенного анализа различных, наиболее часто используемых, методов восстановления параметров ПДПРВ на различных стадиях выявлены их преимущества и недостатки. В результате проведенного анализа было показано, что на ранней стадии восстановления параметров ПДПРВ, когда объем информации ограничен, целесообразно воспользоваться нейронными сетями.

*Литература*

1. Аронов В.И. Методы математической обработки данных на ЭВМ. М.: Недра, 1977.
2. Банки географических данных для тематического картографирования / Под ред. К.А. Салищева, С.Н. Сербенюка. М.: МГУ, 1987.
3. Берлянт А.М., Ушаков Л.Н. Картографическая анимация. М.: Мир, 2000.
4. Буряковский Л.А., Джагаров И.С. Моделирование систем нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1990.
5. Белов П.Н. Численные методы прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
6. Волков А.М. Решение практических задач на ЭВМ. М.: Недра, 1980.
7. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. М.: Радиотехника, 2000.
8. Гандин Л.С. Объемный анализ метеорологических полей. Л.: Недра, 1963.
9. Головко В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. М.: Радиотехника, 2001.
10. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
11. Казакевич Д.Н. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1071.
12. Ломтадзе В.Г. Программное обеспечение обработки геофизических данных. Л.: Недра, 1982.
13. Льюинг Л. Идентификация систем: Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
14. Садыхов Р.А. Математические модели и автоматизация решения задач нефедобычи. Баку: Аз.ТУ, 1994.
15. Akima O., Hiroshi P. // ACM Trans. Math. Software 1978, June. P.148.
16. Mohamad H. Fundamentals of Artificial Neural Networks. London: MIT Press, 1995.
17. Olea R. // Kanzas Geological Survey Series on Spatial Analisis. 1975. № 2. P. 137.
18. Yanalak M. // Harita dergisi. 2002. № 128. P. 44.
19. Yager R., Zadeh L. Fuzzy sets, Neural Net works and Soft Computing. VanNostrand Reinhold. N.Y., 1994.

УДК 004.622

## Архитектурная модель данных как набор функциональных элементов для n-слоев информационной системы

Егор Гурьевич Емельянов, ассистент кафедры

«Информационных технологий и управляемых систем»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
пилота-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*В информационных системах данные хранятся в разных источниках. Часто это не связанные между собой БД, хранилища событий, системы статистики и т.п. В этих данных есть важная информация для управления бизнесом, но для этого необходимо достать данных из разнородных источников и представить их в удобном для менеджеров и аналитиков виде за минимально возможное время.*

Оперативный слой, детальный слой, витрины данных.

### Architecture data model as sets functional elements for n-stages in information system

Egor Gurevich Emelyanov, assistant of the Department of Information technologies and control systems,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*In IT systems data stored in many source systems. As rule databases, storages, systems on statistics and etc not related to each other. In data contains important information for business management, but to do this it is necessary to obtain data from diverse sources and present it in a form convenient for managers and analysts in the shortest possible time.*

Operation stage, detail stage, data mart.

Разработка информационной системы включает в себя создание многоуровневой и многослойной архитектуры. Эта структура состоит из ряда элементов, каждый из которых выполняет свой спектр задач. Для правильно проектирования архитектуры информационной системы, крайне важно разобраться в роли и назначении каждого из этих слоев.

У этой архитектуры есть следующие преимущества:

1. Направленность. Каждый слой модели оптимизирован для выполнения конкретных задач и функций.

2. Независимость. Ошибки в одном слое не распространяются на другие.

3. Разграничение доступа: Различные слои могут быть доступны для разных групп пользователей в зависимости от их квалификации и потребностей.

4. Независимость. Каждый слой модели работает без ожидания завершения работы другого слоя.

В информационных системах, слои представляют собой различные компоненты с уникальной архитектурой, такие как базы данных, системы управления базами данных или файловые системы. Эти слои часто создаются с использованием разных технологий. Обычно в информационной системе выделяют четыре ключевых слоя:

1. Слой для промежуточных данных (STG).

2. Слой для хранения оперативных данных (ODS).

3. Слой для хранения детальных исторических данных (DDS).

4. Слой, содержащий витрины данных(DM).

Минимально необходимый набор для функционирования как правило включает в себя STG, DDS и DM.

Архитектура таких систем стоит из следующих элементов:

1. Хранилище данных. Хранилище данных (DWH) собирает информацию из разных реляционных и нереалиционных источников. Система обрабатывает информацию с помощью различных инструментов, чтобы данные были готовы к аналитическим целям.

2. Инструменты ETL. Инструменты извлечения, преобразования и загрузки (ETL) – это процессы базы данных, которые автоматически извлекают, изменяют и подготавливают данные к формату, подходящему для аналитических целей.

3. Сервер OLAP. Сервер OLAP – это базовая машина, которая питает систему OLAP. Он использует инструменты ETL для преобразования информации в реляционных базах данных и подготовки их к операциям OLAP. Данные системы должны быть консистентными для извлечения, обработки и загрузки данных в различные системы источника.

4. База данных OLAP. База данных OLAP – это отдельная реляционная база данных, которая подключается к хранилищу данных. Администраторы иногда используют базу данных OLAP, чтобы предотвратить нагрузку на хранилище данных анализом OLAP. Они также используют базу данных OLAP для упрощения создания моделей данных OLAP.

5. Аналитические инструменты OLAP. Данные инструменты выполняют такие операции, как нарезка, нарезка в виде кубов и поворотные операции для получения более глубокого понимания конкретной информации в OLAP-кубе.

Модель данных позволяет координировать работы выше описанных архитектурных элементов обеспечивая максимальный коэффициент эффективности системы при извлечении, загрузки, и обработки данных на различных этапах. Правильная модель данных способна обеспечить максимальное короткое время актуализации данных в информационной системе.

Область извлечения данных служит для временного хранения порций инкремента из источника, которые удаляются после сохранения информации в ODS.

Данная область необходима для выполнения следующих задач:

1. Сбор данных: Принимает сырые данные из различных источников в необработанном виде.

2. Поддержка как есть: Хранит данные в их оригинальном формате без изменений.

3. Нагрузка: Снимает нагрузку с источников путем переноса данных между нодами системы.

4. Архивация: Служит для архивации и устранения ошибок в наборе конечных данных.

Данные в слое могут быть не консистентные и допускается несоответствие в формате полученных данных. В этом случае такие строки приводятся к общему формату varchar. Пример схемы работы алгоритма выгрузки данных приведена на рисунке 1.

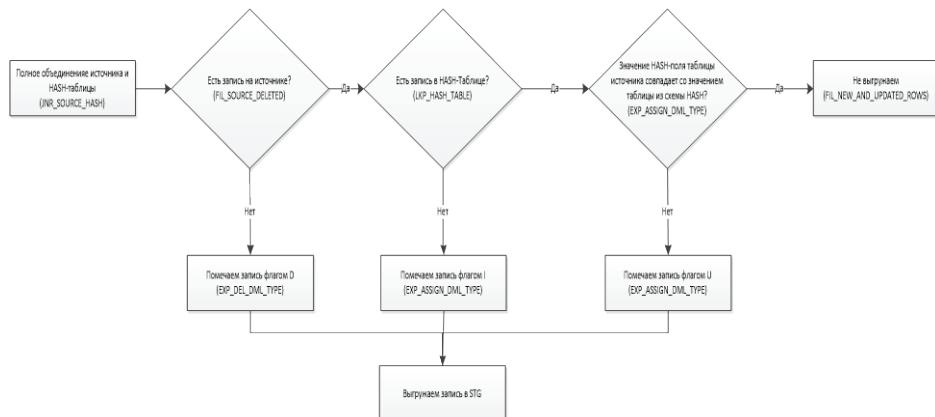


Рисунок 1 – Схема работы алгоритма выгрузки

По окончанию загрузки данных в ODS, порция данных в промежуточных таблицах перекладывается в исторические таблицы с целью накопления истории изменения строк данных. Данный подход к накоплению истории позволяет решить следующие задачи:

1. Ручной разбор коллизий. Ситуации, когда происходят расхождения в данных между системами не редки. В таких случаях сотрудникам сопровождения одной из систем приходится осуществлять поиск причины расхождений в ручном режиме. Накопленная история помогает при ручном режиме разбора расхождений сотрудниками сопровождения.

2. Построение историчности. В области детального слоя данные историчные. Исторические таблицы в слое STG позволяют отслеживать историю изменения любого изменения по необходимому атрибуту на любой период времени. После актуализации ODS и вставки новой порции данных в историчные таблицы STG, данные в промежуточной области защищаются и не подлежат восстановлению.

Для области выделено отдельное пространство HASH. По полу CCD создается Primary Key с целью оптимизации работы маппинга загрузки STG и процедуры обновления таблицы согласно новым данным из STG. Статистика по HASH-таблицам собирается во время простоя системы. Метод сбора статистики заключается в создании триггеров на выгружаемые сущности, которые записывают в отдельные журнальные таблицы идентификатор изменившейся записи, тип и время (и/или метку) изменения.

Для каждого источника данных должна быть определена регулярность выгрузки в область извлечения и временное окно, в которое источник доступен для извлечения данных. ETL-процессы извлечения данных в промежуточную область не должны быть связаны на технологическом уровне с процессами обновления ODS и подразумевают взаимную асинхронную загрузку. Должна существовать возможность приостановки обновления ODS при продолжении регулярного извлечения данных в область STG. Данные локализованы в схеме СУБД. Перечень базовых объектов, реплицируемых в ODS область ЕХД, определен скоупом правил проекта. Периодическая выгрузка данных из всех таблиц осуществляется путем извлечения инкремента Системой определения физического инкремента данных, построенной на журналах изменений на стороне источника. В основе данной системы лежит принцип постоянства первичного ключа и гарантированная запись информации обо всех транзакциях в источнике с помощью триггеров уровня строки СУБД.

DDS хранит операционные, часто текущие детальные данные, которые еще не агрегированы. Этот слой служит источником оперативной информации для создания отчетов и может напрямую использоваться для построения более высокоуровневых слоев.

Область данных ODS используется только для построения более высокоуровневых слоев информационной системы. Индексирование и партиционирование в данном слое допустимо только в случае объемных фактовых таблиц источника и только в исключительных случаях. Справочные таблицы, на данном слое, не индексируются и не партиционируются никаким образом.

Данные в ODS обновляются в режиме реального времени (в зависимости от источника). Модель данных ODS совпадает с моделью данных систем источников с добавлением необходимых дополнительных технических полей. Физическая модель данных ODS оптимизирована под загрузку.

ODS заменяет использование конечными пользователями и приложениями прямого доступа к БД систем-источников в рамках:

1. Решения аналитических задач посредством ad-hoc запросов;
2. Получения доступа к данным, которых еще нет в DDS;
3. Минимальная интеграция данных в рамках ODS для целей контроля качества и оптимизации доступа к данным;

Область PREDDS содержит порции данных для обновления DDS, сформированные на основе ODS. На данном этапе происходят следующие действия над данными:

1. Трансформация данных разных источников к единой модели данных DDS;
2. Формирование суррогатных ключей сущностей;

3. Замена FK ключей сущностей на суррогатные ключи;
4. Нормализация доменов значений (перекодировки);

В процессе загрузки в DDS все сущности должны быть обогащены суррогатным целочисленным ключом. Формирование ключа происходит на основе:

1. Идентификатора СИ;
2. Натурального ключа записи из СИ (которым может являться и суррогатный ключ в СИ).

Суррогатные ключи должны быть устойчивыми: то есть, суррогатный ключ, определенный для некоторой записи СИ не должен изменяться в случае перезагрузки этой записи в таблицу DDS.

Детальная область хранения данных является ядром и содержит полную историю данных. Этот слой может быть представлен в разной степени нормализации и служит для проведения исторического анализа и выявления тенденций.

Данная область обладает следующими особенностями:

1. Историчность. Хранит полную историю изменений данных за весь период действия.

2. Анализ. Позволяет проводить исторический анализ и выявлять тенденции к построению аналитических выгрузок, проведению компаний.

3. Масштабируемость. Данный слой позволяет масштабироваться как вертикально, так и горизонтально.

4. Отказоустойчивость. В случае выявление проблем, есть возможность полностью восстановить историю из данных находящихся на слоях ниже. Данный слой допускает построения аналитических запросов и формированию выгрузок за определенный период времени.

Данный слой включает в себя следующие объекты:

1. Таблицы фактов. Данные в этих таблицах, как правило, не подвергаются изменениям. Фактовые таблицы должны быть парционированы и индексированы в соответствии с требованиями архитектуры информационной системы. Изменения данных в фактовых таблицах допустимо лишь на определенный интервал времени. После этого интервала времени, любое изменение данных должно регулировать только внештатными процессами изменения данных. Примером фактовых таблиц могут быть банковские операции клиентов по картам (проводки), результаты измерений или подсчетов.

2. Таблицы справочники. Данных в справочных таблицах, в сравнении с фактальными таблицами, на порядок меньше. Изменения по справочным таблицам могут быть в любой момент времени поэтому построение алгоритмов загрузки и обработки данных должны происходить на полном срезе данных т.к. инкрементальный подход в этом случае может привести к искажению и неконсистентности конечных данных в DDS.

3. Справочные таблицы. В справочных таблицах хранится информация о натуральном ключе, его наименовании, и суррогатном ключе используемый в фактальных и справочных таблицах детального слоя. Справочники содержат в себе не значительный объем данных и парционировать и индексировать их как-либо нет необходимости. Примером справочной информации могут являться соглашения, справочная информация по клиентам т.д.

4. Настроочные таблицы. Данный тип таблиц относится к техническим.

ским и служит для ситуаций, когда необходимо переопределять или объединять натуральные ключи из разных систем в единый суррогатный ключ. Например, если натуральный ключ в обеих системах одинаков и обозначает одно и тоже, тогда производим генерацию единого суррогатного ключа. В противном случае, если ключи одинаковые, но сами значения разные, тогда производим генерацию двух разных ключей.

В процессе загрузки в DDS все сущности должны быть обогащены суррогатным целочисленным ключом. Формирование ключа происходит на основе:

1. Идентификатора СИ;
2. Натурального ключа записи из СИ (которым может являться и суррогатный ключ в СИ);
3. Сиквенса;

Алгоритм заполнения FK-поля таблицы DDS выглядит следующим образом. Определяется запись таблицы, у которой nk\_ccd равен натуральному ключу таблицы и system\_ccd равен системе источника. Если запись не найдена (то есть, загружаются записи дочерних таблиц, ссылающиеся на эту запись родительской таблицы, но запись родительской таблицы ЕЩЕ не загружена), то в таблицу IDMAP выполняется вставка записи, у которой:

1. Nk\_ccd равен натуральному ключу таблицы;
2. Source\_system\_ccd равен системе источника;
3. Processed\_dttm равен текущей дате;
4. Признак потеряшки равен значению Y;

Алгоритм заполнения суррогатных ключей приведен на рисунке 2.

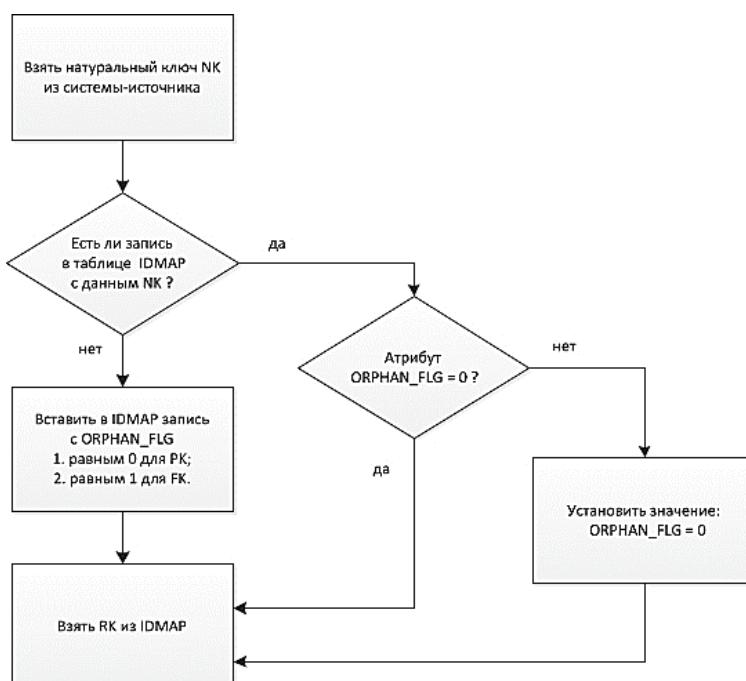


Рисунок 2 – Алгоритм заполнения суррогатных ключей

Суррогатные ключи должны быть устойчивыми, то есть, суррогатный ключ, определенный для некоторой записи СИ не должен измениться в случае перезагрузки этой записи в таблицу DDS. Для обеспечения устойчивости суррогатных ключей, их связь с натуральными ключами и идентификатором СИ генерируется один раз и хранится в IDMAP-таблицах, причем для каждой таблицы DDS существует отдельная IDMAP-таблица.

Слой CDM предоставляет информацию по конкретной теме или доменной области, например, продажи, финансы или маркетинг. Из-за своей сфокусированности, витрины получают данные из меньшего количества источников. Витрины данных также могут включать содержимое из внешних источников, озер данных или других слоев подсистемы.

Витрина данных состоит из наборов, которые являются подмножеством информационной системы путем получения данных непосредственно из исходных систем. Будучи доменно-ориентированной, витрина данных обычно создается для решения конкретной проблемы, характерной для ограниченного количества потребителей или сценариев использования. При построении витрин используются приемы моделирования многомерных данных, реализуя следующие понятия:

1. Измерения – набор информации, который содержит данные по одному или нескольким бизнес-измерениям;
2. Факты – набор измерений, метрик, транзакций и т.п. из различных бизнес-процессов;
3. Атрибуты или показатели – элементы таблицы измерений.

Таблицы фактов нужны для хранения бизнес-показателей или транзакций, а таблицы измерений хранят измерения бизнеса и устанавливают контекст для фактов. В моделировании многомерных данных выделяют следующие шаги:

1. Идентификация бизнес-процесса – определение потребности создания витрины данных, чтобы понять, решаемую бизнес-проблему, а также выявить необходимые измерения и наборы данных;
2. Идентификация гранулярности, чтобы понять какая нормализация может быть достигнута в данных;
3. Определение измерений, которые являются ключевыми компонентами процесса моделирования многомерных данных. Они содержат подробную информацию об объектах домена;
4. Определение фактов, т.е. показателей и операции, которые должны быть связаны с соответствующими измерениями.

Основные цели создания витрин данных:

1. Предоставление быстрого доступа к релевантной информации.
2. Упрощение процесса анализа для конечных пользователей.
3. Оптимизация производительности запросов.
4. Снижение нагрузки на основное хранилище данных.

Как правило, выделяют следующие три подхода к проектированию витрин данных:

1. Отражение данных на состояние на вчера с возможностью переключения на позавчерашние данные с помощью синонимов.
2. Накопительный расчет на отчетную дату с агрегированием, в ре-

ких случаях детализацией, конечных данных.

3. Расчет конечных данных за каждый день предыдущего месяца с сохранением детализированных данных в конечные таблицы.

Отражение данных на состояние на вчера. При данном подходе данные в витрине хранятся только на вчерашний день с возможность отката до позавчерашних данных путем переключения синонимов между двумя таблицами. Данный подход применим только к таблицам в которых отражается справочная информация и суммарный объем данных которых не превышает более 500 гигабайтов. К плюсам данного подхода можно отнести отказоустойчивость. В случае выявление проблем с последним расчетом нет проблем с переключением на позавчерашний расчет. К минусам же данного подхода можно отнести утилизации свободного места. В большинстве случаев расчет на позавчерашний день интересует только в случае падения последней загрузки данных. В остальных случаях он может не использоваться и занимать лишь свободное место в БД.

Накопительный расчет на отчетную дату. При данном подходе данные записываются в детализированную таблицу на состояние на вчера и не перезаписываются. В агрегате допустимы изменения в полях таблицах, но полный пересчет при этом не доступен. К положительной стороне данного подхода можно отнести возможность использования информации на любой период времени другими отделами или сотрудника в рабочих целях. К минусам можно отнести погрешность в не консистентности данных в случаях выявления проблем на слоях ниже.

Третий подход с расчетом конечных данных за каждый день предыдущего месяца заключается в сохранении основных параметров на вчерашний день и использование их при ежемесячном расчете. К плюсом данного подхода можно отнести облегчение расчета и снижение времени обработки и загрузки конечных данных за счет перекладывания части нагрузки на ежедневный расчет. К минусам данного подхода можно отнести сложность реализации т.к. в случае выявления неконсистентных данных по окончанию отчетного месяца вернуть в предыдущую точку будет невозможно.

Каждый предложенный подход индивидуален и подходит к определенному типу задач.

Достаточно часто в процессе создания ETL-алгоритмов возникают задачи унификации терминологии систем-источников (кодов, наименований, типов и т.д.) и приведения их к одному знаменателю и алгоритмического определения значения какого-либо атрибута в зависимости от значения другого атрибута. Во избежание хардкода применяются настроечные таблицы, в которых и прописывается вручную соответствие «чего-то» и «чему-то». Такие таблицы, которые призваны решать строго заданную задачу унификации. Они имеют фиксированный, строго неизменный набор полей:

NK\_CCD – унифицируемое значение из системы-источника (входит в составной РК таблицы, может принимать NULL-значение!);

SOURCE\_SYSTEM\_CCD – идентификатор (натуральный ключ) системы-источника (001, 002, и т.д) (входит в составной РК таблицы, НЕ может принимать NULL-значение!);

MASTER\_NK\_CCD – значение, в которое перекодируется значение SOURCE\_NK (ВАЖНО: не обязательно это поле должно быть ссылкой на существующий в НСИ справочник;

MASTER\_SOURCE\_SYSTEM\_CCD – идентификатор мастер-системы ведения унифицируемой информации;

В БД эти таблицы должны иметь код совпадающий с кодом справочника. Если для унифицируемых таблиц данных не существует отдельного href-справочника, то код допустим произвольный. В системе НСИ эти таблицы должны иметь код, сформированный по правилам архитектуры системы. Эти таблицы должны находиться в подкаталоге соответствующей области.

ХАТ таблицы имеют произвольный набор произвольно именуемых атрибутов. В БД эти таблицы должны:

- Иметь код, сформированный по шаблону архитектуры;
- Располагаться в схеме ХАТ;
- Иметь код без префикса «ХАТ»;
- Находиться в подпапке «ХАТ» папки соответствующей области.

Во время загрузки PREDDС могут возникать ситуации, когда на источнике появилась новое значение, которого еще нет в XREFMAP. В таком случае в PREDDС попадает предопределенное значение «-2». А само NK\_CCD, которое не смогло замапиться на перекодировочный справочник, попадает в отдельный общий буфер имеющий структуру аналогичную справочникам XREFMAP и поле TABLE\_NAME, указывающее в какой таблице искомое значение поля не нашлось.

После загрузки DDS по каждому источнику выполняется отдельный процесс, который распределяет записи по справочникам на основе значения поля TABLE\_NAME и реплицируются в НСИ. По завершении процесса на пользователей системы уходит сообщение с агрегированным отчетом, содержащем в себе количество новых значений и по каким перекодировочным справочникам эти значения поступили.

После обработки пользователями новых записей через интерфейс НСИ происходит перезагрузка тех записей сущностей DDS, которые ссылались на не перекодированные записи в справочнике.

В рамках данной статьи рассмотрены основные особенности функциональных элементов составляющие архитектурную модель данных. По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что совместное взаимодействие элементов системы в информационные системы является главным показателем в качестве и скорости обработке данных за минимально возможный интервал времени.

#### *Литература*

1. Велес А.А. Сбор, объединение и преобразование данных с помощью Power Query. 2024. С. 128-256.
2. Справочная документация по эксплуатации программного обеспечения informatica [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.informatica.com> (дата обращения: 22.03.2025).
3. Клеппман М.А. Высоконагруженные приложения. Питер, 2022. С. 350-526.

УДК 004.771

## Экспериментальное исследование и сравнительный анализ VPN-протоколов в условиях ограниченной пропускной способности канала на устройствах с различной процессорной архитектурой

Артем Андреевич Лукьянов, инженер направления  
инфраструктурных решений,  
ООО «Ред Софт», г. Москва

*В работе проводится экспериментальное исследование и сравнительный анализ VPN-протоколов OpenVPN и WireGuard в условиях ограниченной пропускной способности канала на устройствах с различной процессорной архитектурой. Для оценки производительности использовались специализированные инструменты анализа, включая замеры скорости передачи данных и задержек. Полученные результаты демонстрируют влияние выбора протокола на энергопотребление устройств и стабильность соединения при работе в условиях нестабильных сетей.*

Виртуальные частные сети, инструменты сетевого анализа, пропускная способность канала, моделирование сетевых задержек.

## Experimental Study and Comparative Analysis of VPN Protocols Under Limited Bandwidth Conditions on Devices with Different Processor Architectures

Artem Andreevich Lukyanov, Engineer of Infrastructure solutions,  
Red Soft LLC, Moscow

*The study presents an experimental investigation and comparative analysis of OpenVPN and WireGuard VPN protocols under limited channel bandwidth conditions on devices with different processor architectures. Specialized analysis tools, including data transfer speed and latency measurements, were employed to evaluate performance. The results demonstrate the impact of protocol selection on device power consumption and link stability when operating in unstable networks.*

Virtual private networks, network analysis tools, channel bandwidth under constrained conditions, network latency modeling.

### Введение

Современные виртуальные частные сети являются основой для обеспечения безопасной передачи данных через публичные и приватные сети. Однако их эффективность и надежность во многом зависят от качества каналов связи, по которым передаются данные. Низкое качество соединения, выражющееся в виде высокой задержки, потеря пакетов и джиттера, существенно снижает производительность подключения и передачи данных, приводит к разрывам туннелей и

снижает общий уровень безопасности.

Особую важность данная проблема приобретает в условиях использования VPN-подключений на устройствах с ограниченными аппаратными ресурсами и в сетях с низкой пропускной способностью. В таких сценариях даже минимальные накладные расходы, связанные с шифрованием и обработкой трафика, могут существенно ухудшить пользовательский опыт и стабильность соединения.

В этой статье проводится анализ влияния параметров качества связи на работу VPN, исследуются адаптационные механизмы, реализуемые в протоколах туннелирования, и оцениваются возможности их оптимизации. Результаты исследования позволяют выявить наиболее устойчивые к сетевым помехам решения и предложить подходы к обеспечению стабильной работы VPN в условиях ограниченного качества каналов связи.

Задачей данного исследования стало изучение того, как различные сетевые помехи – задержки, потери пакетов и джиттер – сказываются на качестве работы сетевых приложений. Эта проблема особенно актуальна для разработчиков VoIP-решений, онлайн-игр и систем потокового вещания, где стабильность соединения критически важна. С повсеместным внедрением беспроводных технологий – от мобильных сетей GPRS и CDMA до спутниковой связи – понимание воздействия сетевых параметров на приложения приобрело особую значимость. Чтобы детально изучить эти вопросы, мы разработали специальный тестовый стенд.

В качестве платформы для исследований была выбрана российская ОС РЕД ОС, построенная на ядре Linux. Она содержит все необходимые сетевые инструменты, включая важный для наших целей модуль sch\_netem [1, С.241]. Этот компонент ядра позволяет реалистично эмулировать работу в глобальных сетях (WAN) и обладает широкими возможностями:

- Моделирование задержек с разными алгоритмами распределения
- Имитация потерь пакетов
- Эмуляция дублирования пакетов
- Воспроизведение изменения порядка доставки
- Моделирование повреждения данных

Данный модуль присутствует в большинстве современных Linux-дистрибутивов и управляет через утилиту tc из пакета iproute2, что делает нашу методику исследования универсальной и воспроизводимой.

Этот модуль включен по умолчанию в большинство современных дистрибутивов, основанных на ядре Linux и управляемых при помощи команды tc из пакета iproute2. По умолчанию, этот модуль не загружен в систему, и включается следующей командой:

```
# modprobe sch_netem
```

Для изучения влияния параметров транспортной сети на стабильность VPN, требуется использовать экспериментальный стенд, описанный в таблице 3.

В нашей конфигурации сетевые порты сервера были объединены в программный мост (ethernet bridge). Такое решение выполняет функции виртуального коммутатора, обеспечивая прозрачную передачу сетевых пакетов между интерфейсами.

Важно отметить, что использование bridge позволяет сохранить стандартную сетевую семантику, обеспечивая при этом дополнительные возможности по управлению трафиком:

```
# brctl add br0
# brctl addif br0 enp0s3
# brctl addif br0 enp0s8
```

Далее требуется настроить адресацию на интерфейсе br0 для доступа к компьютерам стенда по сети:

```
# ip addr add 10.10.10.1/24 dev br0
```

После настройки мостового соединения Ethernet-фреймы, поступающие на один из интерфейсов, автоматически перенаправляются на другой интерфейс моста. Важной особенностью этого процесса является то, что все пересылаемые пакеты проходят через систему netfilter, что открывает широкие возможности для управления трафиком [1, С.245].

Воспроизведём на стенде, отличную от идеальных условий, сетевую настройку. Рассмотрим и создадим несколько сценариев искусственных ограничений, которые встречаются в реальной жизни.

**Сценарий 1.** Городские условия сети 4-ого поколения в час пик:

- Пропускная способность: до 1000 Мбит/с
- Задержка: 15-25 мс
- Потери пакетов: 1-5% (фоновый шум)

**Сценарий 2.** Межгородской роуминг сетей 3-его и 4-ого поколений:

- Пропускная способность: 2-10 Мбит/с
- Задержка: 100-300 мс
- Потери пакетов: 3-8%
- Типичные проблемы: джиттер, переподключения

**Сценарий 3.** Уверенный приём в сети 3-его поколения:

- Пропускная способность: 21 Мбит/с
- Задержка: 30-100 мс
- Потери пакетов: 1-5%

Для проверки сценариев в различных сетевых условиях напишем скрипт автоматизации на языке Python. В последствии, эти скрипты войдут в состав методологии по разработке программно-аппаратного комплекса для создания встраиваемых систем.

Для реализации скрипта воспользуемся библиотеками subprocess и time, которые позволяют управлять сетевыми параметрами и замерять время отклика системы. Также добавим логирование результатов для последующего анализа, что поможет выявить узкие места и оптимизировать работу комплекса. Это обеспечит гибкость тестирования и позволит адаптировать сценарии под различные условия эксплуатации встраиваемых систем.

Скрипт (рис. 1) test\_network.py позволяет произвести мониторинг сети [3, С. 758] по всем перечисленным сценариям и экспортовать данные в формат JSON/CSV для построения графиков через библиотеку matplotlib.

```
test_network.py
...
def get_network_stats():
    """Собирает метрики сети и CPU"""
    timestamp = datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")

    # Задержка (мс)
    ping = run_command(f"ping -c 1 {SERVER_IP} | grep 'time=' | awk -F'time=' '{print $2}' | awk '{(print $1)}'")

    # Потери пакетов (%)
    loss = run_command(f"mtr --report -c 1 {SERVER_IP} | tail -1 | awk '{(print $3)}'")

    # Пропускная способность (Мбит/с)
    iperf = run_command(f"iperf3 -c {SERVER_IP} -t 1 -J | jq '.end.sum_received.bits_per_second / 1e6'")

    return {
        "timestamp": timestamp,
        "ping_ms": float(ping) if ping else 0,
        "packet_loss": float(loss) if loss else 0,
        "bandwidth_mbps": float(iperf) if iperf else 0,
        "cpu_usage": float(cpu) if cpu else 0
    }
def apply_network_profile(profile):
    """Применяет сетевой профиль через tc"""
    profiles = {
        "highspeed": "tc qdisc replace dev eth1 root netem rate 1000mbit delay 3ms loss 0.1% duplicate 0.5%",
        "3g/4g, roaming": "tc qdisc replace dev eth1 root netem rate 30mbit delay 60ms 20ms loss 15%"
    }
    ...

```

Рисунок 1 – Скрипт мониторинга сети test\_network.py

Скрипт (рис. 2) визуализации plot.py [3, С. 759] сгенерирует файл network\_stats.png содержащий три графика:

- Задержка и потери пакетов.
- Пропускная способность.
- Загрузка центрального процессора.

```
plot.py
#!/usr/bin/env python3
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

def plot_results(csv_file):
    df = pd.read_csv(csv_file)
    df['timestamp'] = pd.to_datetime(df['timestamp'])

    # Настройка графиков
    fig, axes = plt.subplots(3, 1, figsize=(12, 10))
    # График 1: Задержка и потери
    for profile in df['profile'].unique():
        subset = df[df['profile'] == profile]
        axes[0].plot(subset['timestamp'], subset['ping_ms'], label=f"{profile} ping")
        axes[0].plot(subset['timestamp'], subset['packet_loss'], '--', label=f"{profile} loss")
    axes[0].set_title("Задержка (мс) и потери пакетов (%)")
    plt.tight_layout()
    plt.savefig("network_stats.png")
    plt.show()

if __name__ == "__main__":
    plot_results("network_test.csv")
```

Рисунок 2 – Скрипт визуализации графиков plot.py

Скрипты обеспечивают полный цикл сбора данных для углублённого анализа и сохраняются в машиночитаемом формате.

Разберем добавление корневого qdisc, эмулирующего задержку на примере сети 3G в условиях нестабильного покрытия [6]:

```
# tc qdisc add dev eth1 root netem delay 300ms
```

Важно учитывать, что в нашей конфигурации возможно управлять исключительно исходящим трафиком. Это означает, что при выполнении команды настройки в рамках нашего стенда, задержка в 300 мс будет применяться только к пакетам, передаваемым от сервера к клиенту. Для повышения реалистичности тестовой среды мы дополнительно вводим параметр стандартного отклонения, который позволит имитировать естественные колебания задержки, характерные для реальных сетевых условий:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 800ms 100ms
```

Теперь задержка будет изменяться с отклонением 100 мс. Так же в модуле sch\_netem существует возможность задавать неравномерное распределение задержки. Следующим шагом в настройке стендада будет создание случайной потери пакетов. Данный параметр приведет к потере сотни из тысячи пакетов:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10%
```

При моделировании сетевых условий существует возможность задать параметр корреляции потерь пакетов. Эта настройка изменяет поведение генератора случайных чисел, делая распределение потерь менее случайным и более предсказуемым:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem loss 10% 25%
```

С данными настройками будет теряться 10% пакетов, при чем вероятность потери пакета вырастает на четверть, если предыдущий был потерян. Дублирование пакетов задается таким же образом, как и потеря:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem duplicate 2%
```

В ядре linux версии 2.6.16 и старше возможно добавления белого шума в сетевые пакеты. Задается аналогично, как и потеря пакетов:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem corrupt 3%
```

Другая ситуация, случающаяся в сетях с задержками это перемешивание пакетов, когда отправленный ранее пакет приходит позже пакета, отправленного после него. В модуле sch\_netem существует две методики перемешивания. Самым простым является метод gap. Этот метод перемешивает каждый n-ый пакет:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem gap 5 delay 10ms
```

В данном примере каждый 5-й пакет будет отправлен немедленно, тогда как остальные будут задержаны на 10 мс. Это приведет к тому, что пакеты придут в порядке отличном от того, как они были посланы. Такое поведение полезно при отладке транспортного протокола.

Но для текущего испытания сети 3G, выбор пал на следующий метод – reorder. Он гораздо больше приближен к реальной жизни. С помощью него можно указывать какой процент пакетов можно перемешивать:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 10ms reorder 25% 50%
```

В данном примере 25% пакетов (с корреляцией 50%) будут посланы немедленно, тогда как остальные будут задержаны на 10 мс.

Имеется еще третий возможный вариант перемешивания:

```
# tc qdisc change dev eth0 root netem delay 100ms 75ms
```

При моделировании сетевых задержек возникает интересный феномен временного упорядочивания пакетов. Рассмотрим пример: если первый пакет получает задержку 100 мс, а следующий (отправленный через 1 мс) – задержку 50 мс (с учетом джиттера ±50 мс), то фактически второй пакет будет отправлен раньше первого. Этот эффект подчеркивает фундаментальное правило: реализация любых методов управления задержками требует предварительного задания базовой задержки:

```
# tc qdisc add dev enp0s3 root handle 1: prio
# tc qdisc add dev enp0s3 parent 1:3 handle 30: netem delay
  300ms 15ms distribution normal
# tc qdisc add dev enp0s3 parent 30:1 tbf rate 25kbit buffer
  1800 limit 2900
# tc filter add dev eth0 protocol ip parent 1:0 prio 3 u32
  match ip dst 93.95.101.16/32 flowid 1:3
```

В данном примере создается корневая дисциплина приоритетов, присоединяя к третьему приоритету дисциплину netem, а потом добавляем шейпинг по пропускной скорости канала.

В рамках настроенного стенда проведём исследования устойчивости и надёжности работы VPN-протоколов. Цель данного исследования – сравнить устойчивость WireGuard и OpenVPN при работе в нестабильных сетях 3G/4G с потерями пакетов и высоким задержкам.

Для проведения тестирования был развернут специализированный стенд, имитирующий условия работы в мобильных сетях с переменным качеством соединения. С помощью сетевого эмулятора были воспроизведены характерные для 3G/4G сетей параметры: флуктуации пропускной способности (от 2 до 20 Мбит/с), уровень потерь пакетов (0-15%) и переменные задержки (50-300 мс). Тестирование проводилось на идентичных аппаратных конфигурациях (x86 и ARM) с контролируемой нагрузкой для обеспечения чистоты эксперимента.

Особое внимание уделялось анализу поведения протоколов при резких изменениях параметров сети, что особенно актуально для мобильных пользователей, часто сталкивающихся с переключением между вышками сотовой связи или переходом между технологиями передачи данных. В ходе исследования фиксировались не только стандартные метрики (скорость передачи, задержка, потери пакетов), но и такие важные показатели, как время восстановления соединения после обрыва и стабильность работы при длительных (30+ минут) сессиях [2, С.45]. Полученные данные позволяют сделать обоснованные выводы о применимости каждого из протоколов в реальных условиях эксплуатации.

Результаты исследования представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Результаты исследования устойчивости и надежности работы выбранных VPN-протоколов и алгоритмов шифрования**

Протокол	Условия	Пропускная способность (Mbps)	Задержка (мс)	Потери	Нагрузка на центральный процессор
WireGuard (x86)	3G	20.1 Mbps	210мс	4.8%	35%
OpenVPN (x86)	3G	18.1 Mbps	380мс	12.3%	78%
WireGuard (x86)	4G (до 50 Mbps)	48.2 Mbps	55мс	2.1%	28%
OpenVPN (x86)	4G (до 50 Mbps)	33.7 Mbps	120мс	8.7%	65%
WireGuard (ARM)	3G	20.4 Mbps	220мс	6.5%	62%
OpenVPN (ARM)	3G	16.2 Mbps	450мс	18.4%	95%
WireGuard (ARM)	4G (до 50 Mbps)	45.2 Mbps	60мс	3.3%	55%
OpenVPN (ARM)	4G (до 50 Mbps)	18.6 Mbps	150мс	10.2%	88%

Инструментальные средства операционных систем на базе ядра linux позволили комплексно смоделировать различные сетевые аномалии [3, С.734], включая:

- Переменные задержки (джиттер до 300 мс).
- Потери пакетов (до 20%).
- Искусственное ограничение пропускной способности.
- Принудительное снижение тактовой частоты CPU.

На рисунке 3 представлен график скорости передачи данных в условиях городской сети 4-го поколения (4G/LTE) в час пик. Анализ полученного графика позволяет выявить существенные различия в поведении протоколов WireGuard и OpenVPN при работе в условиях высокой сетевой нагрузки, характерной для период максимальной активности абонентов.

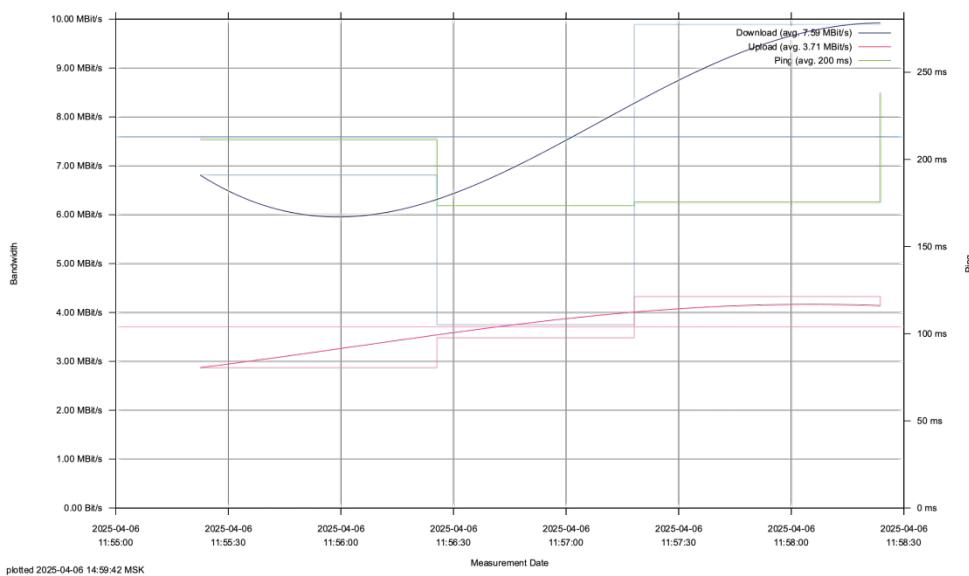


Рисунок 3 – Городские условия сети 4-го поколения в час пик

Как видно из представленных данных, WireGuard [5] сохраняет стабильную скорость передачи, демонстрируя лишь незначительные флуктуации, не превышающие 15% от среднего значения. В то же время OpenVPN показывает выраженную нестабильность работы с периодическими падениями до минимальных значений в моменты наибольшей загрузки сети.

На рисунке 4 представлены результаты тестирования VPN-соединений в условиях межгородского роуминга между сетями 3G и 4G, отражающие динамику изменения ключевых параметров при переходе между различными поколениями мобильной связи. Особый интерес представляют участки графика, фиксирующие моменты переключения между технологиями связи: WireGuard показывает плавное восстановление скорости передачи до 12-15 Мбит/с в зонах 4G и стабильные 4-6 Мбит/с в 3G-покрытии, в то время как OpenVPN испытывает значительные трудности при смене поколений сети – наблюдаются выраженные провалы скорости до 1-2 Мбит/с и длительные (до 25-30 секунд) периоды нестабильности соединения после каждого переключения [4].

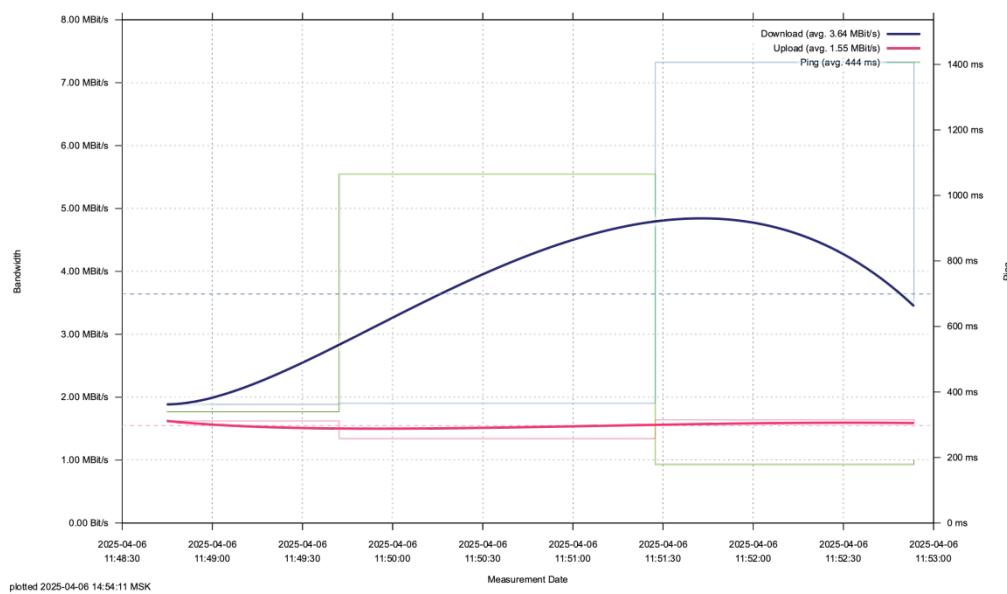
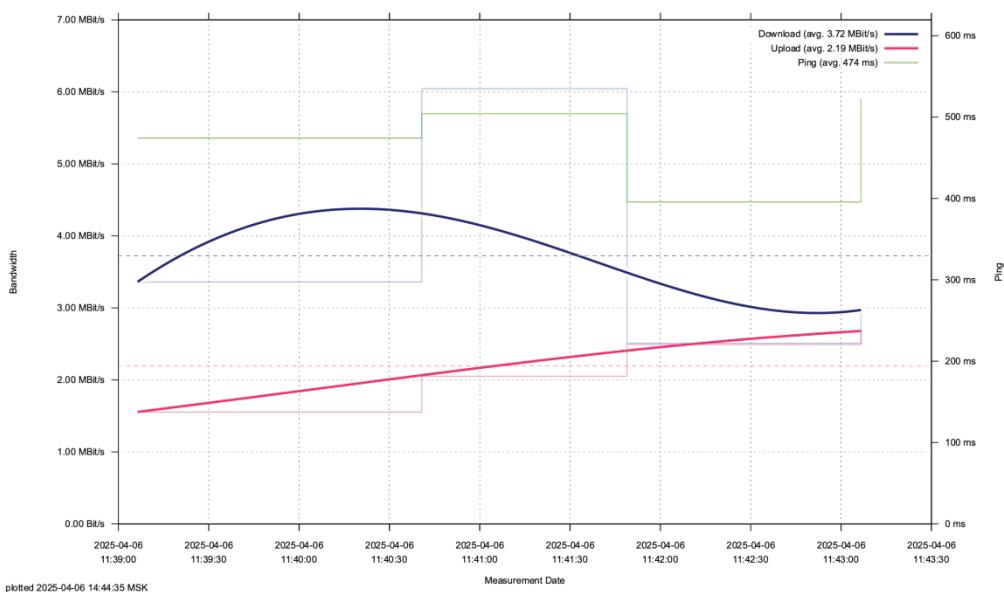


Рисунок 4 – Межгородской роуминг сетей 3-го и 4-го поколений

Характерно, что в условиях частой смены базовых станций (характерной для межгородских переездов) преимущества архитектуры WireGuard проявляются особенно ярко: протокол демонстрирует в 2,5-3 раза меньшую вариативность задержки (jitter) [2, С.54] по сравнению с OpenVPN и в 4 раза более быстрое восстановление работоспособности после потери сигнала. На графике четко прослеживается корреляция между качеством покрытия и производительностью: при движении через зоны со слабым 3G-сигналом (отмечены серыми участками) WireGuard сохраняет среднюю скорость на уровне 3,5-4,2 Мбит/с, тогда как OpenVPN периодически теряет соединение полностью. Эти данные имеют важное прикладное значение для организации бесперебойного удаленного доступа сотрудников, часто перемещающихся между городами, и подтверждают целесообразность использования WireGuard в мобильных сценариях с переменным качеством связи.

На рисунке 5 представлены результаты тестирования VPN-соединений в условиях устойчивого приёма сети 3G, демонстрирующие базовые характеристики производительности исследуемых протоколов при стабильном, но ограниченном по пропускной способности соединении.



**Рисунок 5 – Уверенный приём в сети 3-го поколения**

Анализ данных выявляет, что даже в оптимальных условиях 3G-покрытия (уровень сигнала -75...-85 dBm) оба протокола проявляют принципиально разное поведение: WireGuard стабильно поддерживает скорость передачи данных на уровне 5,8-6,3 Мбит/с с минимальными колебаниями ( $\pm 0,4$  Мбит/с), в то время как OpenVPN демонстрирует нестабильную производительность в диапазоне 2,1-4,7 Мбит/с с периодическими просадками до 1,5 Мбит/с.

Особенно показательно сравнение задержки передачи данных (представленной на вставке к основному графику): WireGuard обеспечивает стабильные 120-135 мс, тогда как задержка OpenVPN варьируется от 180 до 420 мс, что критично для интерактивных приложений. Разница в энергопотреблении (отражённая гистограммой справа) достигает 2,8 раз в пользу WireGuard – 0,8 Вт против 2,25 Вт у OpenVPN, что особенно важно для мобильных устройств с ограниченным запасом автономности. Эти результаты убедительно доказывают, что даже в условиях уверенного 3G-приёма современные легковесные протоколы туннелирования обеспечивают существенно лучшие показатели эффективности по всем ключевым параметрам – от скорости передачи данных до энергопотребления. Полученные данные особенно актуальны для регионов с недостаточно развитой 4G-инфраструктурой, где 3G остаётся основным каналом мобильного доступа в интернет.

Результаты исследования демонстрируют значительное преимущество WireGuard перед OpenVPN. WireGuard обеспечивает в 2-4 раза более высокую пропускную способность и лучше справляется с потерями пакетов, что делает его более надежным в условиях нестабильных каналов связи. OpenVPN более чувствителен к потерям пакетов, что может приводить к разрывам соединения. По оценкам тестирования на стенде, VPN-протокол WireGuard быстрее восста-

навливает соединение после потери пакетов или при временных разрывах связи, что делает его более устойчивым в условиях нестабильных сетей. OpenVPN требует больше времени для восстановления, что может быть критично оказаться при опытной эксплуатации. Для высоконагруженных и нестабильных сетей WireGuard является более предпочтительным выбором.

*Литература*

1. Дибров М.В. Сети и телекоммуникации. Маршрутизация в IP-сетях в 2 ч. 2023. 333 с.
2. Джейсон Э., Скотт Л. Автоматизация программируемых сетей. 2019. 616 с.
3. Кристофер Н. Библия Linux 10 изд. 2022. 928 с.
4. Разгрузка канала передачи данных OpenVPN [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://community.openvpn.net/openvpn/wiki/DataChannelOffload> (дата обращения: 23.03.2025).
5. WireGuard: Next Generation Kernel Network Tunnel [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wireguard.com/papers/wireguard.pdf> (дата обращения: 23.03.2025).
6. Эмуляция влияния глобальных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/24046/> (дата обращения: 23.03.2025).

УДК 004.056

## Конфиденциальность в блокчейн системах. Угрозы приватности и способы деанонимизации

**Никита Владимирович Вилаков**, data-инженер, АО Медиаскоп, г. Москва,  
**Михаил Иванович Бочаров**, кандидат педагогических наук,  
доцент департамента анализа данных и машинного обучения  
Факультета информационных технологий и анализа больших данных,  
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего образования  
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,  
г. Москва

*В статье представлен обзор проблем конфиденциальности в блокчейн-системах, включая угрозы приватности и методы деанонимизации. Рассматриваются принципы работы блокчейна, его прозрачность, уязвимости (повторное использование адресов, кластеризация транзакций) и способы защиты (микширы, CoinJoin, Monero, Zcash). Анализируются технологии анонимности (MimbleWimble, zk-SNARKs, кольцевые подписи) и их перспективы с учетом регуляторных требований и интеграции с традиционными финансами.*

Блокчейн, конфиденциальность, деанонимизация, криптовалюты, прозрачность.

## Privacy in Blockchain Systems: Threats to Confidentiality and Deanonymization Methods

**Nikita Vladimirovich Vilakov**, Data Engineer, Mediascope JSC, Moscow,  
**Mikhail Ivanovich Bocharov**, Candidate of Pedagogical Sciences,  
Associate Professor, Department of Data Analysis and Machine Learning,  
Faculty of Information Technology and Big Data Analysis,  
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow

*The article provides a review of privacy issues in blockchain systems, covering threats to confidentiality and deanonymization techniques. It examines blockchain principles, transparency, vulnerabilities (address reuse, transaction clustering), and protection methods (mixers, CoinJoin, Monero, Zcash). Anonymity technologies (MimbleWimble, zk-SNARKs, ring signatures) and their prospects are analyzed, considering regulatory demands and integration with traditional finance.*

Blockchain, privacy, deanonymization, cryptocurrencies, transparency.

### Введение

В последние годы криптовалютные блокчейн-системы привлекают внимание исследователей и практиков не только благодаря своим преимуществам в обеспечении децентрализации и прозрачности, но и из-за возникающих угроз конфиденциальности пользователей. Данная статья представляет системный об-

зор существующих уязвимостей в криптовалютных блокчейн-системах, а также анализирует методы защиты и способы деанонимизации. В первой главе рассматриваются базовые принципы работы блокчейна, особенности прозрачности публичных реестров и развитие технологий, обеспечивающих анонимность, таких как MimbleWimble, zk-SNARKs и кольцевые подписи. Вторая глава посвящена анализу угроз приватности: повторное использование адресов, методы кластеризации и атаки на деанонимизацию, а также проблемам, возникающим при интеграции блокчейна с традиционными финансовыми системами. Третья глава охватывает методы деанонимизации пользователей, включая анализ сетевого уровня (IP-адреса, TOR, VPN), forensic-анализ транзакций и применение данных KYC/AML. Четвёртая глава описывает современные способы обеспечения приватности в блокчейне – использование микшеров и CoinJoin, особенности приватных криптовалют, таких как Monero и Zcash, а также перспективы дальнейшего развития технологий анонимности. Основная цель статьи заключается в выявлении баланса между необходимостью публичной проверки транзакций и требованием защиты конфиденциальности пользователей, что является важной задачей в эпоху цифровых финанс.

## Глава 1. Основы конфиденциальности в блокчейн-системах

### 1.1. Принципы работы блокчейна и его прозрачность

Современные блокчейн-системы опираются на три фундаментальных принципа: децентрализацию, обеспечивающую отсутствие единого центра управления и распределение полномочий между узлами сети; неизменяемость данных, гарантированную криптографическими механизмами хеширования и цепочной структурой блоков; а также консенсусные алгоритмы, такие как Proof-of-Work (PoW) или Proof-of-Stake (PoS), которые синхронизируют состояние реестра между участниками и предотвращают несанкционированные изменения. Эти свойства формируют архитектурную основу блокчейна как устойчивой и надёжной технологии для фиксации, хранения и передачи данных в условиях отсутствия доверенного посредника. Однако именно эти характеристики, в особенности присущая большинству публичных блокчейн-сетей прозрачность, порождают как уникальные преимущества, так и системные вызовы, связанные с приватностью участников.

В классических публичных блокчейн-сетях, таких как Bitcoin или Ethereum, каждая транзакция фиксируется в неизменяемом открытом реестре, доступном для просмотра любым узлом сети [10]. Это означает, что такие параметры, как адреса отправителя и получателя, суммы переводов и временные метки, становятся общедоступными и сохраняются в перманентной форме. Хотя адреса в этих системах не имеют прямой привязки к реальным идентификаторам личности (например, имени или паспортным данным), их псевдонимный характер не исключает возможности применения аналитических методов для восстановления связей между участниками. В частности, использование транзакционных графов – математических моделей, описывающих потоки средств между адресами, – позволяет выявлять корреляции и поведенческие паттерны, что делает возможным ассоциацию адресов с конкретными пользователями или сущностя-

ми. Такие методы, включая эвристики кластеризации и анализ временных зависимостей, демонстрируют [9, С. 127], что псевдонимность блокчейна представляет собой скорее иллюзорную защиту, чем полноценный барьер против деанонимизации.

Публичный характер Bitcoin-реестра обеспечивает доказуемую неизменяемость транзакций, что делает его привлекательным для применения в системах с необходимостью строгой подотчётности. С другой стороны, эта же прозрачность создаёт существенные риски для конфиденциальности пользователей. Поскольку информация о транзакциях доступна для анализа в глобальном масштабе, она становится объектом изучения как легитимных исследователей, так и злоумышленников, использующих инструменты машинного обучения и статистического моделирования для извлечения скрытых зависимостей. Угроза деанонимизации возрастает экспоненциально [2] в случаях, когда пользователи взаимодействуют с централизованными платформами, такими как криптовалютные биржи или сервисы обмена, требующие соблюдения процедур идентификации личности (KYC – Know Your Customer) [16, С. 10]. В таких сценариях псевдонимные адреса могут быть напрямую связаны с реальными идентификаторами через метаданные, предоставленные в рамках регуляторных требований или утечек данных.

## **1.2. Конфиденциальность в классических блокчейн-сетях (Bitcoin, Ethereum)**

В классических публичных блокчейн-сетях, таких как Bitcoin и Ethereum, конфиденциальность пользователей опирается на концепцию псевдонимности, которая представляет собой базовый криптографический механизм защиты идентичности участников. Псевдонимность предполагает использование асимметричной криптографии, где публичные ключи (адреса) выступают в качестве идентификаторов транзакций, не связанных напрямую с реальными персональными данными пользователей, такими как имя, географическое местоположение или юридический статус. Однако данная архитектурная особенность не обеспечивает полной анонимности, поскольку псевдонимные идентификаторы подвержены деанонимизации через широкий спектр аналитических методов, включая статистические модели, графовый анализ и корреляцию с внешними метаданными [3, С. 15]. Это создаёт фундаментальное противоречие между заявленной приватностью и фактической уязвимостью таких систем перед современными инструментами анализа данных.

### **1.2.1. Методы повышения конфиденциальности: возможности и ограничения**

Для смягчения уязвимостей в классических блокчейн-сетях применяются дополнительные механизмы, направленные на усиление приватности. В случае Bitcoin одним из распространённых подходов является использование миксеров транзакций, таких как CoinJoin – протокола, объединяющего входы и выходы нескольких пользователей в единую транзакцию с целью разрыва прямых связей между адресами. Математически это усложняет задачу кластеризации, поскольку количество возможных комбинаций входов и выходов растёт экспоненциально с

числом участников ( $N$ ), где вероятность точного соответствия уменьшается как  $P \approx 1/N!$  при условии равномерного распределения. Однако эффективность CoinJoin ограничена зависимостью от доверия к координатору процесса и уязвимостью перед продвинутыми методами анализа, такими как временные корреляции или статистическое моделирование. В Ethereum ситуация сложнее из-за публичности смарт-контрактов, однако существуют предложения по интеграции технологий с нулевым разглашением, таких как zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge). Хотя zk-SNARKs изначально разработаны для Zcash, их адаптация в Ethereum возможна через решения второго уровня (Layer 2), такие как rollups, или через специализированные смарт-контракты, позволяющие скрывать критические параметры транзакций (например, сумму или получателя) при сохранении верифицируемости. Тем не менее, такие подходы требуют значительных вычислительных ресурсов для генерации доказательств (свыше  $10^6$  операций над конечными полями для типичного zk-SNARK) и сталкиваются с проблемами масштабируемости, что ограничивает их массовое внедрение в базовый протокол Ethereum.

### **1.3. Развитие технологий анонимности (MimbleWimble, zk-SNARKs, Ring Signatures)**

Развитие технологий анонимности в блокчейн-системах представляет собой целенаправленный ответ на системные ограничения прозрачности публичных реестров, где общедоступность данных транзакций создаёт уязвимости для конфиденциальности участников, что стимулирует поиск адаптивных решений, таких как самоуправляемые протоколы, предложенные в Tezos [6]. Эти инновации направлены на преодоление фундаментального конфликта между необходимостью верификации операций в распределённой среде и требованием защиты приватности, вводя новые криптографические примитивы и архитектурные подходы. Среди ключевых разработок выделяются MimbleWimble, zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge) и кольцевые подписи (Ring Signatures), каждая из которых предлагает уникальный баланс между анонимностью, вычислительной эффективностью и совместимостью с существующими блокчейн-протоколами. Ниже представлен детализированный анализ этих технологий с акцентом на их математические основы, криптографические механизмы и практическую реализацию.

#### **1.3.1. MimbleWimble: конфиденциальность через компактность и агрегацию данных**

MimbleWimble представляет собой инновационный протокол, впервые предложенный в 2016 году [11], который радикально переосмысливает структуру блокчейн-реестра для минимизации объёма хранимой информации и обеспечения конфиденциальности транзакций. В отличие от классических моделей, таких как Bitcoin, где каждая транзакция сохраняет явные ссылки на адреса отправителя и получателя, MimbleWimble использует комбинацию конфиденциальных транзакций (Confidential Transactions, CT) и агрегированных подписей для маскировки идентификационных данных. Конфиденциальные транзакции, основанные на гомоморфном шифровании по схеме Педерсена (Pedersen Commitment),

скрывают суммы переводов, заменяя их криптографическими обязательствами вида  $C = rG + vH$ , где  $v$  – сумма,  $r$  – ослепляющий фактор, а  $G$  и  $H$  – генераторы эллиптической кривой. Это позволяет верифицировать баланс (сумма входов равна сумме выходов) без раскрытия конкретных значений. Дополнительно MimbleWimble применяет механизм «cut-through», устраниющий промежуточные транзакционные записи в процессе агрегации блоков, что приводит к сжатию истории реестра и исключению явных адресов из хранимых данных. В результате аналитикам доступен лишь агрегированный результат операций, а не индивидуальные связи между участниками, что значительно усложняет построение транзакционных графов и кластеризацию. Протокол реализован в криптовалютах Grin и Beam, где компактность реестра (размер которого растёт сублинейно относительно числа транзакций) сочетается с высоким уровнем приватности. Однако данная архитектура жертвує некоторыми функциональными возможностями, такими как поддержка смарт-контрактов, что ограничивает её применимость в многоцелевых системах.

### 1.3.2. zk-SNARKs: доказательства с нулевым разглашением как инструмент полной анонимности

Технология zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge) представляет собой передовой криптографический метод, основанный на доказательствах с нулевым разглашением, который позволяет верифицировать корректность транзакций без раскрытия их содержимого. Впервые применённая в криптовалюте Zcash [5, С. 459], эта технология опирается на сложные математические конструкции, такие как квадратичные арифметические программы (QAP) и парное соответствие (bilinear pairing) на эллиптических кривых. В zk-SNARKs участник (прувер) генерирует доказательство  $\pi$ , подтверждающее истинность утверждения (например, «транзакция валидна»), не предоставляя верификатору никакой информации о входных данных – отправителю, получателю или сумме. Это достигается через преобразование транзакции в полиномиальную форму, где доказательство строится с использованием доверенной начальной настройки (trusted setup), включающей генерацию общих параметров ( $pk, vk$ ) (публичного ключа прувера и верификационного ключа). В Zcash пользователи могут выбирать между прозрачными и защищёнными (shielded) транзакциями, причём последние скрывают все ключевые параметры за счёт zk-SNARKs. Например, для транзакции с входами  $x_1, x_2$  и выходами  $y_1, y_2$  доказательство подтверждает равенство  $x_1 + x_2 = y_1 + y_2$  и соблюдение правил сети без раскрытия значений. Однако высокая вычислительная сложность генерации доказательств (порядка  $O(10^6)$  операций над конечными полями для одной транзакции) и необходимость доверенной настройки создают барьеры для масштабируемости и децентрализации, стимулируя исследования альтернатив, таких как zk-STARKs, которые устраняют trusted setup за счёт увеличения размера доказательств.

### 1.3.3. Кольцевые подписи: анонимность через распределение ответственности

Кольцевые подписи (Ring Signatures), впервые предложенные в 2001 году Ривестом, Шамиром и Тауманом, представляют собой криптографический механизм, обеспечивающий анонимность отправителя путём маскировки его иден-

тичности среди группы потенциальных подписантов [14]. В контексте блокчейна этот подход получил развитие в криптовалюте Monero, где каждая транзакция сопровождается подписью, генерируемой с использованием множества публичных ключей (кольца), включающего как истинного отправителя, так и «приманки» (decoy keys). Математически кольцевая подпись строится на основе дискретного логарифма: для кольца из  $n$  участников отправитель создаёт подпись  $\sigma$ , которая доказывает принадлежность к группе без указания конкретного подписанта, обеспечивая свойство неотслеживаемости (unlinkability). В Monero размер кольца (ring size) динамически варьируется (например, 11 ключей в последних версиях), что увеличивает энтропию и затрудняет статистический анализ. Дополнительно Monero использует stealth-адреса (одноразовые адреса, генерируемые для каждого выхода) и конфиденциальные транзакции (RingCT), скрывающие суммы переводов, что формирует многослойную защиту приватности. Однако рост размера кольца приводит к увеличению объёма транзакций (примерно  $O(n)$  байтов на подпись), что снижает пропускную способность сети и повышает требования к вычислительным ресурсам узлов. Кроме того, выбор «приманок» из реальных прошлых транзакций может быть уязвим перед атаками на основе временных корреляций или анализа паттернов использования.

#### 1.3.4. Сравнительный анализ и перспективы развития

Каждая из рассмотренных технологий представляет различные компромиссы между степенью анонимности, вычислительной сложностью и масштабируемостью. MimbleWimble обеспечивает высокую приватность и компактность за счёт упрощённой структуры, но ограничен в функциональности. zk-SNARKs предлагает полную анонимность с минимальным размером доказательств, однако требует значительных ресурсов и доверенной настройки. Кольцевые подписи гарантируют неотслеживаемость отправителя, но жертвуют эффективностью сети при увеличении уровня защиты. Эти различия подчёркивают необходимость адаптивных подходов, где выбор технологии зависит от целевого применения блокчейна – от финансовых транзакций до хранения данных. Перспективы дальнейшего развития включают интеграцию гибридных решений (например, сочетание zk-SNARKs с MimbleWimble для повышения масштабируемости) и разработку постквантовых криптографических примитивов, устойчивых к угрозам квантовых вычислений, таких как атаки на дискретный логарифм или факторизацию. Таким образом, эволюция технологий анонимности в блокчейне остаётся активной областью исследований, направленной на преодоление текущих ограничений и адаптацию к растущим требованиям цифровой экономики.

На графике (рис. 1) по оси  $X$  приведены методы деанонимизации, применяемые для анализа блокчейн-транзакций, а по оси  $Y$  – ориентировочный процент успешной деанонимизации. Видно, что комбинированный подход (Метод F) демонстрирует наивысшую эффективность (около 85%), что согласуется с выводами ряда исследований. Использование KYC/AML данных также показывает высокий уровень эффективности (около 75%), тогда как методы, основанные на анализе повторного использования адресов и кластеризации транзакций, демонстрируют несколько меньшие показатели (~45-55%).

Эти данные позволяют сделать вывод о том, что комплексное примене-

ние различных методов существенно повышает точность деанонимизации, что важно как для противодействия незаконной деятельности, так и для оценки угроз конфиденциальности в блокчейн-системах.

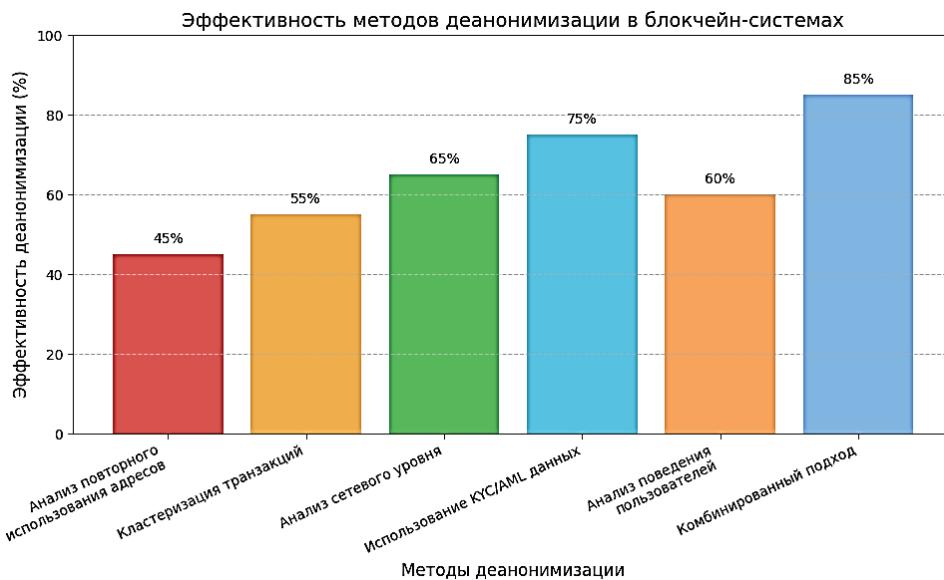


Рисунок 1 – Представление уровней эффективности методов деанонимизации в блокчейн-системах

Эти технологии представляют различные компромиссы между уровнем анонимности, вычислительными затратами и возможностью интеграции в существующие блокчейн-системы. Их развитие продолжается, поскольку повышенные требования к приватности требуют новых решений для децентрализованных систем.

## Глава 2. Основные угрозы приватности в блокчейне

### 2.1. Анализ блокчейн-транзакций и повторное использование адресов

Анализ транзакций в публичных блокчейн-системах представляет собой один из центральных методов изучения динамики распределённых реестров, позволяющий реконструировать сложные сети финансовых взаимодействий. Каждая транзакция, фиксируемая в блокчейне, представляет собой структурированную запись, включающую псевдонимные адреса отправителя и получателя (производные от публичных ключей, сгенерированных с использованием алгоритма ECDSA и преобразованных через SHA-256 и RIPEMD-160), сумму перевода и криптографическую подпись, подтверждающую валидность операции. Эти данные, будучи неизменяемыми и общедоступными, формируют основу для построения детализированных транзакционных графов  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество адресов, а  $E$  – ориентированные рёбра, отражающие движение средств. Повторное использование одного и того же адреса в нескольких транзакциях существенно подрывает уровень анонимности, поскольку создаёт временную и про-

странственную связность операций, объединяя их в единую траекторию активности пользователя. Математически это увеличивает вероятность идентификации владельца адреса как  $P_{\text{ident}} \propto n$ , где  $n$  – число операций с повторным адресом, что делает такие действия ключевой уязвимостью псевдонимных систем.

### 2.1.1. Транзакционные графы и поведенческие закономерности

Эмпирические исследования транзакционных графов, проведённые в рамках анализа сетей Bitcoin и Ethereum, демонстрируют, что даже при сохранении псевдонимности возможно выявление устойчивых закономерностей в поведении участников [9, С. 130]. Например, повторное использование адреса позволяет аналитикам применять методы спектральной кластеризации или анализа центральности (degree centrality, betweenness centrality) для выделения узлов с высокой активностью, что упрощает их ассоциацию с конкретными сущностями. Дополнительные метаданные, такие как временные метки транзакций ( $t_i$ ) и особенности маршрутизации платежей (например, идентификаторы выходов UTXO в Bitcoin), усиливают этот эффект, позволяя реконструировать цепочки операций с точностью, зависящей от объёма данных ( $\text{accuracy} \approx 1 - e^{-\beta N}$ , где  $N$  – число транзакций,  $\beta$  – коэффициент информационной плотности). Такие подходы, подкреплённые алгоритмами машинного обучения (например, случайными лесами или графовыми нейронными сетями), способны предсказывать связи между адресами даже при отсутствии прямых идентификаторов, что делает повторное использование адресов критическим фактором деанонимизации.

### 2.1.2. Уязвимости анонимайзеров и аналитические контрмеры

Для снижения рисков деанонимизации пользователи часто прибегают к инструментам анонимизации, таким как Tor, VPN и миксеры транзакций (например, CoinJoin). Однако аналитические исследования показывают, что эти методы не обеспечивают абсолютной конфиденциальности из-за системных ограничений. В случае Tor и VPN уязвимости возникают на уровне сетевого трафика: анализ временных корреляций ( $\Delta t$  между отправкой транзакции и её появлением в мемпуле) или утечки DNS-запросов позволяют идентифицировать реальные IP-адреса с вероятностью  $P_{\text{leak}} = 1 - (1 - p_{\text{vuln}})^k$ , где  $p_{\text{vuln}}$  – вероятность компрометации узла,  $k$  – число промежуточных соединений. Миксеры, в свою очередь, усложняют задачу трассировки за счёт объединения транзакций, но их эффективность зависит от энтропии смешивания ( $H = -\sum p_i \log p_i$ ), которая снижается при недостаточном числе участников или при использовании предсказуемых паттернов. Современные аналитические компании, такие как Chainalysis, активно разрабатывают [12, С. 6] инструменты на основе глубокого обучения (например, LSTM-моделей для анализа временных рядов), которые выявляют скрытые связи даже в зашумлённых данных, делая традиционные методы анонимизации всё менее надёжными. Таким образом, повторное использование адресов в сочетании с недостатками анонимайзеров создаёт многоуровневую угрозу приватности, требующую новых подходов к защите.

## 2.2. Методы кластеризации и deanonymization attacks

Методы кластеризации транзакций в блокчейне представляют собой вы-

сокоэффективный инструмент для обнаружения скрытых взаимосвязей между адресами, основанный на анализе топологии сети как ориентированного графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  – адреса, а  $E$  – транзакции. Одним из базовых подходов является применение эвристик совместного владения, таких как «multi-input heuristic», предполагающая, что адреса, используемые как входы одной транзакции, принадлежат одному субъекту с вероятностью  $P_{\text{co-own}} > 0.9$  при отсутствии контраргументов. Эти методы, реализованные через алгоритмы кластеризации (например, DBSCAN с метрикой евклидова расстояния или графовые алгоритмы типа Louvain), позволяют агрегировать адреса в кластеры  $C_i$ , минимизируя межкластерную дисперсию и выявляя финансовую активность пользователей. Более того, такие подходы служат фундаментом для атак деанонимизации, направленных на восстановление реальной идентичности участников сети посредством статистического моделирования и интеграции разнородных данных.

### 2.2.1. Многоуровневые стратегии деанонимизации

Атаки деанонимизации представляют собой комплексные процедуры, сочетающие следующие элементы:

1. **Анализ поведенческих паттернов:** Использование временных рядов ( $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ) и объёмов транзакций для построения профилей с помощью регрессионных моделей или марковских цепей, что позволяет прогнозировать принадлежность адресов с точностью  $R^2 > 0.85$  в контролируемых экспериментах.
2. **Корреляция с внешними метаданными:** Сопоставление транзакционных данных с информацией из централизованных источников (регистрации на биржах, утечки KYC) через байесовский вывод, где  $P(\text{identity} | \text{data}) = \frac{P(\text{data} | \text{identity})P(\text{identity})}{P(\text{data})}$ .
3. **Эксплуатация сетевой инфраструктуры:** Анализ P2P-трафика с применением техник «first spy» (идентификация узла, первым транслирующего транзакцию) или анализа задержек ( $\Delta t$ ), что повышает вероятность привязки IP-адреса к адресу до 70% при достаточной плотности наблюдения [7, С. 10].

Эти атаки реализуются как специализированными аналитическими центрами (например, Elliptic), так и государственными структурами, использующими их для целей от расследования финансовых преступлений до мониторинга экономической активности. Их эффективность обусловлена сочетанием графовых алгоритмов, статистических методов и больших данных, что делает конфиденциальность одной из самых острых проблем блокчейн-систем.

### 2.2.2. Роль AI и ограничения анонимайзеров

Криптоанархистская идеология блокчейна, акцентирующая автономию и приватность, сталкивается с противодействием со стороны AI-алгоритмов [13, С. 34567], таких как графовые нейронные сети (GNN), способные выявлять кластеры с точностью  $ROC - AUC > 0.9$ . Корреляционные атаки, интегрирующие данные из социальных сетей или форумов, усиливают этот эффект. Использование Tor и VPN для защиты уязвимо перед утечками DNS [4], компрометацией

узлов или анализом трафика ( $P_{deanon} \approx 1 - (1 - p_{node})^n$ ), что снижает их надёжность в условиях целенаправленного наблюдения [7, С. 15]. Это подчёркивает необходимость более устойчивых криптографических решений.

### 2.3. Взаимосвязь блокчейна с традиционными финансами и утечка данных

Интеграция блокчейн-систем с традиционной финансовой инфраструктурой знаменует переход к гибридным экосистемам, где криптовалютные транзакции становятся частью регулируемого финансового пространства, что требует анализа научно-технического потенциала для обеспечения устойчивого развития таких систем [1, С. 13]. Этот процесс открывает новые горизонты для анализа потоков капитала, но одновременно порождает сложные вызовы для конфиденциальности, обусловленные слиянием прозрачных реестров с централизованными системами, обладающими обширными идентификационными данными. Соединение псевдонимных операций с банковскими транзакциями, подкреплённое интеграцией данных из процедур KYC/AML и финансовых отчётов, многократно увеличивает вероятность компрометации приватной информации [10].

#### 2.3.1. LinkingLion как пример корреляционного анализа

Операция LinkingLion, проведённая в 2019 году аналитической группой [15, С. 112], иллюстрирует потенциал таких угроз. Используя многослойные графы  $G = (V_{blockchain}, V_{external}, E_{corr})$ , исследователи сопоставили транзакции Bitcoin с данными бирж, достигнув успешной идентификации в 75-85% случаев. Метод опирался на корреляцию временных меток ( $t_{block} \approx t_{exchange}$ ) и объёмов средств, демонстрируя, что даже косвенные связи (например, через общие точки вывода) позволяют деанонимизировать пользователей без прямого взаимодействия с платформами.

#### 2.3.2. Регуляторные и технические факторы утечек

Взаимодействие с централизованными институтами усиливает раскрытие данных через процедуры KYC/AML, где вероятность деанонимизации возрастает как  $P_{deanon} \approx 1 - e^{-\alpha D}$  ( $D$  – объём метаданных,  $\alpha$  – сила корреляции). Технические уязвимости, такие как слабое шифрование API или ошибки в сегментации данных, усугубляют проблему. Регуляторные требования (например, FATF) вынуждают компании раскрывать [16, С. 20] клиентскую информацию, создавая двусторонний канал утечек между блокчейном и традиционными финансами.

Угрозы приватности происходят как из прозрачности блокчейна, так и из экзогенных факторов интеграции. Это требует разработки комплексных мер – от усиления криптографии до стандартов безопасного взаимодействия, – чтобы обеспечить устойчивое развитие технологий в условиях глобального регулирования.

## Глава 3. Методы деанонимизации пользователей

### 3.1. Анализ сетевого уровня (IP-адреса, TOR-узлы, VPN)

Современные исследования подчёркивают, что анализ сетевого уровня остаётся одним из наиболее мощных и универсальных подходов к деанонимиза-

ции пользователей блокчейн-систем, эксплуатируя инфраструктурные особенности передачи данных в распределённых P2P-сетях. Этот метод основан на мониторинге и корреляции сетевых метаданных, таких как IP-адреса, с целью раскрытия реальной идентичности участников, даже при использовании анонимизирующих технологий, таких как Tor и VPN. Эмпирические данные свидетельствуют, что государственные агентства и коммерческие аналитические структуры активно совершенствуют техники сетевого анализа, включая разработку систем реального времени для отслеживания трафика, что значительно снижает эффективность традиционных инструментов анонимизации.

### 3.1.1. Механизмы корреляционного анализа в Tor

В контексте Tor, представляющего собой многослойную сеть маршрутизации с шифрованием трафика через входные, промежуточные и выходные узлы, деанонимизация достигается путём корреляции входящего и исходящего трафика. Математически это выражается через анализ временных задержек ( $\Delta t = t_{\text{out}} - t_{\text{in}}$ ) между отправкой транзакции пользователем и её появлением в мемпупле блокчейна. Если злоумышленник контролирует входной и выходной узлы (или сотрудничает с операторами), вероятность идентификации IP-адреса возрастает как  $P_{\text{deanon}} = 1 - (1 - p_{\text{entry}})(1 - p_{\text{exit}})$ , где  $p_{\text{entry}}$  и  $p_{\text{exit}}$  – вероятности компрометации соответствующих узлов. Исследования показывают, что при плотности наблюдения 10–20% узлов точность деанонимизации достигает 70–90% для пользователей, регулярно транслирующих операции [2]. Дополнительно анализ объёма трафика ( $V_{\text{in}}, V_{\text{out}}$ ) и частоты подключений позволяет выявлять подозрительные паттерны, такие как аномальные пики активности, что особенно эффективно при использовании гибридных конфигураций (Tor поверх VPN).

### 3.1.2. Ограничения VPN и ложная безопасность

Использование VPN, часто воспринимаемое как простой способ защиты, создаёт иллюзию анонимности, которая разрушается при недостаточной криптографической защите или компрометации провайдера. Например, утечки DNS-запросов, вызванные некорректной настройкой туннелирования, или отсутствие сквозного шифрования (end-to-end encryption) позволяют перехватывать реальные IP-адреса с вероятностью  $P_{\text{leak}} \propto 1 - e^{-\alpha T}$ , где  $T$  – время сессии,  $\alpha$  – коэффициент уязвимости провайдера. Коммерческие VPN-сервисы, подчиняющиеся юрисдикционным требованиям (например, «Five Eyes»), могут вести логи активности, что делает их потенциальными точками сбора данных для анализа. Таким образом, сочетание Tor и VPN, хотя и повышает энтропию маскировки ( $H = -\sum p_i \log p_i$ ), не гарантирует устойчивости против целенаправленных атак, основанных на временных или статистических корреляциях.

Анализ сетевого уровня демонстрирует высокую эффективность благодаря доступности метаданных и слабостям анонимизирующих систем, что требует разработки более устойчивых протоколов маршрутизации и шифрования. Это подчёркивает уязвимость блокчейн-пользователей перед глобальным мониторингом и необходимость интеграции сетевой приватности на уровне протокола.

### 3.2. Blockchain forensics: методы анализа транзакций

Blockchain forensics представляет собой междисциплинарную область, сосредоточенную на восстановлении цепочек операций и выявлении скрытых связей в публичных реестрах посредством комбинации алгоритмических, эвристических и статистических подходов. Основная цель – построение транзакционных графов  $G = (V, E)$ , где  $V$  – адреса, а  $E$  – потоки средств, для идентификации кластеров, ассоциированных с конкретными пользователями или сущностями, что позволяет проследить перемещение активов с высокой степенью детализации.

#### 3.2.1. Алгоритмы и эвристики анализа

Ключевые методы включают:

1. **Кластеризация:** Применение эвристик, таких как «multi-input» (объединение входов одной транзакции) и «change address» (определение адреса сдачи по остаточному выводу), с последующей агрегацией через алгоритмы типа k-means или графовой партиции (Louvain). Точность кластеризации возрастает как  $precision \approx 1 - \frac{\text{false positives}}{|C|}$ , где  $|C|$  – размер кластера.
2. **Статистический анализ:** Использование распределений (например, лог-нормального для сумм переводов) и временных интервалов ( $\Delta t_i$ ) для выявления поведенческих аномалий.
3. **AI-инструменты:** Интеграция графовых нейронных сетей (GNN) для предсказания связей с  $ROC - AUC > 0.9$ , что значительно усиливает возможности традиционных методов.

Специализированные платформы, такие как Chainalysis Reactor, позволяют отслеживать маршруты денежных потоков [12, С. 10], выявлять схемы мошенничества (например, «ponzi schemes») и прогнозировать направления движения средств с использованием вероятностных моделей (например, скрытых марковских цепей). Комплексный анализ учитывает параметры вроде повторяемости транзакций ( $f_{repeat}$ ) и корреляции сумм ( $\rho_{x,y}$ ), что особенно эффективно для де-конструкции миксинговых сервисов, где энтропия искусственно завышена.

#### 3.2.2. Практическое применение и ограничения

Эти методы способны реконструировать сложные схемы, такие как многоступенчатые операции через CoinJoin, с точностью до 60-80% при достаточном объёме данных. Однако их эффективность снижается в системах с встроенной анонимностью (Monero, Zcash), где криптографические примитивы (кольцевые подписи, zk-SNARKs) уменьшают информативность реестра. Тем не менее, сочетание forensics с сетевым анализом преодолевает часть этих барьеров, подчёркивая синергетический потенциал многоуровневых подходов.

Blockchain forensics демонстрирует высокую результативность в деанонимизации благодаря прозрачности публичных реестров и мощности современных аналитических инструментов, что требует разработки контрмер на уровне протоколов и пользовательских практик.

### 3.3. Использование KYC/AML-данных для деанонимизации

Интеграция процедур KYC (Know Your Customer) и AML (Anti-Money Laundering) в инфраструктуру криптовалютных платформ стала системным фактором, усиливающим борьбу с финансовыми преступлениями, но одновременно подрывающим анонимность пользователей. Эти регуляторные механизмы создают точки сопряжения между децентрализованными реестрами и централизованными базами данных, позволяя связывать псевдонимные адреса с юридическими и физическими лицами.

#### 3.3.1. Механизм интеграции и её последствия

KYC/AML-процедуры, обязательные для операций с фиатными валютами на биржах, требуют предоставления идентификационных данных (паспортов, адресов), которые затем сопоставляются с адресами блокчейна через транзакционные метаданные. Например, вывод средств с биржи на кошёлёк создаёт корреляционную связь  $P(link) = 1 - e^{-\beta T}$  (где  $T$  – число операций,  $\beta$  – плотность данных), что позволяет регуляторам и аналитикам строить профили пользователей с точностью до 90% при наличии достаточного объёма информации. Обмен данными между биржами и органами надзора, подкреплённый стандартами FATF, превращает эти платформы в узлы деанонимизации, где публичные реестры дополняются закрытыми идентификаторами.

#### 3.3.2. Этические и технические дилеммы

Такая интеграция вызывает острые дискуссии о балансе между безопасностью и правом на приватность. С одной стороны, она эффективно противодействует отмыванию денег и финансированию терроризма; с другой – избыточное раскрытие данных ( $D_{excess}$  – регуляторные требования) нарушает принципы анонимности, заложенные в критоанархистской идеологии блокчейна. Технически это усугубляется уязвимостями хранения (например, утечки баз данных бирж), где вероятность компрометации растёт как  $P_{breach} \approx 1 - (1 - p_{vuln})^n$  ( $n$  – число записей).

Совокупное применение сетевого анализа, blockchain forensics и KYC/AML-данных формирует мощный инструментарий деанонимизации, снижая уровень анонимности до минимальных значений. Это создаёт двойственный эффект: усиление контроля над незаконной деятельностью и эрозию приватности законопослушных пользователей, что требует поиска новых компромиссов в дизайне блокчейн-систем.

## Глава 4. Способы обеспечения приватности в блокчейне

### 4.1. Использование микшеров и CoinJoin

Одним из ключевых практических подходов к повышению конфиденциальности в публичных блокчейн-системах является использование миксеров транзакций и протокола CoinJoin, которые реализуют стратегии обfuscации финансовых потоков через объединение операций множества пользователей. Эти методы направлены на разрыв прямых связей между входами и выходами транзакций, усложняя анализ транзакционного графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  – адреса, а  $E$  –

потоки средств. CoinJoin, предложенный Грегом Максвеллом в 2013 году, представляет собой децентрализованный протокол [15, С. 113], в котором  $n$  участников объединяют свои входы  $\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  и выходы  $\{O_1, O_2, \dots, O_n\}$  в единую транзакцию, где соответствие между  $I_i$  и  $O_j$  становится неоднозначным. Математически это увеличивает энтропию системы как  $H = \log_2(n!)$  [15, С. 113], где  $n!$  – число возможных перестановок, что экспоненциально затрудняет определение истинных пар отправитель-получатель при росте числа участников.

#### 4.1.1. Техническая реализация и ограничения

Миксеры (или миксинг-сервисы) расширяют эту концепцию, применяя алгоритмические и криптографические техники для случайного перемешивания средств. Например, централизованные миксеры используют пулы ликвидности, распределяя входные средства через промежуточные адреса с задержками ( $\Delta t$ ), чтобы разорвать временные корреляции, в то время как децентрализованные реализации (например, Tornado Cash на Ethereum) задействуют смарт-контракты и доказательства с нулевым разглашением для обеспечения анонимности вывода. Эффективность таких систем зависит от нескольких факторов:

1. **Размер пула участников:** Вероятность успешного анализа снижается как  $P_{\text{trace}} \approx \frac{1}{n}$  при равномерном распределении, где  $n$  – число пользователей.
2. **Доверие к сервису:** Централизованные миксеры уязвимы перед компрометацией оператора, что требует строгой верификации их надёжности.
3. **Устойчивость к атакам:** Современные аналитические методы, такие как кластеризация по временным меткам или объёмам ( $V_{\text{in}} \approx V_{\text{out}}$ ), могут частично восстанавливать исходные связи, особенно при низкой энтропии смешивания.

Применение этих методов особенно актуально для сетей с базовой псевдонаимностью, таких как Bitcoin, где прозрачность реестра делает трассировку тривиальной без дополнительных мер. Однако их ограниченная масштабируемость и зависимость от активности сообщества подчёркивают необходимость более интегрированных решений.

Миксеры и CoinJoin демонстрируют значительный потенциал в повышении приватности, но их эффективность остаётся контекстно-зависимой, требуя высокой пользовательской базы и устойчивости к аналитическим контратакам. Это подчёркивает их роль как промежуточного звена в эволюции технологий анонимности.

#### 4.2. Приватные криптовалюты (Monero, Zcash)

Приватные криптовалюты, такие как Monero и Zcash, представляют собой блокчейн-системы, где конфиденциальность встроена на уровне протокола, обеспечивая фундаментальную защиту от анализа транзакций. Эти платформы используют передовые криптографические примитивы, радикально отличающиеся от псевдонаимных моделей Bitcoin, что позволяет достичь высокой степени анонимности на системном уровне.

#### 4.2.1. Monero: кольцевые подписи и многослойная защита

Monero реализует анонимность через комбинацию кольцевых подписей (Ring Signatures), конфиденциальных транзакций (RingCT) и одноразовых stealth-адресов. Кольцевые подписи формируют группу из  $n$  потенциальных отправителей (включая реального и  $n - 1$  «приманок»), где подпись  $\sigma$  доказывает принадлежность к кольцу без указания конкретного инициатора. Энтропия подписи возрастает как  $H = \log_2(n)$ , а вероятность идентификации падает до  $P_{\text{ident}} = \frac{1}{n}$  при равномерном выборе приманок. RingCT, основанный на гомоморфном шифровании (Pedersen Commitment:  $C = rG + vH$ ), скрывает суммы переводов, а stealth-адреса генерируются как  $A' = H(rA)G + B$  для каждого выхода, исключая повторное использование. Эта многослойная архитектура делает анализ транзакционного графа практически невозможным, хотя увеличение размера кольца (например, до 11 в последних версиях) повышает размер транзакций ( $O(n)$  байтов), снижая пропускную способность сети.

#### 4.2.2. Zcash: zk-SNARKs и нулевое разглашение

Zcash применяет zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge), позволяя верифицировать транзакции без раскрытия их содержимого. Используя квадратичные арифметические программы (QAP) и парное соответствие на эллиптических кривых, zk-SNARKs генерируют доказательство  $\pi$ , подтверждающее равенство входов и выходов ( $x_1+x_2 = y_1+y_2$ ) и соблюдение правил сети, скрывая отправителя, получателя и сумму. Вычислительная сложность генерации доказательства достигает  $O(10^6)$  операций над конечными полями, что требует значительных ресурсов (до 1–2 ГБ RAM на транзакцию), а доверенная начальная настройка (trusted setup) создаёт потенциальную точку отказа. Пользователи могут выбирать между прозрачными и защищёнными транзакциями, что обеспечивает гибкость, но ограничивает массовое принятие из-за масштабируемости.

Monero обеспечивает неотслеживаемость отправителя и высокую устойчивость к анализу за счёт простоты, но жертвует эффективностью. Zcash предлагает полную анонимность с минимальным раскрытием, но сталкивается с вычислительными и инфраструктурными барьерами. Обе системы иллюстрируют эволюцию от поверхностной защиты к глубокой криптографической анонимности.

### 4.3. Будущее приватности в блокчейне и возможные направления развития

Эволюция технологий обеспечения приватности в блокчейне направлена на преодоление дилеммы между прозрачностью, необходимой для верификации, и конфиденциальностью, критической для защиты данных. Современные исследования фокусируются на разработке сложных архитектурных решений, сочетающих существующие методы с новыми криптографическими и вычислительными подходами.

#### 4.3.1. Гибридные решения и интеграция с Tor

Одним из перспективных направлений является создание гибридных протоколов, объединяющих микширование (например, CoinJoin) с продвинуты-

ми криптографическими примитивами (zk-SNARKs, кольцевые подписи). Такие системы могут поддерживать выборочное раскрытие данных ( $D_{\text{reveal}} \subset D_{\text{total}}$ ) для соответствия регуляторным требованиям, минимизируя компрометацию анонимности ( $H_{\text{residual}} = H_{\text{total}} - H_{\text{revealed}}$ ) [8, С. 839]. Интеграция Тор-ориентированных технологий в блокчейн-протоколы (например, маршрутизация транзакций через скрытые сервисы) позволяет снизить зависимость от сетевого уровня, увеличивая энтропию маскировки как  $H_{\text{net}} = \log_2(N_{\text{nodes}})$ . Развитие микроплатежей через Lightning Network, второго уровня для Bitcoin, с использованием Тор минимизирует запись данных в основной реестр, перенося операции в оффчайн с вероятностью трассировки  $P_{\text{trace}} \approx \frac{1}{N_{\text{hubs}}}$  [4].

#### 4.3.2. Доверенные вычислительные среды и адаптивные протоколы

Концепция доверенных вычислительных сред (Trusted Execution Environments, TEE), таких как Intel SGX, предлагает выполнение приватных вычислений внутри изолированных анклавов [7, С. 5], где алгоритмы анонимности (например, микширование или генерация доказательств) реализуются без внешней передачи данных. Это снижает вычислительную нагрузку ( $O(n) \rightarrow O(1)$  для некоторых операций) и повышает скорость транзакций. Параллельно разрабатываются адаптивные протоколы, позволяющие динамически регулировать уровень приватности через параметры  $\alpha \in [0,1]$ , где  $\alpha = 0$  – полная прозрачность,  $\alpha = 1$  – максимальная анонимность. Например, пользователи могут выбирать между RingCT с переменным  $n$  или zk-SNARKs в зависимости от контекста, оптимизируя баланс между затратами и защитой.

Будущее приватности в блокчейне связано с интеграцией постквантовых криптографических методов (решётки, хэш-функции), устойчивых к квантовым атакам, и развитием масштабируемых решений (zk-STARKs, sharding). Эти инновации обещают расширить применение блокчейна в финансах, IoT и управлении данными, сохраняя гибкость и устойчивость к регуляторному давлению.

### Заключение

Проведённый системный обзор продемонстрировал, что вопросы конфиденциальности в блокчейн-системах являются многоаспектной проблемой, охватывающей как фундаментальные особенности архитектуры распределённых реестров, так и современные методы анализа и деанонимизации. В главе 1 были проанализированы принципы работы блокчейна, его прозрачность и современные технологии, направленные на повышение анонимности, что позволяет оценить базовые возможности и ограничения существующих систем. Глава 2 выявила ключевые угрозы приватности, связанные с анализом транзакций, повторным использованием адресов и взаимодействием с традиционными финансовыми структурами, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к защите данных. Глава 3 показала, что методы деанонимизации, начиная от сетевого анализа и заканчивая forensic-методами, способны существенно снизить уровень анонимности, особенно при использовании регуляторных процедур KYC/AML. Наконец, глава 4 представила современные способы обеспечения конфиденциальности, включая применение микшеров, CoinJoin и протоколов приватных

криптовалют, а также наметила перспективные направления развития гибридных решений и доверенных вычислительных сред.

Таким образом, баланс между прозрачностью и приватностью остаётся актуальной задачей в развитии блокчейн-технологий. Для её решения необходимо сочетание гибридных технологий анонимности, адаптивных протоколов и строгого соблюдения принципов минимального раскрытия данных.

#### *Литература*

1. Безопасность блокчейна: уязвимости, атаки и будущее защиты [Электронный ресурс]. SecurityMedia. Режим доступа: <https://securitymedia.org/info/bezopasnost-blokcheyna-uyazvimosti-ataki-i-budushchee-zashchity.html> (дата обращения: 20.02.2025).
2. Бириков А., Ховратович Д., Пустогаров И. Deanonymisation of client sin Bitcoin P2P network // Proceeding so fthe 2014 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. 2014. С. 15-29.
3. Блокчейн и даркнет подружились? Как технологии-антиподы... [Электронный ресурс]. SecurityLab. Режим доступа: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/Technolady/355130.php> (дата обращения: 20.02.2025).
4. Бен-Сассон Э., Чьеза А., Грин М., Тромер Э., Вирза М. Zerocash: Decentralized Anonymous Payments from Bitcoin // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2014. С. 459-474.
5. Гудман Л. Tezos – A Self-Amending Crypto-Ledger [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tezos.com/whitepaper.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
6. Данэзис Г., Кольвайс М., Риал А. Private and Anonymous Data Analytics with Secure Hardware // ACM Transactions on Privacy and Security. 2020. Т. 23. № 4. С. 1-25.
7. Косба А., Миллер А., Ши Э., Вен И., Папаманту К. Hawk: The Blockchain Model of Cryptography and Privacy-Preserving Smart Contracts // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2016. С. 839-858.
8. Мейклджон С., Помароле М., Джордан Г., Левченко К., Маккой Д., Фоелкер Г.М., Сэвидж С. A Fistful of Bitcoins: Characterizing Payments Among Men with No Names // Proceedings of the 2013 Internet Measurement Conference (IMC). 2013. С. 127-140.
9. Накомото С. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
10. Пельстра А. Mimblewimble [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://scalingbitcoin.org/papers/mimblewimble.txt> (дата обращения: 20.02.2025).
11. Рон Д., Шамир А. Quantitative Analysis of the Full Bitcoin Transaction Graph // Financial Cryptography and Data Security. 2013. С. 6-24.
12. Сабери С., Ванде Сомпель Д., Вандер Хам М. Privacy in Blockchain Networks: A Survey of Techniques and Challenges // IEEE Access. 2022. Т. 10. С. 34567-34589.

13. Фунг Б. Monero's Ring Signatures: A Technical Overview [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://monero.stackexchange.com> (дата обращения: 20.02.2025).
14. Херлихи М., Малли Р. Efficient Anonymous Payments with zk-SNARKs and Beyond // Proceedings of the 2021 ACM Conference on Advances in Financial Technologies (AFT). 2021. С. 112-128.
15. FATF. Updated Guidance for a Risk-Based Approach to Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers / Financial Action Task Force. Paris: FATF, 2021. 116 с.

УДК 004.42

## Математическая модель управления протезом манипулятором с использованием алгоритма минимакс

Андрей Дмитриевич Орлов, инженер Дата-центра

отдела технической поддержки,

Общество с открытым ответственностью

«Центр обработки данных Магистральный», г. Москва,

Елена Николаевна Дмитренко, кандидат технических наук,

доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
пилота-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Автоматизированные протезы манипуляторы, оснащенные собственным программным обеспечением, требуют от пользователя корректного выполнения необходимых функций и действий, которые могут быть недоступны пользователю по тем или иным причинам. Также с увеличением степеней свободы протезов манипуляторов растет и общая матрица возможных действий, выполнение которых влечет за собой увеличение количества возможных ошибок. В статье рассматривается математическая модель протеза манипулятора с пятью степенями свободы с применением алгоритма минимакс, направленного на минимизацию максимальных ошибок при выполнении заданных действий.*

Автоматизированный протез, манипулятор, алгоритм минимакс, минимизация ошибок, математическая модель.

## Mathematical model of prosthetic manipulator control using the minimax algorithm

Andrey Dmitrievich Orlov, Data Center Engineer, Technical Support Department,  
Open Liability Company «Magistralny Data Processing Center», Moscow,

Elena Nikolaevna Dmitrenko, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Information Technologies  
and Control Systems,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

*Automated prosthetic manipulators, equipped with their own software, require the user to correctly perform necessary functions and actions that may not be available to the user for one reason or another. Also, with an increase in the degrees of freedom of prosthetic manipulators, the overall matrix of possible actions, the implementation of which entails an increase in the number of possible errors, also grows. The article discusses a mathematical model of a manipulator prosthesis with five degrees of freedom using the minimax algorithm,*

*aimed at minimizing maximum errors when performing given actions.*

Automated prosthesis, manipulator, minimax algorithm, error minimization, mathematical model.

Несмотря на многообразие достижений современных технологий протезирования, задача полного восстановления всех утраченных функций верхней конечности по-прежнему является актуальной, в том числе, остается большое количество нерешенных задач в области разработки систем управления протезами верхних конечностей: организация расширенной обратной связи «пользователь-протез», управление большим количеством степеней подвижности протеза и одновременно обработка данных от сигналов различной природы. Обеспечение стабильных и точных движений искусственных конечностей является важнейшей задачей. Это особенно важно при использовании протезов, построенных на микроэлектронике и электромоторах, поскольку эти компоненты требуют точного управления для имитации естественных движений человека [11,12].

Для эффективного решения этой проблемы было найдено необходимое решение, основанное на алгоритмах машинного обучения, которые используют показания положения потенциометров и сервоприводов [6,7,8].

Интеграция алгоритмов машинного обучения в протезные устройства открывает возможности для значительного улучшения их функциональности и пользовательского опыта. Используя показания положения как потенциометра, так и сервопривода, эти алгоритмы могут обучаться и адаптироваться к конкретным движениям пользователя, обеспечивая более точное управление и стабильность. Такой подход не только позволяет протезу конечности точно имитировать естественные движения человека, но и предоставляет возможность персонализированной настройки, основанной на предпочтениях и требованиях индивидуального пользователя [10].

Внедрение алгоритмов машинного обучения для стабилизации движений протезов имеет ряд преимуществ.

Во-первых, это позволяет осуществлять мониторинг и настройку в режиме реального времени, гарантируя оперативность обнаружения и исправления любых отклонений или нестабильности, что способствует более плавному взаимодействию между пользователем и протезом, снижая риск несчастных случаев или дискомфорта, вызванных непредсказуемыми движениями. Более того, адаптивный характер алгоритмов машинного обучения позволяет протезу постоянно улучшать свои характеристики с течением времени, поскольку он собирает больше данных и уточняет свои прогнозы. Используя возможности машинного обучения, мы можем раскрыть потенциал более совершенных механизмов управления в протезировании. Вместо того, чтобы полагаться исключительно на ручную настройку или предопределенные шаблоны, эти алгоритмы могут анализировать накопленные данные с показаний потенциометра и сервопривода для выявления шаблонов, корреляций и оптимальных стратегий управления. Такой подход, основанный на данных, повышает способность протеза адаптироваться к различным видам деятельности и намерениям пользователя, делая его более интуитивным и отзывчивым на команды пользователя [5].

Одним из ключевых аспектов функционирования таких устройств является надежное и точное управление, минимизирующее ошибки при выполнении поставленной задачи. Усложнение и использование современных технологий и решений направлено на упрощение связи между протезом и человеком, которое, в свою очередь, ускоряет время адаптации к устройству.

Наиболее часто встречающейся ошибкой при выполнении поставленной задачи является ложный или неправильный результат, полученный контроллером управления протезом, что замедляет и без того сложный период адаптации.

Автоматизированные протезы манипуляторы, снабженные собственным программным обеспечением для выполнения определенного ряда функций, требуют от пользователя выполнение конкретно прописанных манипуляций. Вне зависимости от разновидности способа получения входной информации, контроллер должен преобразовать полученную информацию и привести в действие необходимый алгоритм. На рисунке 1 представлена блок-схема работы стандартного алгоритма, построенного на заранее заготовленных действиях. Данный алгоритм выполняет определенное действие при выполнении определенного паттерна (повторяющегося шаблонадействий) пользователем.

Сначала пользователь выполняет действие, которому присвоен определенный номер или имя, далее алгоритм сверяет имя команды с именем действия. В случае расхождения, переходит к следующему именованному действию. Данный алгоритм является классическим решением, применяемым в работе большинства манипуляторов в различных сферах [9]. В протезировании данный алгоритм используется повсеместно в модифицированном виде.

С увеличением степеней свободы протеза манипулятора растет как количество данных, получаемых на вход, так и диапазон значений, из которых формируется выход. В случае, когда протез манипулятор работает по заранее заложенным паттернам действий, значения, получаемые на вход, должны калиброваться, так как любое расхождение значений от тех, что заложены в исходниках базы данных, приведет к сбою в системе.

Таким образом, необходимо подключать математический аппарат для обработки данных и выявления закономерности с решением оптимизационной задачи на основе интервальных данных.

Рассмотрим упрощенную модель кистевого протеза манипулятора, построенного на изменении положения потенциометра с изменяемым сопротивлением. Построим математическую модель получения значений для матрицы положений кистевого протеза манипулятора, рассматривая пять степеней свободы.

Общий вид формулы:

$$D_n = \begin{bmatrix} P_n \\ \vdots \\ P_n \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} \quad (1),$$

где  $n$  – номер степени свободы (от 1 до 5);

$P_n$  – значение, полученное на входе в диапазоне  $a_d \leq P_n \leq b_d$ .

$a_d$  – нижняя граница диапазона приема;

$b_d$  – верхняя граница диапазона;

$D_n$  – значение, необходимое для выполнения определенного паттерна действия. Тогда формула (1) для нахождения значения  $D_n$  примет вид:

$$D_n = \left[ \frac{P_n}{X} \right] \quad (2)$$

с округлением вниз, где X – это коэффициент пропорциональности  $\frac{P_n}{D_n}$ .

Для удобства, обозначим диапазон  $a_d \leq P_n \leq b_d$  от 0 до 1000, а коэффициент пропорциональности X = 10. Тогда возможный диапазон значений  $D_n$  будет определен от 0 до 100.

Составим систему определения значений для пяти пальцев:

$$\begin{cases} D_1 = \left[ \frac{P_1}{X} \right] \text{ от 0 до 100} \\ D_2 = \left[ \frac{P_2}{X} \right] \text{ от 0 до 100} \\ D_3 = \left[ \frac{P_3}{X} \right] \text{ от 0 до 100,} \\ D_4 = \left[ \frac{P_4}{X} \right] \text{ от 0 до 100} \\ D_5 = \left[ \frac{P_5}{X} \right] \text{ от 0 до 100} \end{cases} \quad (3)$$

где в интервале от  $D_1$  до  $D_5$  определено положение каждого элемента.  
Значения  $D_n$  сведены в таблицу 1.

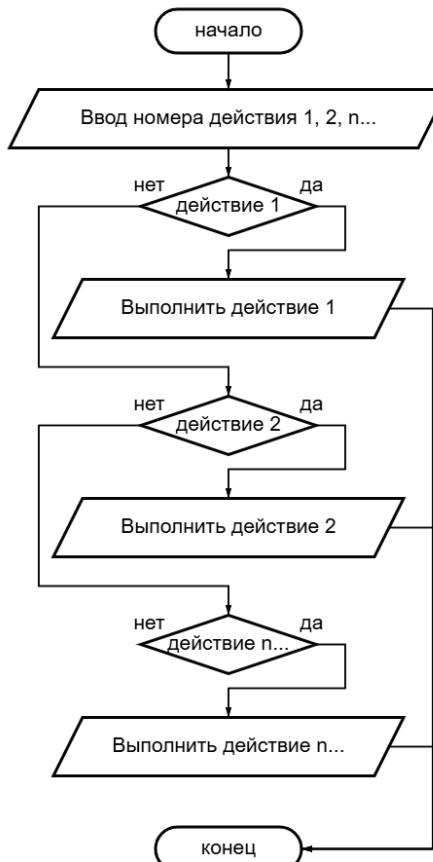


Рисунок 1 – Пример алгоритма

**Таблица 1 – Матрица значений положения элементов**

$D_1(0)$	$D_2(0)$	$D_3(0)$	$D_4(0)$	$D_5(0)$
$D_1(1)$	$D_2(1)$	$D_3(1)$	$D_4(1)$	$D_5(1)$
...	...	...	...	...
$D_1(100)$	$D_2(100)$	$D_3(100)$	$D_4(100)$	$D_5(100)$

Таким образом, будет получена матрица возможных значений  $D_n$ , заранее записанных внутри базы данных протеза. В зависимости от изменения значений  $P_n$  и коэффициента пропорциональности X, будет меняться значение  $D_n$ , а, в дальнейшем, выполняться заранее прописанное действие.

Основным недостатком данного метода является высокое количество ошибок, которые будут получены в рамках выполнения поставленной задачи.

Для решения данной проблемы был выбран алгоритм минимакс, использование которого позволит сократить количество получаемых ошибок [1,2,3,10]. При добавлении в исходный алгоритм алгоритма минимакс в качестве фильтра переходных значений с архивированием полученных результатов во внутреннюю базу данных устройства, ускорится процесс адаптации устройства к пользователю, что, в свою очередь, ускорит процесс его привыкания к протезу.

**Принцип действия алгоритма минимакс в алгоритме работы протезов манипуляторов**

**1. Формулирование задачи** – методы и рекомендации теории игр разрабатываются применительно к таким специфическим ситуациям, которые обладают свойством многократной повторяемости.

Играй называется упрощенная модель ситуации, отличающаяся от реальной тем, что ведется по определенным правилам. Исход игры – это значение некоторой функции, называемой функцией выигрыша, которая может задаваться аналитически, либо таблично (матрицей). Игра, в которой выигрыши и проигрыши игроков задаются матрицей, называется матричной [4].

Согласно теории игр, необходимо присудить значение выигрыша и потери тем значениям, которые алгоритм может минимизировать и максимизировать. В случае протезов – это значения, полученные на вход и на выход устройства. В случае использования значений, на входе устройства будет синусоидальный аналоговый сигнал, для которого вводятся значения в рамках минимума и максимума разметки сетки значений. Присвоение значения «выигрыш» происходит при правильном получении сигнала и присвоения ему значения сетки. Функция потери – это обратное значение выигрышу, то есть то значение, которое не подходит для выполнения задачи.

**2. Построение дерева решений** – это сбор всех возможных комбинаций выполнения поставленной задачи, на которую будет ориентироваться алгоритм минимакс при анализе данных, для получения наилучшего результата.

**3. Оптимизация решений** – на основе построенного дерева алгоритм минимакс выявляет значения, которые позволяют минимизировать максимальные потери. Этот этап снижает количество возможных потерь и позволяет подобрать именно тот сценарий действий, который хочет выполнить пользователь. В последствии, происходит повторная запись данных в дерево решений для дальнейшего упрощения нахождения выигрышного варианта действий.

**4. Применение** – полученные результаты записываются в базу данных для дальнейшего применения и ускорения процесса поиска правильного решения. Из полученных выигрышных комбинаций формируется паттерн действий пользователя. В дальнейшем, это упрощает адаптацию пользователя к устройству и обеспечивает точную работу протеза.

На рисунке 2 представлена диаграмма последовательности Unified Modeling Language (UML) алгоритма работы протеза манипулятора с включенным в нее алгоритмом минимакс и базой данных для записи значений.

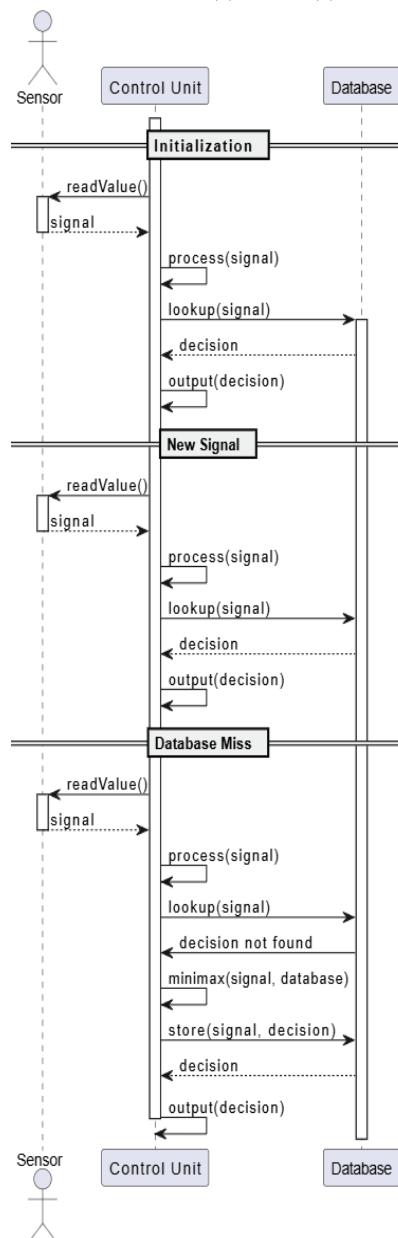


Рисунок 2 – Диаграмма последовательности

Описание обозначений диаграммы:

**SensorInput** – входной сигнал с датчика (ввод сигнала).

**ControlUnit** – контроллер обрабатывает сигнал и передает его дальше.

**MinimaxAlgorithm** – алгоритм Минимакс. Анализирует полученный сигнал от контроллера. В зависимости от того, какой сигнал получен, применяется один из паттернов действий. Первый паттерн заключается в проверке базы данных на наличие схожих показаний на вводе в микроконтроллер, в случае нахождения решения в базе данных, применяется решение из базы данных. Второй паттерн, в случае отсутствия результата в базе данных, алгоритм применяет максимальные похожие параметры и переходит к следующему шагу.

**Database** – база данных. Хранит в себе комбинации значений для ранее проведенных или базовых действий.

**Output** – вывод данных. Выводит данные в моторы и прочие элементы протеза.

Пример работы: функция сжатия кисти для подъёма предмета. Для его выполнения алгоритм работы протеза выполнит ряд действий:

- ✓ *Начало;*
- ✓ *Обработка сигнала;*
- ✓ *Принятие решения;*
- ✓ *Исполнение решения;*
- ✓ *Обновление базы данных;*
- ✓ *Конец.*

Разберем подробнее исполнение алгоритма:

1. **Начало** – вводные данные. Пользователь собирается поднять предмет произвольной формы. Определяется исходное положение кисти протеза.

2. **Обработка сигнала** – сигнал поступает на вход микроконтроллера. Определяется характер движения кисти протеза.

3. **Принятие решения** – анализ полученных данных. Обращение к базе данных. Выполняется алгоритм минимакс. В ходе выполнения алгоритма анализируются данные на входе, они сравниваются с данными ранее использованных действий и, исходя из полученного результата, выполняется один из паттернов, используется заранее подготовленное действие или рассчитывается действие с наилучшим методом захвата объекта.

4. **Исполнение решения** – выполнение решения, выбранного в предыдущем действии. Алгоритм запускает моторы или иные способы приведения протеза в действие для успешной реализации действия.

5. **Обновление базы данных** – в случае получения значений, не записанных ранее в базе данных или получении уникального действия, которое выполнил пользователь, выполняется запись значений в базу данных с возможностью дальнейшей автоматизированной корректировки. Данная функция позволяет адаптировать алгоритмы протеза под конкретного пользователя.

6. **Конец** – завершение выполнения алгоритма.

Для представления данного алгоритма в виде кода, понятного микроконтроллерам, был выбран язык C++ (с базой данных для Arduino), а в качестве контроллера – недорогой энергоэффективный микроконтроллер ESP32. Пример кода представлен на рисунке 3.

Для работы алгоритма стоит учитывать ограничения, связанные с использованием микроконтроллера ESP32.

Основным ограничением микроконтроллера является количество памяти и вычислительная мощность, они не подходят для полноценного использования, но подходят для отработки прототипа алгоритма.

Встроенная модель машинного обучения будет обучаться на реальных данных, полученных от пользователя в ходе испытаний.

В основе работы алгоритма используется Q-таблица, это таблица, которая хранит в себе основные значения возможных действий. С исходными данными таблицы работает алгоритм минимакс, который выбирает определенное значение при расчете сигнала, полученного от сервоприводов (или иных датчиков).

Для получения вводных данных используются potPin и servoPin, соответственно. Раздел q\_table содержит двумерную таблицу  $10 \times 10$ , это массив значений, используемый для хранения значений модели обучения. Далее, в разделе setup() запускается серийный порт для вывода данных, на основе значений которого настраивается потенциометр как входной сигнал. Затем подключается сервопривод (или иное устройство движения протеза) и инициализируется таблица Q-значений.

В главном цикле loop() происходит сбор данных, адаптация значений. Сначала считывается сигнал с потенциометра, для этого необходимо, чтобы микроконтроллер считал аналоговый сигнал в диапазоне от 0 до 4095 (значения выбраны для потенциометра с номиналом в 10 Ом), далее микроконтроллер преобразует сигнал в значение состояния в диапазоне от 0 до 9 с помощью команды map().

Далее следует принятие решения, для этого алгоритм минимакс выбирает наиболее подходящее действие в зависимости от состояния для минимизации ошибок.

Затем, основываясь на действии, полученном в ходе выполнения алгоритма минимакс, формируется сигнал, отправляемый сервоприводу для изменения его положения в рамках заданного диапазона (пример: от 0 до 180 градусов).

```
#include <ESP32Servo.h>
// Параметры системы
const int potPin = 34; // Пин потенциометра
const int servoPin = 13; // Пинсервопривода
Servo myServo;
int q_table[10][10]; // Таблица Q-обучения
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(potPin, INPUT);
    myServo.attach(servoPin);
    initQTable();
}
void loop() {
    int potValue = analogRead(potPin);
    int state = map(potValue, 0, 4095, 0, 9);
```

```
int action = minimaxDecision(state);
int servoAngle = map(action, 0, 9, 0, 180);
myServo.write(servoAngle);
Serial.print("State: "); Serial.print(state);
Serial.print(" | Action: "); Serial.println(action);

delay(500);
}
// Инициализация Q-таблицы
void initQTable() {
    for (int i = 0; i < 10; i++) {
        for (int j = 0; j < 10; j++) {
            q_table[i][j] = 0;
        }
    }
}
// Алгоритм минимакс для выбора оптимального действия
int minimaxDecision(int state) {
    int bestAction = 0;
    int minLoss = 1000;
    for (int action = 0; action < 10; action++) {
        int maxLoss = 0;
        for (int nextAction = 0; nextAction < 10; nextAction++) {
            int loss = abs(state - nextAction);
            maxLoss = max(maxLoss, loss);
        }
        if (maxLoss < minLoss) {
            minLoss = maxLoss;
            bestAction = action;
        }
    }
    return bestAction;
}
```

Рисунок 3 – Часть кода программы

Поскольку данный алгоритм является циклом (loop), алгоритм продолжает свою работу даже после получения результата.

Если действие, выполненное в ходе обучения, является верным, пользователь сообщает системе о правильности выбора. Основываясь на результатах обучения, формируется таблица Q-обучения, на основе которой алгоритм минимакс выбирает значения. До начала обучения, таблица Q-обучения, являющаяся двумерным массивом  $10 \times 10$ , заполнен нулями (все значения ложны).

В ходе работы и обучения алгоритма пользователем, в зависимости от значений, полученных от потенциометра, выполняется определенный алгоритм действий и формируются сигналы, отправляемые на сервоприводы. Далее, если пользователь подтверждает правильность выбранных действий, полученные зна-

чения записываются в таблицу Q-обучения и, в дальнейшем, используются в рамках сравнения значений при дальнейшем использовании.

### **Математическая модель протеза манипулятора с использованием алгоритма минимакс**

Рассмотрим пример использования алгоритма минимакс для построения модели. В качестве примера будет рассматриваться одна фаланга с пятью степенями свободы. Микроконтроллер получает входные сигналы  $P_n$  от датчиков, и преобразует входные сигналы в значения  $D_n$  для управления протезом. Необходимо минимизировать максимальные ошибки при выполнении действий протезом. То есть, алгоритм минимакс будет выбирать такие значения  $D_n$ , которые минимизируют максимальную ошибку при управлении всеми степенями свободы.

*Постановка задачи:*

$n$  – номер степени свободы (от 1 до 5);

$a_d = 0$  (нижняя граница диапазона приема);

$b_d = 1023$  (верхняя граница диапазона приема);

$X = 10$  (коэффициент пропорциональности);

$P_n$  – значение, полученное на аналоговом входе в диапазоне;

$a_d \leq P_n \leq b_d: 500, 600, 700, 800, 900$ ;

$D_n^u$  – целевое значение для выполнения действия: 52, 62, 72, 82, 92;

$D_n$  – цифровое значение  $P_n$  с округлением вниз.

*Цель* – преобразовать входное значение  $P_n$ , полученное с аналогового датчика, в значение  $D_n$  и минимизировать ошибку между  $D_n$  и  $D_n^u$ .

Составим уравнение:

$$\text{MinMax}(|\left[\frac{P_1}{X}\right] - D_1^u|, |\left[\frac{P_2}{X}\right] - D_2^u|, |\left[\frac{P_3}{X}\right] - D_3^u|, |\left[\frac{P_4}{X}\right] - D_4^u|, |\left[\frac{P_5}{X}\right] - D_5^u|) \quad (4)$$

*Ход решения* и результаты представлены в таблицах 2,3:

1. Преобразование входного сигнала  $P_n$  в  $D_n$ :

**Таблица 2 – Результаты испытаний**

$n$	$P_n$	$X$	$D_n = \left[\frac{P_n}{X}\right]$
1	500	10	50
2	600	10	60
3	700	10	70
4	800	10	80
5	900	10	90

2. Вычисление ошибок для каждого  $n$ :

**Таблица 3 – Расчет ошибок**

$n$	$P_n$	$X$	$D_n = \left[\frac{P_n}{X}\right]$	$D_n^u$	Ошибка $n =  D_n - D_n^u $
1	500	10	50	52	2
2	600	10	60	62	2
3	700	10	70	72	2
4	800	10	80	82	2
5	900	10	90	92	2

На основе анализа ошибок, алгоритм минимакс выбирает такие значения  $D_n$ , которые минимизируют максимальную ошибку, что, в свою очередь, позволяет скорректировать сигналы, выходящие из микроконтроллера в протез и уменьшить количество ошибок, в результате упрощается адаптация пользователя к протезу.

Для улучшения качества корректировки ошибок можно изменить коэффициент пропорциональности X, используемый в формуле. Уменьшение значения коэффициента пропорциональности с 10 до 9.8 может дать более точные значения  $D_n$ .

После каждой последующей корректировки управляющих сигналов и выбора оптимальных значений  $D_n$ , система повторно анализирует результаты.

Этот итерационный процесс повторяется до тех пор, пока максимальная ошибка не будет минимизирована до удовлетворяющего результата.

Использование и внедрение метода минимакс в алгоритме работы протеза манипулятора благотворно сказывается на функциональности и адаптации системы «пользователь – устройство», а также позволяет скорректировать сигналы, выходящие из микроконтроллера в протез манипулятора, что приводит к общему уменьшению количества ошибок.

Пример применения алгоритма минимакс демонстрирует его эффективность в оптимизации работы протеза манипулятора, а итерационный процесс корректировки и анализа ошибок, включающий изменение параметра коэффициента пропорциональности, обеспечивает достижение минимизации максимальной ошибки, что упрощает работу с протезом манипулятором в целом.

### Литература

1. Баландин Д.В., Бирюков Р.С., Коган М.М. Минимаксное управление уклонениями выходов линейной дискретной нестационарной системы// Автоматика и телемеханика. № 12. 2019. С. 3-15.
2. Баландин Д.В., Бирюков Р.С., Коган М.М. Оптимальное управление максимальными уклонениями выходов линейной нестационарной системы на конечном интервале времени // Автоматика и телемеханика. № 10. 2019. С. 37-61.
3. Выгодчикова И.Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию // Прикладная информатика. 2015. № 4 (58) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-otsenki-parametrov-lineynoy-mnozhestvennoy-modeli-regressii-po-minimaksnomu-kriteriyu> (дата обращения: 05.08.2024).
4. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. М.: Наука, 1971.
5. Коротчиков Б.О., Орлов А.Д. Обзор работы и реализации существующих систем программируемых логических контроллеров // Двойные технологии. 2024. № 2(107). С. 66-70.
6. Орлов А.Д., Дмитренко Е.Н. Концепция создания автоматизированного протеза манипулятора на основе использования аналоговой системы связи и машинного обучения // Информационно-технологический вестник. №3(37). 2023. С. 25-35.

7. Орлов А.Д., Дмитренко Е.Н. Усовершенствование конструкции автоматизированного экзопротеза манипулятора на основе аналоговой системы связи и машинного обучения // Славянский форум. 2023. № 2(40). С. 434-445.
8. Орлов А.Д., Дмитренко Е.Н. Устройство и конструкция кистевого автоматизированного протеза манипулятора // Славянский форум. 2023. № 4 (42). С. 293-303.
9. Петренко В.И., Тебуева Ф.Б., Гурчинский М.М., Свистунов Н.Ю., Павлов А.С. Алгоритм машинного обучения системы управления антропоморфными манипуляторами // Системная инженерия и информационные технологии. Том 3. № 2. С. 35-43.
10. Платунова А.В. Применение метода минимакс в задаче минимизации навигационных ошибок БИНС// Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 1. С. 11-16.
11. Iqbal, Jamshed, R. Ul Islam, and Hamza Khan. Modeling and analysis of a 6 DOF robotic arm manipulator / Iqbal, Jamshed, R. Ul Islam, Hamza Khan // Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering 3. № 6. 2012.
12. Wang Yongjie. Optimisation of structural parameters for multi-degree-of-freedom robotic arms / Wang Yongjie // Beijing Institute of Technology. 2016.

УДК 519.1, 004.3

## Упрощённая структура графа выполнения программы для поиска вложенных циклов по её исполнимому коду

Сергей Игоревич Плаксин, ассистент кафедры «Вычислительная техника»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ), г. Тула

*В статье предлагается упрощённая структура графа выполнения программы для поиска вложенных циклов по её исполнимому коду. Граф представлен в виде подграфов процедур, связанных между собой ссылками. Такой подход позволяет снизить количество обрабатываемых данных в графе и требования к памяти при обработке. Предложенная структура будет использована в дальнейшем для поиска, определения степени вложенности и классификации циклов в исполнимом коде программы без доступа к исходному коду.*

Граф выполнения программы, статический анализ кода, вложенные циклы, исполнимый код.

## A simplified program execution graph structure for identifying nested loops in executable code

Sergei Igorevich Plaksin, postgraduate of the Department of Computer engineering,  
Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education  
«TULA STATE UNIVERSITY» (TulSU), Tula

*The paper proposes a simplified program execution graph structure for identifying nested loops in executable code. Graph is represented as a collection of procedure subgraphs connected by links. This approach reduces amount of data to be processed in graph and memory requirements. The proposed structure will be used to find, determine the nesting depth and classify loops in executable code without access to the source code.*

Program execution graph, static code analysis, nested loops, executable code.

### Введение

Современные программы становятся все сложнее и объемнее, что приводит к увеличению времени их выполнения. Циклы, как основная составляющая практически всех программ, при глубокой вложенности сильно замедляют работу, особенно при высокой нагрузке. Чтобы ускорить выполнение программ на современных многоядерных процессорах, необходимо распараллеливать циклы. Обычно это делается программистом вручную или автоматически компилятором, но для этого требуется доступ к исходному коду.

Для повышения производительность программ на современных многоядерных процессорах через автоматическое распараллеливание циклов по исполнимому коду потребуется получать информацию о структуре кода програм-

мы и располагаемых в ней циклах. Поэтому предлагается разработать метод, который, анализируя дизассемблированный исполняемый код программы, будет строить граф выполнения программы, выделять и анализировать в нем циклы [1]. Это позволит оптимизировать работу программ на многоядерных системах без доступа к исходному коду. После чего полученная информация уже может быть применена для автоматического распараллеливания циклов [2] с учётом особенностей конфигурации системы потребителя, не требуя доступа к исходному коду.

### Структура графа выполнения программы

Если рассматривать такие графы выполнения программы, которые подробно описываются в книге о компиляторах [3] и обычно применяются для описание структуры кода программы, то они будут представлены в виде графов  $G = (V, E)$ , который состоит из набора вершин  $V = \{v_0, v_1 \dots v_n\}$  и рёбер  $E = \{e_0, e_1 \dots e_m\}$ . Каждая вершина  $v \in V(G)$  содержит инструкцию кода выполняемую программой при прохождении такой вершины. В свою очередь каждое ребро  $e_{ij} = (v_i, v_j), e_{ij} \in E(G)$  ведущее из вершины с индексом  $i$  в вершину с индексом  $j$  обозначает что из инструкции в  $v_i$  программа переходит к инструкции в  $v_j$ . Благодаря этому такому графу можно использовать как для визуализации, так и последующего анализа порядка выполнения каждой инструкции в программе. Демонстрацию шаблонов циклов в таких графах можно увидеть в статье Михайлова [4].

Однако по мере увеличения размера программ и количества используемых процедур, также увеличивался и объём получаемого графа выполнения программы. Количество инструкций затрудняло анализ такого графа и повышало требование к объёму памяти для хранения всех вершин при обработке. В связи с чем код стал разделяться не на отдельные инструкции, а на укрупнённые блоки кода, в которых могло насчитываться больше одной инструкции, в зависимости от ставящейся задачи при обработке такого графа.

### Упрощённая структура графа выполнения программы

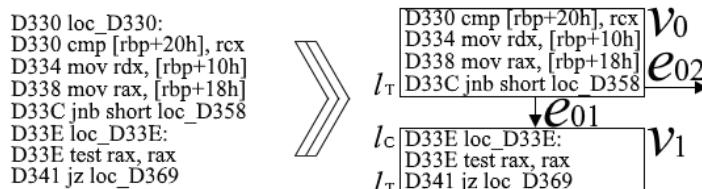


Рисунок 1 – Пример разделения на укрупнённые блоки инструкций и построения ребра между вершинами

Для задачи поиска вложенных циклов большую роль играют инструкции условного/безусловного перехода, а также инструкции с меткой *Label*. Другие инструкции не влияют на структуру цикла в графике выполнения программы. В связи с этим в рамках данной работы для упрощения графа используются разбиение всей последовательности инструкций по таким переходам в укрупнённые блоки инструкций (рис. 1). Что позволяет значительно снизить количество вершин в графике выполнения программы для последующего поиска и обработки цик-

лов в нём.

Несмотря на это графы больших программы всё равно могут достигать огромного количества таких укрупнённых блоков, требуя выделения большого объёма памяти на обработку. Поэтому в данной работе предлагается рассматривать граф выполнения программы не в целом виде, а в распределённом на подграфы каждой из процедур. Такой подход позволяет обрабатывать отдельные подграфы как независимо от друг друга, так и требует значительно меньше памяти при обработке из-за наличия пропорционально меньшего количества вершин в любом таком подграфе, чем в целом графике всей программы.

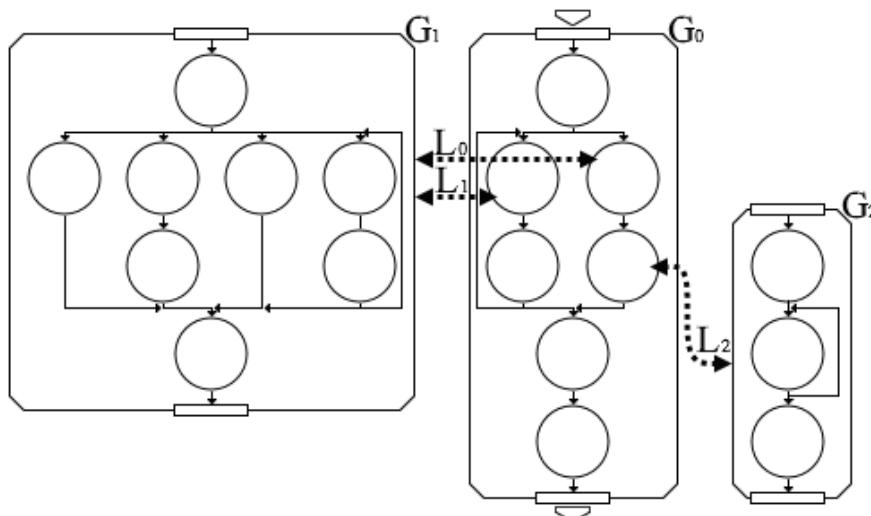


Рисунок 2 – Пример структуры упрощённого графа выполнения программы, распределённой на подграфы процедур

В результате такой упрощённый график выполнения программы  $MG = (G, L)$  состоит из наборов подграфов процедур  $G = \{G_0, G_1 \dots G_n\}$  и ссылок  $L = \{L_0, L_1 \dots L_m\}$  (рис. 2). Подграфы процедур  $G_i$  выступают в роли вершин такого графа  $MG$ , а условными рёбрами соединяющими между собой вершины являются ссылки  $L_j$ . Тем самым ссылки позволяют сохранять связанность между инструкциями процедур. Каждая ссылка  $L_i = (v_l, G_j, G_k, IN)$  будет определять укрупнённый блок инструкций вершине  $v_l$  в подграфе процедуры  $G_j$  из которого был произведён вызов процедуры  $G_k$ , что также позволяет определять место возврата после завершения выполнения процедуры  $G_k$ .  $IN$  отвечает за внутрипроцедурную степень вложенности вершины  $v_l$  в процедуре  $G_j$ .

Такой подход к декомпозиции графа выполнения программы позволяет работать как с отдельными подграфами процедур, так и с графиком в целом снижая необходимость в хранении его целиком в памяти при обработке. Что, в свою очередь, улучшает масштабируемость такого упрощённого графа при увеличении объёма анализируемой программы.

Подграф процедуры  $G_i = (V, E, Loops, ON)$  соответствует графу выполнения отдельной процедуры программы и состоит из вершин  $V$  и рёбер  $E$ . Все

обнаруженные циклы помещаются в набор циклов  $Loops = \{loop_0, loop_1 \dots loop_n\}$ .  $ON$  отвечает за межпроцедурную степень вложенности этой процедуры в программе. Каждая вершина  $v_i = (B, l_C, l_T, link, sloop)$  содержит укрупнённый блок инструкций  $B$ , который может начинаться с инструкции с меткой  $l_C$  и/или оканчиваться инструкцией перехода к метке  $l_T$ , что можно было видеть на рисунке 1. При этом некоторые укрупнённые блоки могут иметь инструкции вызова других процедур, что отмечается ссылкой  $L_i$  (рис. 3), которая также помещается в набор всех ссылок упрощённого графа выполнения программы. Параметр  $sloop$  обозначает какой цикл начинается в данной вершине при наличии такового. В свою очередь каждое ребро  $e_{ij} = (v_i, v_j)$  обозначает переход из укрупнённого блока инструкций вершины  $v_i$  в вершину  $v_j$ . Если блок инструкций не оканчивается инструкцией безусловного перехода и не является последним в подграфе процедуры, то ребро строится к следующей за ней вершине. Метки  $l_T$  и  $l_C$  позволяют создавать рёбра из вершины  $v_i$  в вершину  $v_j$ , где их метки совпадают (1), что происходит при наличии инструкции перехода в конце  $B \in v_i$  и наличии инструкции с меткой  $Label$  в начале  $B \in v_j$ .

$$l_T = l_C, l_T \in v_i, l_C \in v_j \# (1)$$

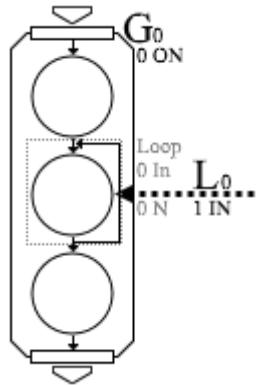


Рисунок 3 – Пример подграфа процедуры с циклом, ссылкой из него и их степенями вложенности

Любой цикл  $loop_j \in G_i$  будет находится внутри определённой процедуры, тем самым начало и конец этого цикла будет всегда внутри одного подграфа процедуры  $G_i$  (рис. 4). Что означает возможность обработки циклов лишь внутри данной процедуры, что потребует обход меньшего количества вершин за раз и меньших затрат памяти на хранение пройденного пути, чем при обработки полноценного графа выполнения программы. Стоит отметить, что в теле каких-то циклов  $loop$  могут быть инструкции вызова других процедур  $G$ , что может на первый взгляд должно потребовать обход вершин вызываемых подграфов процедур, для полноценной обработки текущего  $loop$ . Однако для исключения такой необходимости и применяются ссылки  $L$  из вызывающего подграфа  $G_i$  в вызы-

ваемый  $G_j$ , что позволяет присваивать им значение внутрипроцедурной вложенности  $In$  цикла (2), из которого они были вызваны в  $G_i$ , без необходимости перехода к самой процедуре  $G_j$ . В свою очередь при последующей обработке уже циклов в этом подграфе  $G_j$  не потребуется обрабатывать  $G_i$ , так как уже нужное значение помещено в ссылку  $L$ .

$$IN = In, IN \in L, In \in \text{loop}, \#(2)$$

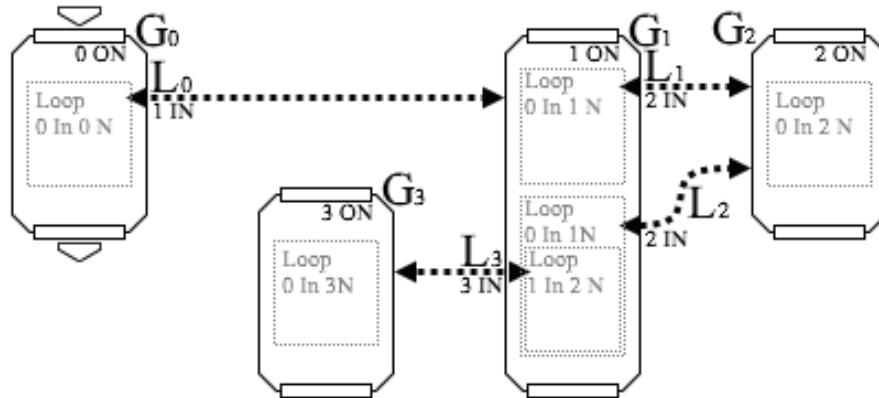


Рисунок 4 – Пример упрощённого графа выполнения программы с определёнными внутрипроцедурными, межпроцедурными и общими степенями вложенности

Каждый цикл  $\text{loop}_i = (V, In, N)$  содержит в себе все вершины входящие в тело цикла  $V$ .  $In$  обозначает внутрипроцедурную вложенность определяющую степень вложенности только внутри текущей процедуры, иными словами текущем подграфе процедуры  $G_j$ . В свою очередь  $N$  отвечает за хранение общей степени вложенности цикла в упрощённом графе выполнения программы  $MG$ , где она определяется из сочетания внутрипроцедурной степени  $In$  этого цикла и межпроцедурной степени  $ON$  содержащей процедуры  $G_j$  (3).

$$N = ON + In, ON \in G_j, In \in \text{loop}_i, N \in \text{loop}_i, \#(3)$$

Для определения межпроцедурной вложенности  $ON$  подграфа процедуры  $G_i$  используется наибольшее значение суммы вложенностей среди всех ссылок  $L_j$  из процедур  $G_l$  (4).

$$ON_i = \max(ON_l + IN_j), ON_i \in G_i, ON_l \in G_l, IN_j \in L_j, \#(4)$$

D300 mov rbp, [rdi+6A8h]	1
D307 lea rax, [rdi+6A0h]	
D30E mov rcx, [r8+0A0h]	
D315 mov [rsp+0B8h+var_70], rax	
D31A mov r8, rax	
D31D test rbp, rbp	
D320 jz loc_14010D441	
D326 db 2Eh	
D326 nop word ptr [rax+rax+00000000h]	2
D330 loc_14010D330:	
D330 cmp [rbp+20h], rcx	
D334 mov rdx, [rbp+10h]	
D338 mov rax, [rbp+18h]	
D33C jnb short loc_14010D358	
D33E loc_14010D33E:	
D33E test rax, rax	
D341 jz loc_14010D369	
D347 mov rbp, rax	
D34A cmp [rbp+20h], rcx	
D34E mov rdx, [rbp+10h]	
D352 mov rax, [rbp+18h]	
D356 jmp short loc_14010D33E	
D358 loc_14010D358:	
D358 test rdx, rdx	
D35B jz loc_14010D55B	
D361 mov r8, rbp	
D364 mov rbp, rdx	
D367 jmp short loc_14010D330	
D369 loc_14010D369:	
D369 mov r12, rbp	
D36C mov rbp, rbx	
D36F nep	
D370 loc_14010D441:	
D370 mov rax, [rsp+0B8h+arg_10]	
D378 lea rsi, [rsp+0B8h+var_68]	
D37D mov rdx, rdi	
D380 lea r8, aActive_0	
D387 mov rcx, rsi	
D38A lea rbx, [rax+408h]	
D391 call _ZSt11char_traitsIcESaIc...	
D396 mov rdx, rsi	
D399 mov rcx, rax	
D3A4 call _ZN15ConditionsStoreixERKNSt7...	
D3A1 mov rcx, rax	
D3A4 call _ZN15ConditionsStore14Conditio...	
D3A9 mov rcx, [rsp+0B8h+var_68]	
D3AE lea r13, [rsp+0B8h+var_58]	
D3B3 cmp rcx, r13	
D3B6 jz short loc_14010D3F5	
D3B8 mov rax, [rsp+0B8h+var_58]	
D3BD lea rdx, [rax+1]	
D3C1 call _ZdlPv	
D3C6 loc_14010D3C6:	
D3C6 lea r8, aFailed_0	
D3CD mov rdx, rdi	
D3D0 mov rcx, rsi	
D3D3 call _ZSt11char_traitsIcESaIc...	
D3D8 mov rdx, rsi	
D3DB mov rcx, rbx	
D3DE call _ZN15ConditionsStoreixERKNSt7...	
D3E2 mov rcx, rax	
D3E6 call _ZN15ConditionsStore14Conditio...	
D3EB mov rcx, [rsp+0B8h+var_68]	
D3F0 cmp rcx, r13	
D3F3 jz short loc_14010D441	
D3F5 loc_14010D3F5:	
D3F6 pop rbx	
D3F7 pop rsi	
D3F7 retn	

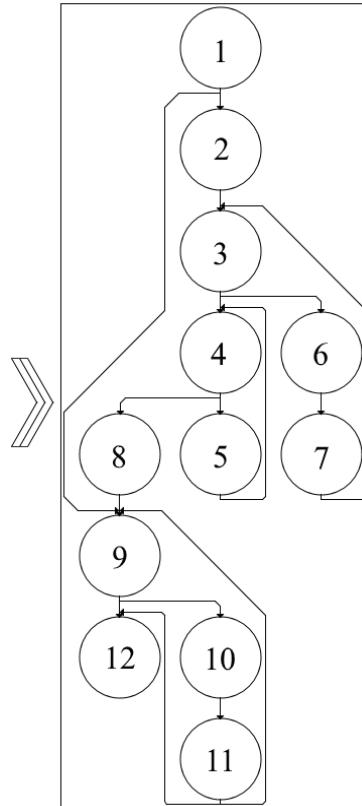


Рисунок 5 – Пример подграфа процедуры на основе дизассемблированного кода исполняемого файла программы

Благодаря такому подходу можно не только узнать, как глубоко вложен каждый цикл внутри своей отдельной функции, но и его степень вложенности в общей структуре программы. Сам граф выполнения программы строится в процессе статического анализа дизассемблированного кода, полученного из исполняемого файла программы (рис. 5), аналогично построению на основе динамического анализа [5].

### Заключение

Предложенная упрощённая структура графа выполнения программы предназначена для поиска и обработки вложенных циклов и получена на основе анализа по исполняемого кода программы. Используется декомпозиция информации графа на независимые подграфы каждой из процедур, которые

соединены ссылками для сохранения информации о вызове процедур из других процедур. Такая распределённая структура позволяет значительно снизить количество вершин необходимых при обработке циклов внутри подграфа и снизить требования к памяти для сохранения пройденных вершин при поиске циклов, тем самым улучшая масштабируемость при работе с программами большого объёма. Предложенная структура будет использована в дальнейшем для поиска, определения степени вложенности и классификации циклов в исполнимом коде программы без доступа к исходному коду.

*Литература*

1. Плаксин С.И. Методы формального описания кода программного обеспечения в задачах автоматического анализа поведения программ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 12. 514-519 с.
2. Midkiff S. Automatic parallelization: an overview of fundamental compiler techniques. 2022.
3. Alfred V.A., Monica S.L., Jeffrey D.U. Compilers Principles, Techniques & Tools. – pearson Education, 2007.C. 525-533.
4. Михайлов А.А. Анализ графа потоков управления в задаче декомпиляции подпрограмм объектных файлов dcuil // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. Том 12. № 2. 2014 г. С. 74-79.
5. Плаксин С.И. Метод для формирования графов исполнения программы для выявления вложенных циклов на основе динамического анализа исполнимого кода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. Вып. 7. 301-304 с.

УДК 621.396.626

## Математические модели и свойства распределения нормированной мощности информационного сигнала

Евгений Кимович Самаров, доктор технических наук,  
заведующий кафедрой математики,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет», г. Санкт-Петербург

*Рассмотрены и проанализированы математические модели, а также  
свойства плотности распределения вероятностей нормированной мощности  
обрабатываемого информационного сигнала, поступающего на вход приемного  
устройства при решении ряда практических задач, связанных с обнаружением,  
распознаванием и тому подобным задачам. При неизвестной или случайно изме-  
няющейся амплитуде сигнала, часто используют процедуры обработки, обла-  
дающие свойствами инвариантности по отношению к параметрам масштаба.  
Как правило, такие процедуры основаны на нормировании выборочных значений  
к оценке какого-либо энергетического параметра. Обычно операция нормирова-  
ния реализуется помощью арифметических операций нормировки после чего  
плотность распределения вероятностей сигнала принципиально отличается от  
входного, ненормированного, сигнала причем не только масштабом. В качестве  
рассматриваемой и анализируемой плотности бала выбрана обобщенная плот-  
ность Дирихле.*

Плотность распределения вероятностей, нормированная мощность информаци-  
онного сигнала, свойства инвариантности, нестационарные случайные процессы,  
линейные преобразования входного сигнала.

## Mathematical models and properties of the normalized power distribution of an information signal

Evgeny Kimovich Samarov, Doctor of Technical Sciences,  
Head of the Department of Mathematics,  
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

*Mathematical models are considered and analyzed, as well as the properties of  
the probability distribution density of the normalized power of the processed informa-  
tion signal received at the input of the receiving device when solving a number of prac-  
tical problems related to detection, recognition, and the like. When the signal ampli-  
tude is unknown or randomly changing, processing procedures are often used that  
have invariance properties with respect to scale parameters. As a rule, such proce-  
dures are based on the normalization of sample values for estimating an energy para-  
meter. Usually, the normalization operation is implemented using arithmetic normali-  
zation operations, after which the probability distribution density of the signal differs  
fundamentally from the input, non-normalized signal, and not only in scale. The Di-  
richlet density is chosen as the considered and analyzed ball density.*

Probability distribution density, normalized information signal power, invariance properties, nonstationary random processes, linear transformations of the input signal.

**Введение.** Для решения большого количества практических задач, связанных с обработкой информационных сигналов, таких, например, как обнаружение, распознавание и тому подобное, при неизвестной или случайно изменяющейся амплитуде сигнала, очень часто используют процедуры обработки, обладающие свойствами инвариантности по отношению к параметрам масштаба [3].

Как правило, такие процедуры основаны на нормировании выборочных значений к оценке какого-либо энергетического параметра. Операция нормирования реализуется либо с помощью системы автоматической регулировки усиления, поддерживающей постоянную оценку среднего значения модуля или квадрата огибающей, либо с помощью арифметических операций нормировки, например, вида:

$$y_i = \frac{x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

Очевидно, что плотность распределения вероятностей (ПРВ) сигнала  $y_i$  после нормировки принципиально отличается от входного, ненормированного, сигнала  $x_i$ , причем не только масштабом.

Если  $x_i$  – независимые нормально распределенные величины из  $N(0, \sigma)$ , то в соответствии с [4] совокупность величин  $\{y_i\}$  распределена по закону Дирихле.

Плотность распределения вероятностей Дирихле (ПРВД) обладает весьма полезным качеством: маргинальные распределения, распределения сумм, частичных сумм, условное распределение и тому подобное, лежит в классе ПРВД. Это очень удобно с точки зрения построения структур устройств обработки сигнала, так как переход от обработки одной совокупности величин к другой осуществляется не изменением структуры, а лишь параметрической настройкой.

ПРВД соответствует случаю, когда все входящие в выражения величины  $u_i = x_i^2$  подчиняются гамма-распределению с одинаковыми значениями параметров масштаба.

**Обработка нестационарных случайных процессов.** При обработке нестационарных случайных процессов приходится рассматривать совокупность величин с разными масштабными коэффициентами. В [2] получено распределение таких случайных величин и показано, что благодаря появлению новых параметров наблюдается большое многообразие форм ПРВ, названного обобщенным распределением Дирихле (ОРД)

$$\begin{aligned} W(y_1, \dots, y_k) &= \frac{\Gamma(\sum_{i=1}^{k+1} v_i) \prod_{i=1}^k y_i^{v_i-1} (1 - \sum_{j=1}^k y_j)^{v_{k+1}-1} \gamma_i^{v_i}}{\sum_{i=1}^{k+1} (v_i) [1 - \sum_{i=1}^k (1 - y_i)]^{\sum_{i=1}^{k+1} v_i}} = \\ &= D_0(v_1, \gamma_1, \dots, v_k, \gamma_k; v_{k+1}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\gamma_i = \beta_i / \beta_{k+1}$ ,  $v_i$ ,  $\beta_i$  – параметры формы и масштаба кривой ПРВ гамма-распределения;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция.

Решение ряда задач обработки сигналов связано с нахождением ПРВ раз-

личных преобразований отсчетов  $y_i$ . Поэтому важно рассмотреть, распространяются ли свойства ПРВ Дирихле на ОРД.

**Анализ свойств ПРВ Дирихле. Маргинальное ПРВ.** Маргинальное распределение случайной величины  $(y_1, \dots, y_k)$  из мерного ОРД  $D_0(v_1, \gamma_1, \dots, v_k, \gamma_k; v_{k+1})$ , найденное непосредственным интегрированием (1) по  $y_i$ ,  $i > k_1$ , равно

$$W(y_1, \dots, y_{k+1}) = D_0(v_1, \gamma_1, \dots, v_{k_1}, \gamma_{k_1}; \sum_{i=k_1+1}^{k+1} v_i) C_M,$$

где  $C_M = \prod_{i=k_1+1}^k \gamma_i^{v_i} F_{k-k_1}$ ;  $F_{k-k_1}$  – гипергеометрическая функция  $n = k - k_1$  переменных, определяемая кратным интегралом эйлерова типа [1] и представим в виде ряда

$$\begin{aligned} F_n(a, b_1, \dots, b_n; c; h_1, \dots, h_n) = \\ = \sum_{l_1}^{\infty} \dots \sum_{l_n}^{\infty} \frac{(a)_d (b_1)_{l_1} \dots (b_n)_{l_n}}{(c)_d l_1! \dots l_n!} h_1^{l_1} \dots h_n^{l_n}, \end{aligned}$$

при следующих значениях параметров:

$$\begin{aligned} a &= \sum_{j=1}^{k+1} v_j; d = \sum_{j=1}^n l_j; c = \sum_{j=k_1+1}^k v_j; \\ b_i &= v_i, h_i = (1 - \gamma_i) \left( 1 - \sum_{j=1}^{k_1} y_j \right) / \left[ \sum_{j=1}^{k_1} (1 - \gamma_j) y_j \right], k_1 + 1 \leq i \leq k; \end{aligned}$$

(.) – символ Погхаммера [1].

**Линейные преобразования входного сигнала.** В задачах обработки сигнала часто используются линейные преобразования входного сигнала, работа по пачке в радиолокации, спектральные преобразования. Простейшим линейным преобразованием является преобразование вида  $z = \sum_{i=1}^k y_i$ .

Пусть совместное распределение отсчетов сигнала  $y_1, \dots, y_k$  есть -мерного ОРД. Требуется найти распределение  $z_k = y_1 + \dots + y_k$ .

Обычно, эта задача решается применением следующей замены переменных в (1):  $z_1 = y_1, z_2 = y_1 + y_2, \dots, z_k = y_1 + \dots + y_k$  и последовательным интегрированием по всем  $z_i \neq z_k$ .

В результате получим следующее выражение для распределения  $z_k$ :

$$W(z_k) = D_0(v_1 + \dots + v_k, \gamma_k; v_{k+1}) C_{\Sigma},$$

где  $C_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{k-1} \gamma_i^{v_i} \gamma_k^{-\sum_{i=1}^{k-1} v_i} F_{k-1}$ ;  $F_{k-1}$  – гипергеометрический ряд  $n = k - 1$  переменных,

$$F_n = \sum_{l_1}^{\infty} \dots \sum_{l_n=0}^{\infty} \frac{(a)_d \prod_{i=1}^n (b_i)_{g_i}}{\prod_{i=1}^n [(b_{i+1})_{g_i} l_i!]^{1/(1-\gamma_k)}} h_1^{l_1} \dots h_n^{l_n}.$$

Здесь  $a = \sum_{j=1}^{k+1} v_j$ ;  $d = \sum_{j=1}^n l_j$ ;  $b_i = \sum_{j=1}^i v_j$ ;  $g_i = \sum_{j=1}^i l_j$ ;  $h_j = \frac{z_k (\gamma_{j+1} - \gamma_j)}{1 - (1 - \gamma_k) z_k}$ .

**Совместное ПРВ частичных сумм.** В ряде практических задач возника-

ет необходимость получения совместного распределения частичных сумм, то есть ПРВ векторной случайной величины:

$$(y_1 + \dots + y_{k_1}, y_{k_1+1} + \dots + y_{k_1+k_2}, \dots, y_{k_1+\dots+k_{s-1}+1} + \dots + y_{k_1+\dots+k_s}).$$

Как и следовало ожидать, распределение частичных сумм

$t_1 = y_1 + \dots + y_{k_1}$ ,  $t_2 = y_{k_1+1} + \dots + y_{k_1+k_2}$ , ...,  $t_s = y_{k_1+\dots+k_{s-1}+1} + \dots + y_{k_1+\dots+k_s}$  также не является ОРД и отличается от него множителем  $C_{p\Sigma}$ , имеющим вид гипергеометрического ряда  $n = k - s$  переменных:

$$W(t_1, \dots, t_s) = D_0(v_{(1)}, \gamma_1, \dots, v_{(s)}, \gamma_s; v_{(s+1)}) C_{p\Sigma},$$

где

$$v_{(1)} = v_1 + \dots + v_{k_1}, \dots, v_{(s)} = v_{k_1+\dots+k_{s-1}+1} + \dots + v_{k_1+\dots+k_s},$$

$$v_{(s+1)} = v_{k_1+\dots+k_{s+1}} + \dots + v_{k_1+\dots+k_s},$$

$$C_{p\Sigma} = \frac{\prod_{i=1}^k \gamma_i^{v_i}}{\prod_{i=1}^s \gamma_i^{v(i)}} \sum_{l_1=0}^{\infty} \dots$$

$$\sum_{l_n=0}^{\infty} \frac{(a)_d \prod_{j=0}^{s-1} \prod_{i=1}^{p_{j+1}-p_{j-1}} (b_{i,p_j})_{g_i,p_j} \prod_{i=1}^{k-p_s} (v_{p_s} + i)_{l_{p-s+i}}}{\prod_{j=0}^{s-1} \prod_{i=1}^{p_{j+1}-p_{i-1}} (b_{i+1,p_j})_{g_i,p_j} (c)_d \prod_{i=1}^n (l_i!)} \times$$

$$\times \prod_{i=1}^{p_s-s} h_i \prod_{j=1}^{l_i k - p_s} \eta_j^{l_{p_s+j} - s},$$

$$a = \sum_{i=1}^{k+1} v_i; c = \sum_{i=k_1+1}^k v_i; d = \sum_{i=1}^n l_i; b_{i,p_j} = \sum_{m=1}^i v_{m+p_j};$$

$$g_{i,p_j} = \sum_{m=1}^i l_{m+p_j-j}; p_j = \sum_{i=1}^j k_i; p_0 = 0;$$

$$h_i = \frac{(\gamma_{i+1} - \gamma_i) t_i}{1 - \prod_{j=1}^s (1 - \gamma_{p_j}) t_j};$$

$$\eta_j = \frac{(1 - \gamma_{p_{s+j}})(1 - \sum_{j=1}^s t_j)}{1 - \prod_{i=1}^s (1 - \gamma_{p_i}) t_i}.$$

Получены доказательства всех остальных свойств ОРД, аналогичные [4], которые из-за громоздкости не приводятся. Отметим, что искомые ПРВ не лежат в классе ПРВД, отличаясь от него сомножителем, содержащим гипергеометрическую функцию, параметры которой функционально связаны с параметрами ОРД.

В простейшем случае двухмерного ОРД маргинальное ПРВ случайной величиной величины  $y_1$  из совокупности  $(y_1, y_2)$

$$W(y_1) = D_0(v_1, \gamma_1; v_2 + v_3) \gamma_2^{v_2} \times \\ \times {}_2F_1 \left( v_1 + v_2 + v_3, v_2; v_2 + v_3; \frac{(1-y_1)(1-\gamma_2)}{1-(1-\gamma_1)y_1} \right),$$

а ПРВ суммы случайных величин  $y_1 + y_2 = z_2$

$$W(z_2) = D_0(v_1 + v_2, \gamma_2; v_3) (\gamma_1 / \gamma_2)^{v_1} \times \\ \times {}_2F_1 \left( v_1 + v_2 + v_3, v_1; v_1 + v_2; \frac{(\gamma_2 - \gamma_1) z_2}{1 - (1 - \gamma_2) z_2} \right).$$

Зависимость формы кривой ПРВ от параметров  $v_1, \gamma_1, v_2, \gamma_2, v_3$  представ-

лены на рисунках 1, 2.

На рисунке 1, а для кривых 1 - 6:  $v_1 = 3$ ,  $v_2 = v_3 = 1,5$  при значениях  $\gamma_1 = 2; 5; 5; 2; 1; 0,2$ ; 1; 0,2 и при  $\gamma_2 = 0,2; 2; 2; 5; 2; 2$  соответственно. На рисунке 1, б для кривых 1 - 6:  $\gamma_1 = 2$ ,  $\gamma_2 = 0,5$  при значениях  $\gamma_1 = 1,5; 1,5; 3; 3; 1; 1$ ;  $v_2 = 2; 1; 2; 0,33; 0,67; v_3 = 1; 2; 1; 2; 0,67; 0,33$  соответственно.

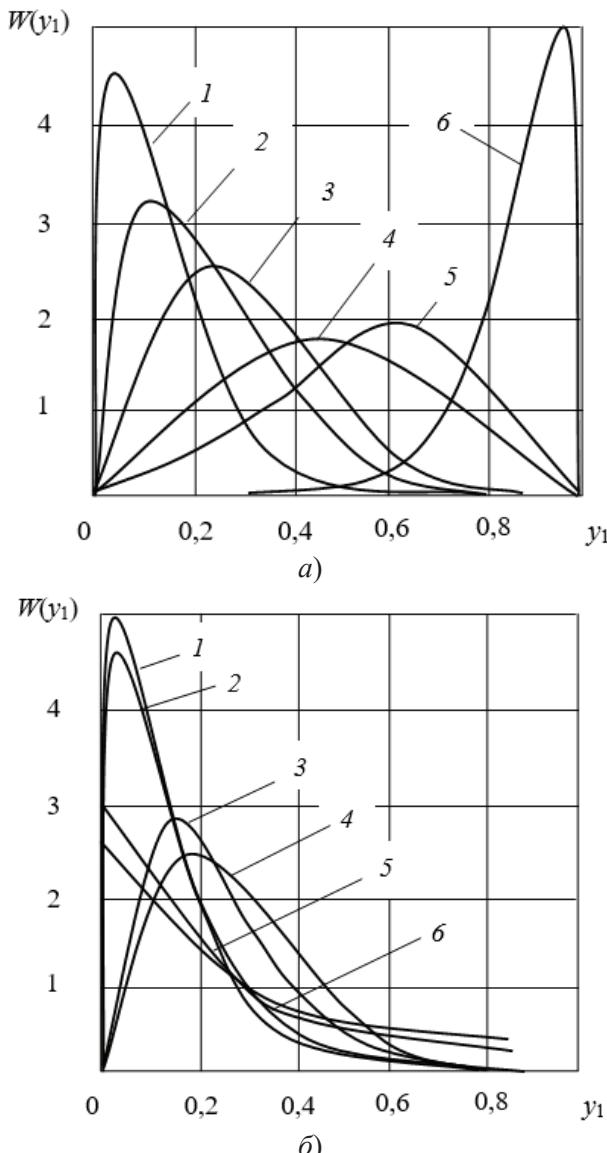


Рисунок 1 – Плотность вероятности маргинального распределения случайной величины  $y_1$  из совокупности  $(y_1, y_2)$

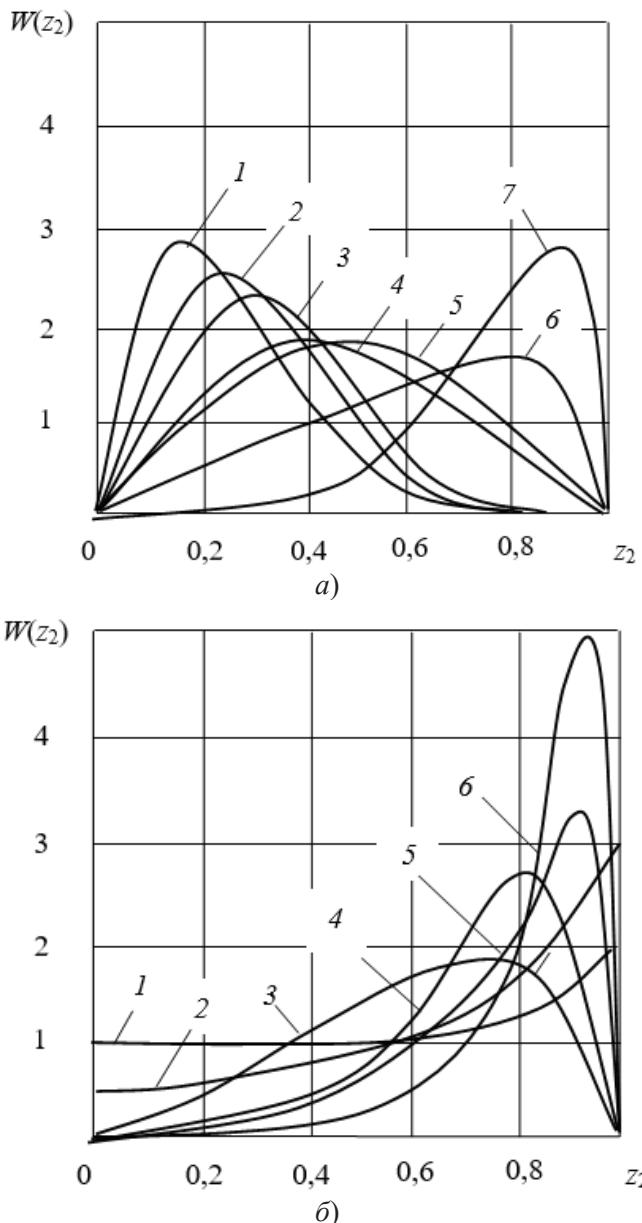


Рисунок 2 – Плотность распределения вероятности суммы двух случайных величин  $z_2 = y_1 + y_2$

На рисунке 2, а для кривых 1-7:  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 2$ ;  $v_3 = 3$  при значениях  $\gamma_1 = 2$ ; 5; 2; 1; 0,2; 1; 2; 0,2; 2 и при  $\gamma_2 = 5$ ; 2; 2; 2; 1; 2; 0,2 соответственно. На рисунке 1, б для кривых 1-6:  $\gamma_1 = 0,2$ ,  $\gamma_2 = 2$  при значениях  $v_1 = 0,33$ ; 0,67; 1; 2; 1; 2;  $v_2 = 0,67$ ; 0,33; 2; 1; 2; 1;  $v_3 = 1$ ; 3; 3; 1,5; 1,5 соответственно.

При  $\gamma_2 = 1$  кривая маргинального распределения и при  $\gamma_1 = \gamma_2$  кривая распределения суммы совпадает с кривой ОРД.

**Заключение.** Таким образом рассмотрены и проанализированы математические модели и свойства распределения нормированной мощности информационного сигнала. Показано, что несмотря на то, что ОРД  $D_0(v_1, \gamma_1, \dots, v_k, \gamma_k; v_{k+1})$ , предложенное в [2], внешне похоже на свой аналог – ПРВД  $D(v_1, \dots, v_k; v_{k+1})$ , оно не является устойчивым даже при простейших линейных преобразованиях: маргинальные распределения, распределения сумм, частичных сумм, условные распределения отличаются от ОРД сомножителями, содержащими гипергеометрические ряды.

*Литература*

1. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Физматгиз, 2011. 1100 с.
2. Отечественные радиолокационные и волноводные уровнемеры с частотной модуляцией. Промышленное применение / Б.А. Атаянц, Л.С. Атаянц, И.В. Баранов [и др.]; под общей редакцией Б.А. Атаянца. Изд. 2-е, доп. Рязань: Рязанская областная типография. 2021. 387 с.
3. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
4. Уилкс С. Математическая статистика / Пер. с англ. под ред. Линника Ю.В. М.: Наука, 1967. 632 с.

УДК 621.391.26:519.2

## **Оценка точности локации цели в многоэлементных приемниках излучения летательных аппаратов**

**Яна Юрьевна Ионченкова**, старший преподаватель кафедры математики,  
**Евгений Кимович Самаров**, доктор технических наук,  
заведующий кафедрой математики,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет», г. Санкт-Петербург

*Рассмотрены вопросы, связанные со сравнением двух способов локации цели в оптико-электронных приборах с многоэлементными приемниками излучения, применяемыми в летательных аппаратах. Получены выражения для статистических характеристик приборов с многоэлементными приемниками излучения, в которых применены способы локации цели путем определения ее центроиды и сканирования. Осуществлено сравнение точности этих способов.*

Локация цели, статистическая характеристика, разрешающая способность, пространственное разрешение, многоэлементные фотоприемники, непрерывный модулированный сигнал.

### **Assessment of target location accuracy in multi-element radiation receivers of aircraft**

**Yana Yuryevna Ionchenkova**, is a senior lecturer at the Department of Mathematics,  
**Evgeny Kimovich Samarov**, Doctor of Technical Sciences, Head of the  
Department of Mathematics,  
St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg

*The issues related to the comparison of two methods of target location in optoelectronic devices with multi-element radiation receivers used in aircraft are considered. Expressions are obtained for the statistical characteristics of devices with multi-element radiation receivers, which use methods for locating a target by determining its centroid and scanning. The accuracy of these methods is compared.*

Target location, statistical characteristics, resolution, spatial resolution, multi-element photodetectors, continuous modulated signal.

#### **Введение.**

Одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками оптико-электронных приборов (ОЭП) для измерения перемещений объектов с многоэлементными фотоприемниками (МФ) излучения, выполняющими одновременно функции анализаторов изображения, например, прибор с зарядной связью (ПЗС) (рисунок 1), комплементарная структура «металл-окисел-полупроводник» (КМОП) и другие, является повышение их разрешающей способности, от которой зависит и точность измерения.

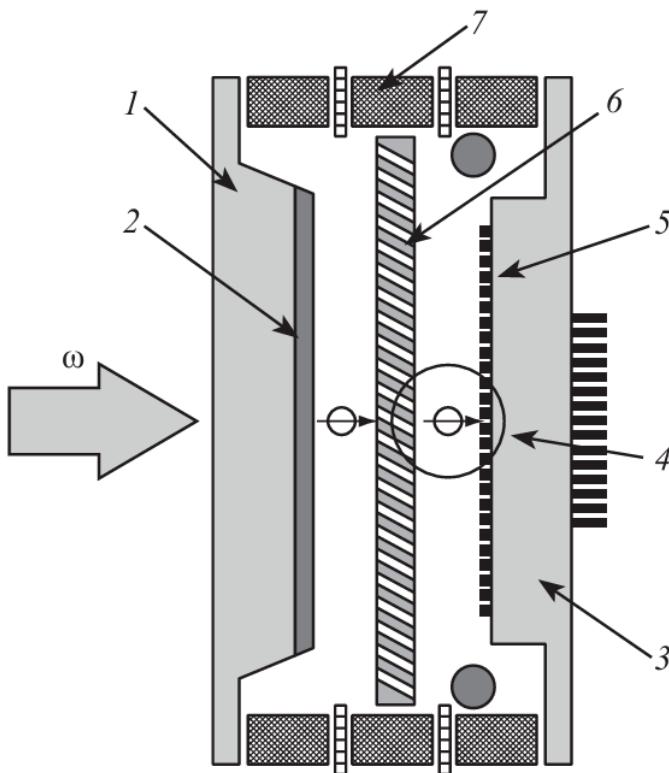


Рисунок 1 – Фотоприемный модуль на основе электронно-чувствительной ПЗС-матрицы:  $\omega$  – поток фотонов,

1 – входное окно; 2 – фотоэмиссионный катод; 3 – керамическое основание;  
4 – усиленный поток электронов; 5 – электронно-чувствительная ПЗС-матрица;  
6 – микроканальная пластина; 7 – металлокерамический корпус

Разрешающая способность ОЭП с МФ ограничивается размерами их отдельных элементов и определяется исходя из теоремы Котельникова [2-4]

$$f_N = n_3 / 2I, \quad (1)$$

где  $f_N$  – разрешающая способность в линиях на мм;  $n_3$  – число элементов в строке или столбце;  $I$  – размер строки или столбца.

Тогда, разрешающая способность к смещению  $\Delta_p$  изображения равна удвоенному шагу  $\Delta_x$  расположения элементов, то есть  $\Delta_p = 2\Delta_x$ .

Отметим, что при регистрации заранее неизвестного характера распределения освещенности вообще невозможно получить разрешение менее рассчитанного по (1).

Пространственное разрешение, а, следовательно, и точность измерений, можно повысить при использовании МФ с большим числом элементов (уменьшением их размеров). Однако уменьшение размеров элементов связано с ухудшением энергетических соотношений в приборе, что ведет к снижению точности

измерений, а также к уменьшению быстродействия [6-10].

Таким образом, и этот способ повышения точности измерений имеет существенное ограничение.

Другим способом повышения разрешающей способности ОЭП с МФ является использование дополнительного принудительного сканирования изображения излучателя в плоскости фотоприемника относительно его среднего положения, соответствующего текущему перемещению излучателя.

Так как выходной сигнал при смещении изображения непрерывно изменяется, сканирование позволяет оценить не только смещение изображения объекта, расположенного внутри элемента, но и характер распределения освещенности.

В открытых источниках отсутствует теоретическое обоснование точности этого способа анализа изображения для современных приемников излучения. Такое обоснование известно для мозаичных датчиков положения, но с целью ли неализации статистической характеристики у них использовали большую амплитуду сканирования, охватывающую все элементы фотоприемника, и отсутствовала цифровая развертка анализируемого изображения.

В приборах с ПЭС, в отличие от мозаичных датчиков положения, выбирают небольшую амплитуду сканирования, сравнимую с шагом расположения элементов.

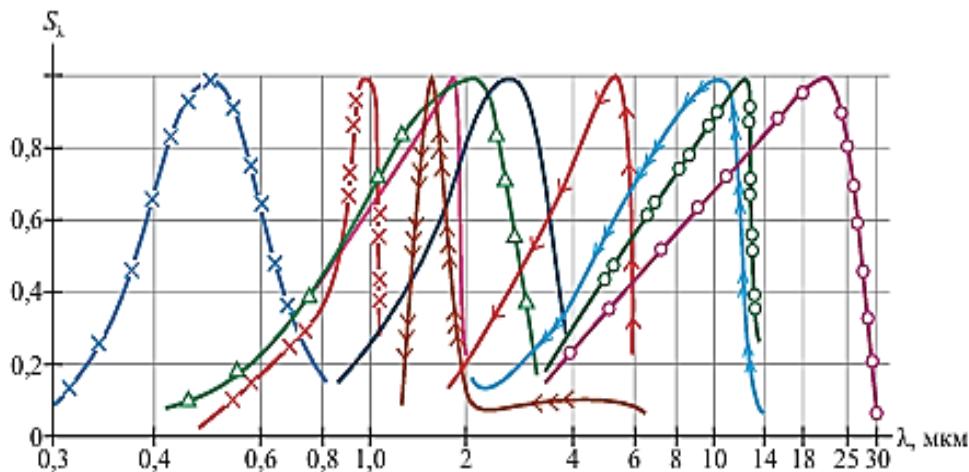
Вследствие возвратно-поступательного сканирования в небольших пределах возникает непрерывный сигнал, параметры которого связаны со средним положением изображения излучателя. При этом в принципе возможны различные соотношения между амплитудой  $A$  сканирования изображения, периодом  $\Delta_x$  многоэлементного фотоприемника и диаметром изображения объекта, зависящим от конкретного назначения прибора.

### **Оценка точности оптико-электронных приборов.**

Оценить точность ОЭП с прибором с зарядовой связью (ПЗС) или другим МФ легко по статистической характеристике, то есть зависимости выходного сигнала от перемещения излучателя.

С целью ее получения и упрощения математических выкладок предположим, что изображение излучателя является точечным, скорость сканирования постоянной, амплитуда сканирования равна половине шага расположения элементов, а чувствительность и размеры всех элементов одинаковы.

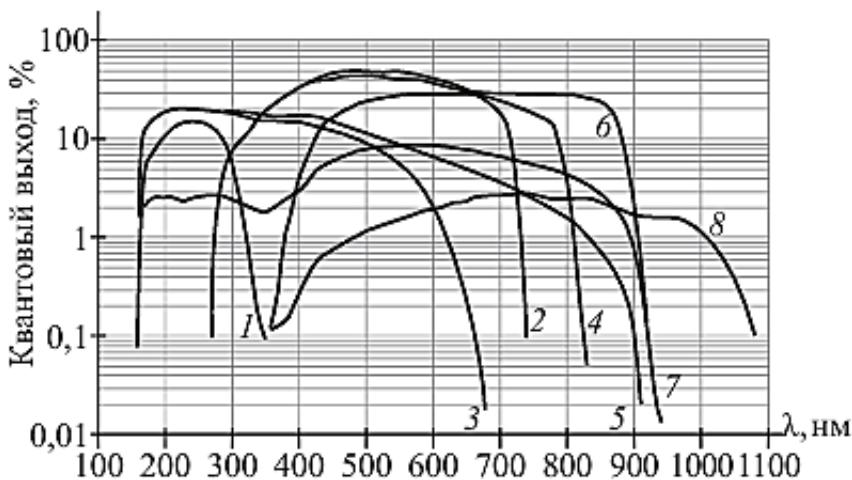
Следует отметить, что чувствительность к монохроматическому излучению  $S_\lambda$ , называемой спектральной, у большинства приемников меняется с изменением длины волны  $\lambda$  падающего на него монохроматического потока (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Спектральные характеристики некоторых ПОИ:**

—×— сернисто-кадмиевый фоторезистор CdS; —×— кремниевый фотодиод; —— германниевый фотодиод; ▲— неохлаждаемый фоторезистор PbS<sub>295</sub>; ■— охлаждаемый фоторезистор PbS<sub>78</sub>; ←— охлаждаемый фоторезистор InSb<sub>78</sub>; ←— глубокоохлаждаемый (T=30 K) фоторезистор Ge; ○— охлаждаемый фотоприемник (фоторезистор, фотодиод) Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te при x=0,95 и температуре охлаждения T=70 K; ○— то же, при x=0,1 и температуре охлаждения T=83 K; ←— охлаждаемый фоторезистор Ge:Au<sub>78</sub>

На рисунках 3 и 4 представлены спектральные характеристики основных типов фотокатодов и катодолюминесцентных экранов, применяемых в электронно-оптических преобразователях (ЭОП).

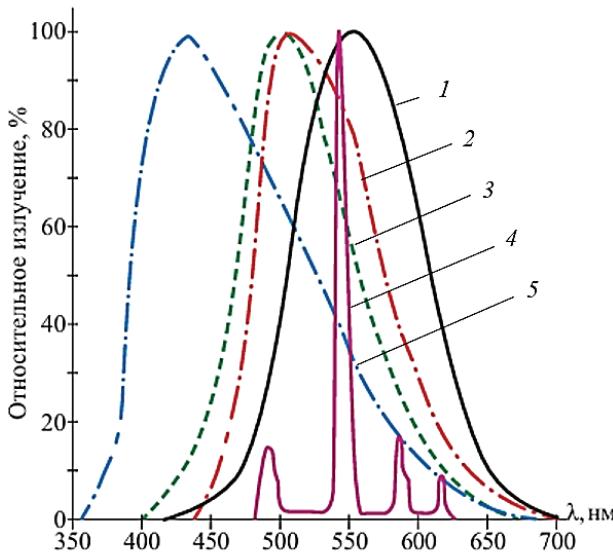


**Рисунок 3 – Спектральные характеристики основных типов фотокатодов ЭОП:**  
 1 – CsTe; 2 – GaAsP; 3 – SbNa: Cs (двуихщелочного); 4 – GaAsP (с продленной чувствительностью в красной области спектра); 5 – Na KSB:Cs (многощелочного);  
 6 – GaAs:Cs (с отрицательным электронным средством);  
 7 – Na KSB:Cs (с продленной чувствительностью в красной области спектра);  
 8 – InGaAs:Cs (с отрицательным электронным средством)

Пусть точечное изображение перемещается вдоль одной из осей координат, например,  $x$ . В этом случае амплитуда, например, первой гармоники модулированного сигнала  $U_1$  может быть получена из следующей интегральной операции свертки:

$$U_1(\Delta x) = \frac{S_U}{A} \int_{\Delta x}^{2A} \Phi_0(x - \Delta x) \cos \frac{\pi x}{2A} dx,$$

где  $\Delta x$  – текущее перемещение изображения излучателя в плоскости анализа;  $S_U$  – вольтовая чувствительность элементов фотоприемника;  $A$  – амплитуда сканирования;  $\Phi_0$  – поток в изображении объекта.



**Рисунок 4 - Спектральные характеристики катодолюминофоров:**  
**1 – спектральная чувствительность глаза; 2 – К-60; 3 – КС-525;**  
**4 – КФЛ-544; 5 – К-71**

После интегрирования этого выражения с учетом свойств в данном случае ступенчатой функции  $\Phi_0(x - \Delta x)$  и элементарных преобразований получим

$$U_1(\Delta x) = \frac{2\Phi_0 S_U}{\pi} \sin \frac{\pi \Delta x}{2A}.$$

Отсюда при небольших смещениях  $\Delta x$  среднего положения излучателя относительно середины элемента приемника с точностью до величин второго порядка малости относительно  $\Delta x/A$  имеем соотношение вида

$$U_1(\Delta x) \approx \Phi_0 S_U \Delta x / A.$$

Или с учетом того, что максимальное значение сигнала  $U_{\max} = \Phi_0 S_U$ , запишем

$$U_1(\Delta x)/U_{\max} \approx \Delta x/A. \quad (2)$$

Так как в рассматриваемом случае амплитуду сканирования можно представить в виде

$$A = 0,5b + C,$$

где  $b$  – ширина элемента;  $C$  – малая доля от величины  $0,5b$ , сравнимая с расстоянием между отдельными элементами фотоприемника, (2) запишем следующим образом:

$$U_1(\Delta x)/U_{\max} \approx 2\Delta x/(2b + C).$$

Приняв во внимание, что для ПЗС значения  $C$  составляют десятые доли микрометра (обычно не более 0,2-0,3 мкм [8]), а значения  $b$  – не менее 6-10 мкм, формулу перепишем в виде

$$U_1(\Delta x)/U_{\max} \approx x/b. \quad (3)$$

**Сравнение чувствительности и точности способа анализа изображения.** Для сравнения, необходимо иметь соответствующую статистическую характеристику. Эта характеристика должна выражать зависимость выходного сигнала от смещения изображения объекта.

Такую характеристику можно получить исходя из преобразования алгоритма центроиды. Для ее нахождения предположим, что имеется равномерное распределение освещенности в изображении прямоугольного объекта  $E(x) = \text{const}$ .

При равномерном распределении освещенности изображения (марки) в плоскости многоэлементного приемника излучения координату его энергетического центра тяжести в случае облучения четырех элементов при смещении изображения на  $\Delta x$  можно представить в виде рисунка 5.

И формулы

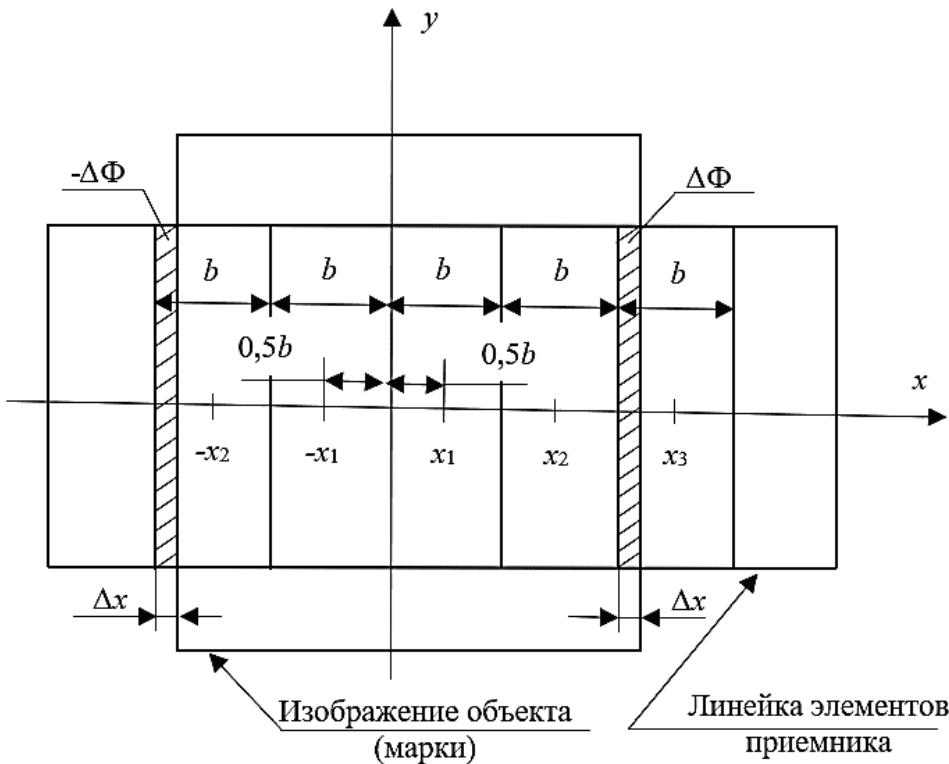
$$x_{ц.т} = \frac{\Phi_0 x_2 + x_3 \Delta\Phi - (\Phi_0 - \Delta\Phi)x_2}{4\Phi_0},$$

где  $\Phi_0$  – поток, облучающий один элемент приемника;  $x_2, x_3$  – координаты центров соответственно второго и третьего элементов относительно оси у плоскости анализа;  $\Delta\Phi$  – изменение потока излучения крайних облучаемых элементов, вызванное смещением изображения объекта.

Из этой формулы получим

$$x_{ц.т} = \frac{\Delta\Phi(x_2 + x_3)}{4\Phi_0}, \quad (4)$$

где  $x_2 = 1,5b, x_3 = 2,5b$ .



**Рисунок 3 – Координаты энергетического центра тяжести изображения объекта при равномерном распределении освещенности**

Отсюда

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} = x_{ц.т}/b. \quad (5)$$

Поскольку при равномерном распределении освещенности каждого прямогоугольного элемента имеет место равенство

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} = \Delta x/b. \quad (6)$$

после подстановки (6) в (5) получим

$$x_{ц.т} = \Delta x.$$

То есть, без учета интервала между отдельными элементами приемника при равномерном распределении освещенности изображения объекта, изменение положения центра тяжести строго соответствует смещению изображения объекта.

Аналогично можно показать, что при облучении трех, пяти и любого дру-

гого числа элементов имеет место соотношение (5), так как числитель в (4) зависит только от разности потоков, попадающих на крайние элементы приемника и их координат.

Таким образом, использовав метод математической индукции, легко показать, что в общем случае статистическая характеристика описывается, как и для других амплитудных анализаторов [1, 4], единой формулой

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi_0} = \frac{U_1(\Delta x)}{U_{\max}} = \frac{x_{ц,т}}{b} = \frac{\Delta x}{b}. \quad (7)$$

**Заключение.** Из сравнения (3) и (7) следует, что чувствительность способа анализа, основанного на принудительном сканировании изображения объекта при рассмотренном соотношении между амплитудой сканирования и периодом расположения элементов фотоприемника, примерно в два раза выше, чем при использовании центроиды изображения.

Аналогично рассчитываем отношение чувствительностей рассмотренных способов анализа изображения при других соотношениях между размером изображения объекта, периодом расположения элементов приемника излучения и амплитудой сканирования, а также при разных характеристиках сканирования. Оно может быть меньше двух из-за падения глубины модуляции, вызванной уменьшением размера изображения, и мало отличается от чувствительности способа анализа с использованием алгоритма центроиды.

Тем не менее точность способа анализа со сканированием изображения объекта всегда выше, так как разрешающая способность не ограничивается величиной  $\Delta_p = 2\Delta_x$ . Результатирующая погрешность в этом случае в основном зависит от отклонения от номинала скорости сканирования и дисперсии шума.

Что касается погрешности из-за неоднородности чувствительности и шумов (геометрических шумов) элементов приемника излучения, которые часто являются доминирующими, то они исключаются или ослабляются при небольших амплитудах сканирования, равных или превышающих один шаг расположения элементов.

К тому же при амплитудах сканирования в пределах десятков микрометров неравномерность скорости сканирования незначительна (менее 0,01 мкм) и не оказывает влияния на точность измерений. Глубину модуляции можно повысить за счет выключения сигналов с соседних элементов при их выборе.

Кроме того, иногда необходимо учитывать систематические погрешности, вызванные неравномерным и особенно несимметричным распределением освещенности изображения объекта в плоскости анализа, которые зависят от aberrации объектива.

При применении высококачественных объективов с исправленными основными aberrациями и особенно комой, вызывающей не симметрию распределения освещенности, изменяющуюся при изменении смещения изображения объекта в угловом поле прибора, основными становятся частные погрешности, обусловленные определенными шумами приемника (дробовыми, тепловыми и другими), которые обычно оказывают меньшее влияние на точность измерений, чем геометрические шумы.

Следует отметить, что разрешающая способность при этом способе анализа мало зависит от шага расположения пикселей приемника излучения и изменений симметричных распределений освещенности изображений в процессе измерений.

*Литература*

1. Аникс Д.А. и др. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения векторного информационного параметра сигнала на фоне мультипликативных помех // Радиотехника. 2016. № 2. С. 72-82.
3. Первулосов Ю.Б. и др. Проектирование оптико-электронных приборов / под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Логос, 2000. 488 с.
4. Соломатин В.А. Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. М: Машиностроение, 1992. 126 с.
5. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
6. Abbasova T.S., Artyushenko V.M., Samarov K.L. Modern methods of processing of video information and evaluating the quality of streaming video perception. Biosciences Biotechnology Research Asia. 2014. Т. 11. С. 265-268.
7. Artyushenko V.M., Volovach V.I., Vasilevich I.V. Estimation of the effect of multiplicative noise on signal detection against the background of additive noise. Всборнике: Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 – Proceedings. 2020. С. 9067420.
8. Kramer H. Untersuchungen zur zweidimensionalen Kantenlagebestimmung mit CCD-Zeile in Subpixelbereich: Diss / Friedrich-Schiller-Univ. Jtta, 1989.
9. Mc. Vey E.S., Chen P.F. // IEEE Nrans. 1069. V. IECI-16.
10. Wetzel K., Frosini D. // Laser Focus World. 1999. №3. P.11.

УДК 62.761

## Защита вертолётов от обледенения

**Александр Иванович Карниушкин**, кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Физика»,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», г. Москва,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия»,

Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва,

**Владимир Вячеславович Кузьмин**, доцент кафедры «Физика»,

**Александр Васильевич Клыгин**, доцент кафедры «Физика»,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», г. Москва,  
**Андрей Евгеньевич Смирнов**, лаборант, Аэрокосмический факультет,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

*В работе приводится анализ опасностей обледенения различных частей  
вертолёта и возможных мер их устранения. Рассматривается возможная оп-  
тимизация размещения электрических нагревательных элементов для защиты  
лопастей несущего и рулевого винтов. Для предохранения стёкол кабины лётчи-  
ков от запотевания и промерзания применяются электронагреватели с устрой-  
ством автоматической регулировки температуры на основе термодатчика  
(термометра сопротивления ТД-2). Анализируется применение воздушно-  
тепловой системы защиты от обледенения воздухозаборников и частей двигате-  
ля с отбором горячего воздуха от компрессора работающего двигателя.*

Обледенение, вертолёт, барьерный лёд, электронагреватели.

## Protecting helicopters from icing

**Alexander Ivanovich Karnyushkin**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor, Head of the Department of Physics,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations  
of Russia», Moscow,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Chemistry of the Scientific and Educational-  
Complex «Fundamental Sciences»,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Bauman Moscow State Technical University  
(National Research University)», Moscow,

**Vladimir Vyacheslavovich Kuzmin**, Associate Professor of the Department  
of Physics,

**Alexander Vasilyevich Klygin**, Associate Professor of the Department  
of Physics,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Academy of the State Fire Service of the Ministry  
of Emergency Situations of Russia», Moscow,

**Andrey Evgenievich Smirnov**, Laboratory Assistant,  
Faculty of Aerospace Engineering,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Bauman Moscow State Technical University  
(National Research University)», Moscow

*The paper provides an analysis of the dangers of icing in various parts of the helicopter and possible measures to eliminate them. A possible optimization of the placement of electric heating elements to protect the main and tail rotor blades is considered. To protect the cockpit windows from fogging and freezing, electric heaters with an automatic temperature control device based on a thermal sensor (TD-2 resistance thermometer) are used. The use of an air-thermal system of protection against icing of water intakes and engine parts with hot air extraction from the compressor of a running engine is analyzed.*

Icing, helicopter, barrier ice, electric heaters.

В настоящее время в России существует большое разнообразие пассажирского и грузового транспорта.

Оценка рисков для различных видов транспорта включает в себя анализ потенциальных опасностей, разработку мер по их предотвращению и контролю и обеспечение планов действий в случае возникновения таких ситуаций.

Некоторые виды транспорта и связанные с ними опасности:

- Автомобильный транспорт. Осуществляет небезопасные перевозки, следовательно, у него должна быть высокая страховка.

- Железнодорожный транспорт. Опасности связаны с повреждениями при разгрузке и выгрузке, сходе составов и воровстве.

- Морской транспорт. Опасности связаны с повреждениями при погрузке-выгрузке, на маршруте из-за погодных условий.

- Авиационный транспорт. Кроме хищений в аэропорту считается самым безопасным.

Вместе с тем необходимо учитывать положительные и отрицательные особенности видов транспорта (табл. 1).

**Таблица 1 – Особенности некоторых видов транспорта**

Вид транспорта	Особенности видов транспорта	
	положительные	отрицательные
Автомобильный	Широко используется во всей стране	Низкая скорость перевозок
Железнодорожный	Высокая пропускная способность	Низкая скорость перевозок
Морской	Доступен внутренний и внешний каботаж	Зависимость перевозок от сезонности
Авиационный	Используется в любых труднодоступных районах страны	Очень зависим от метеоусловий

Самым безопасным транспортным средством в России является трамвай, на который приходится 0,04 доли человека погибших и раненых из 1 миллиона перевезённых пассажиров. Самым опасным транспортным средством считается вертолёт – 9,4 человека погибших и раненых на 1 миллион перевезённых.

Вертолёт Ми-8 учебно-научного центра «Вытегра» МЧС России пропал с экранов радаров в воскресенье 4 февраля 2024 года над Онежским озером в Карелии с тремя членами экипажа на борту.

Его обломки нашли в 11 км от берега в озере.

Этот Ми-8 был произведён в 2004 году и передан в МЧС России.

В сентябре 2023 года его перебазировали из Пулково в Карелию в аэропорт Пески.

Вертолёт имел полётное задание по маршруту Петрозаводск – Вытегра.

Там располагается Арктический спасательный учебно-научный центр «Вытегра». МЧС указало, что вертолёт проводил тренировочный полёт.

Упавший вертолёт – это самая массовая модификация среди многофункциональных версий вертолёта Ми-8МТВ-1.

Согласно расследованию, в неблагоприятных метеоусловиях произошло обледенение вертолёта, из-за этого заглохли двигатели, и он упал с большой высоты.

Обледенение воздушного судна (ВС) – это процесс возникновения ледяной корки на внешних и внутренних поверхностях различных частей ВС во время полёта в неблагоприятных метеоусловиях.



Рисунок 1 – Вертолёт Ми-8

Распределение числа авиапроисшествий вертолётов Ми-8 по месяцам года на основе статистических данных показывает, что максимум приходится на июль месяц, но ноябрь и декабрь показывают тоже достаточно высокий риск аварий и катастроф (табл. 2). Это связано с тем, что помимо неблагоприятных погодных условий и короткого светового дня сильное влияние на аварийность оказывают воздействие атмосферных условий, когда в переохлаждённых облачах, тумане и дожде происходит обледенение вертолёта.

Кроме обледенения существует опасность столкновения с птицами, а это влияет на безопасность авиаперевозок (рис. 2).

Таблица 2 – Распределение числа аварий и катастроф вертолётов по месяцам с 1994 по 2011 гг.

Месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число авиа-происшествий	9	6	14	7	8	6	21	10	9	7	15	13



**Рисунок 2 – Вертолёт Ми-8 после столкновения с птицами**

Обледенение ВС возникает при полёте в сложных метеоусловиях при низких температурах от 0 °C до -40 °C.

Иногда это явление возникает в облаках из-за водяных капель,

Основные части вертолёта, которые подвергаются обледенению:

1) винты: несущий и рулевой. Так как лопасти несущего и рулевого винтов во время полёта в неблагоприятных метеоусловиях подвергаются их негативному воздействию, результатом которого является интенсивное покрытие льдом;

2) воздухозаборники двигателей. Обледенению могут подвергаться и при положительных температурах наружного воздуха (приблизительно до +5 °C);

3) остекление фонарей кабины, приводящее к ухудшению управления ВС;

4) чувствительные элементы. Чувствительные элементы навигации и управления, подвергшиеся переохлаждению, затрудняют полёт ВС.

Противообледенительная система (ПОС) служит для защиты ВС от обледенения.

Она состоит из функционального оборудования обогрева лопастей несущего и хвостового винтов, оборудования обогрева лобовых стёкол кабины ВС, спойлеров воздухозаборников и входных устройств двигателя.

При полёте в зоне обледенения происходит ухудшение лётных качеств ВС из-за отложившейся наледи.

Кроме того, существенную роль играет температура поверхности ВС и окружающей атмосферы, высота и скорость ВС.

Обледенение вертолёта может произойти из-за:

- оседания снега и льда на поверхности вертолёта;
- появления капель дождя на поверхности ВС (рис. 3).



Рисунок 3 – Влага на поверхности ВС

Адиабатное расширение воздуха во входных устройствах двигателей также может вызвать их обледенение.

При «ледяном дожде» тоже может возникнуть обледенение.

Лёд может быть матовым или полупрозрачным (рис. 4), прозрачным и белым непрозрачным.



Рисунок 4 – Полупрозрачный лёд

При полёте в облаках смешанного типа образуется матовый или полупрозрачный лёд.

Прозрачный лёд (рис. 5) образуется во время полёта в облаках, состоящих только из переохлаждённых капель.

Он откладывается в основном на носовой части вертолёта, что приводит к ухудшению управления вертолётом.



Рисунок 5 – Образование прозрачного льда на вертолёте

Белый непрозрачный лёд (рис. 6) образуется во время полёта в облаках из мелких капель.



Рисунок 7 – Белый лёд

Такое обледенение увеличивает массу ВС, но не сильно искажает (в сторону ухудшения) его аэродинамику.

Различают несколько типов отложения льда:

1) профильное отложение, которое может повторять профиль части ВС, возникающее при полёте в облаках при температуре воздуха ниже минус двадцать градусов Цельсия;

2) желобковое отложение, когда разные части фюзеляжа имеют разную температуру: передняя – положительную, в то время как задняя – отрицательную;

3) хаотическое отложение, которое опаснее всех остальных.

Среди различных способов борьбы с обледенением по своему характеру они подразделяются на активные и пассивные.

Активный способ борьбы самый эффективный, он предусматривает применение ПОС.

Пассивный предусматривает выход из области обледенения.

Если полёт происходит в тёплое время года необходимо заходить в облака с плюсовой температурой, а в холодное время – в облака с минусовой температурой.

Если ВС не оборудовано ПОС, полёты запрещены.

Когда появляется лёд на лопастях вертолёта, меняются многие параметры полёта.

Из-за этого:

- возрастаёт вибрация;
- ухудшаются лётные характеристики;
- изменяется управление вертолётом.

Использование современных ПОС ограничено, и это влияет на условия использования ВС.

Опасность обледенения в полёте возникает при неравномерном сбрасывании с корпуса и лопастей винтов образовавшегося льда.

Для обеспечения безопасного полёта, в случае обледенения необходимо заранее включать электротепловую систему защиты лопастей винтов.

ПОС и обогрев стёкол кабины необходимо включать еще перед полётом.

Наибольшую опасность вызывает обледенение непосредственно самой силовой установки.

Максимальное количество наледи будет находиться на неподвижных частях, а минимальное – на подвижных.

Обледенение входной части двигателя (рис. 8) вызывает:

- изменение размеров и формы проточной части (рис. 9);
- изменение параметров воздуха на входе в компрессор (рис. 10);
- уменьшение расхода воздуха в компрессоре;
- увеличение вибраций двигателя.

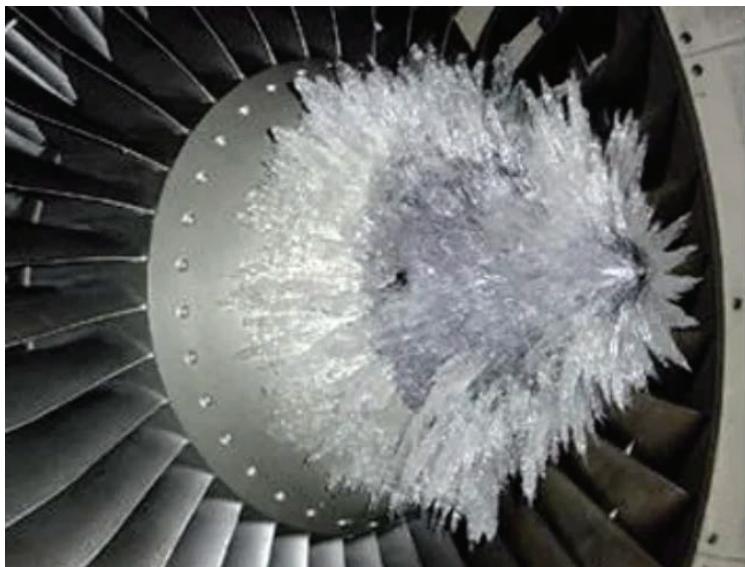


Рисунок 8 – Образование наледи на входе двигателя

Эти явления могут вызвать нарушение работы компрессора и даже выключение двигателя.

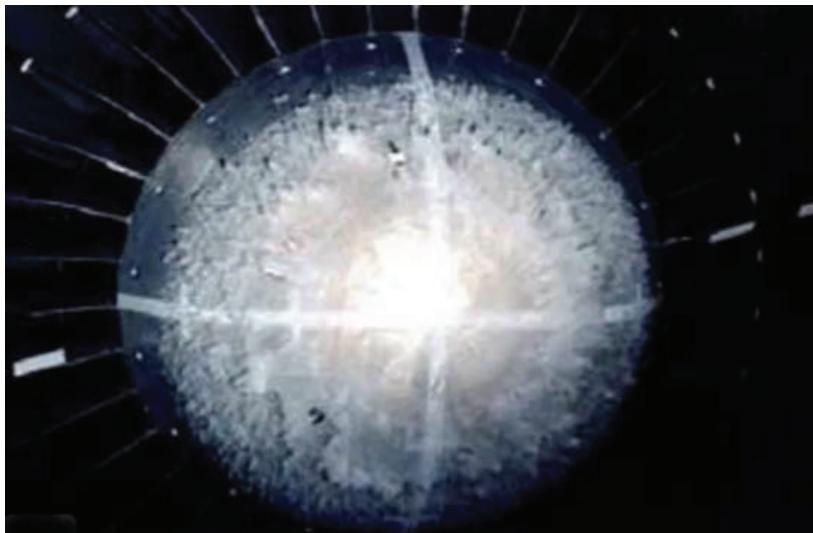


Рисунок 9 – Изменения в проточной части

Включение ПОС входного устройства двигателя вызывает увеличение энергозатрат электрической системы ВС, что уменьшает экономичность двигательной установки и вызывает увеличение расхода топлива. Летчик почувствует это по величине падения скорости ВС и снижении высоты полета.

Для снижения неблагоприятных изменений с точки зрения увеличения полетной массы ВС в следствие обледенения конструкции и удаления нежелательных наростов льда, которые нарушают аэродинамику движения воздуха че-

рез технологические отверстия и воздуховоды, разрабатываются соответствующие ПОС.

Для всех систем, которые используются на ВС предъявляются серьезные требования по весовым характеристикам, энергопотреблению и размерами агрегатов.

ПОС можно классифицировать по следующим характеристикам:

1) по видам работы:

- циклическое удаление ледяных наростов с внешних и внутренних поверхностей;

- устройства обогрева непрерывного действия с исключением образования ледяной корки.

2) по способам работы:

- покрытия, которые имеют возможность удалять лед с помощью механических приводов (пневматика, электрический импульс, ультразвук, гидрофобная поверхность);

- с помощью физико-химических процессов (электрическое тепло, обдув горячим воздухом, разбрызгивание специальных жидкостей).

Для авиационных двигателей, работающих в зимнее время или при прогнозируемых отрицательных температурах, ПОС включаются до выполнения полета.

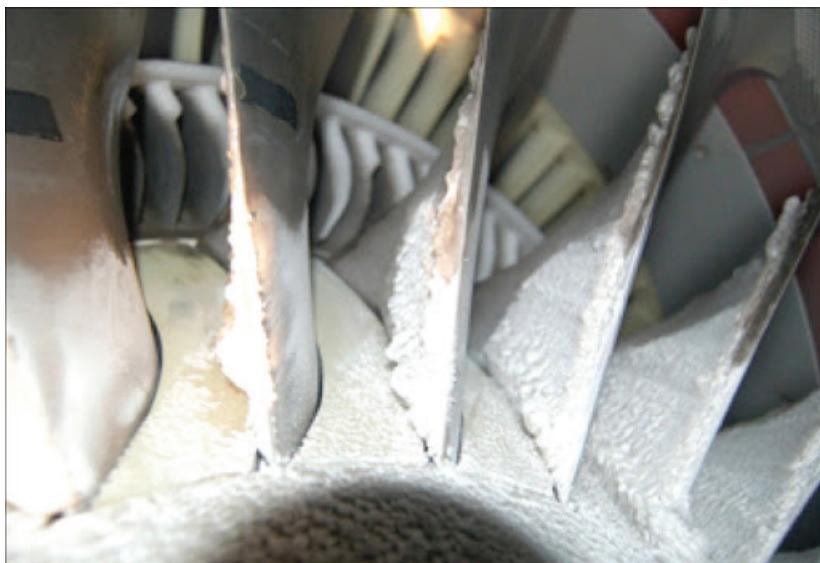


Рисунок 10 – Обледенение лопаток компрессора

Несвоевременное активирование ПОС или отказ системы может спровоцировать спонтанное скальвание кусков ледяных наростов с последующим попаданием в воздушный тракт двигательной установки ВС, что может спровоцировать нарушение работы и летное происшествие.

Возможное попадание крупных кусков льда может провоцировать разрушение направляющих лопаток и лопаток компрессора, помпаж двигателя и пол-

ное прекращение его работы.

Возможен отрыв кусков льда с вращающихся лопастей несущего винта с последующим разлетом во все стороны, что при посадке ВС на площадку может спровоцировать травмирование людей из аэродромных служб.

Степень обледенения вертолёта зависит от количества льда, образовавшегося на поверхности вертолёта и от длительности пребывания в условиях обледенения и интенсивности обледенения.

Обледенение в форме валика или отдельных затёков за зоной обогрева поверхности вертолёта называется барьерным льдом вертолёта (рис. 11).

В соответствии с инструкцией по эксплуатации ВС если воздухозаборники не имеют систему обогрева, или она неисправна, то выполнение полета в условиях возможного обледенения не допускается.

При возникновении внештатной ситуации входа ВС в зону возможного обледенения летчик в кратчайшее время должен задействовать ПОС и совершить маневр для вывода ВС в безопасную зону [5].

Чувствительный датчик ПОС часто срабатывает не совсем корректно, запаздывая по времени начала деструктивного процесса. Экипаж ВС в течение полета должен внимательно следить за возможными появлениеми признаков обледенения на видимой части фюзеляжа и остекления кабины.

Кроме того, нестабильная работа двигателей, проявляющаяся в самопропризвольном увеличении или уменьшении числа оборотов, возникновение вибрации, говорит о процессе образования обледенения лопастей несущего винта.

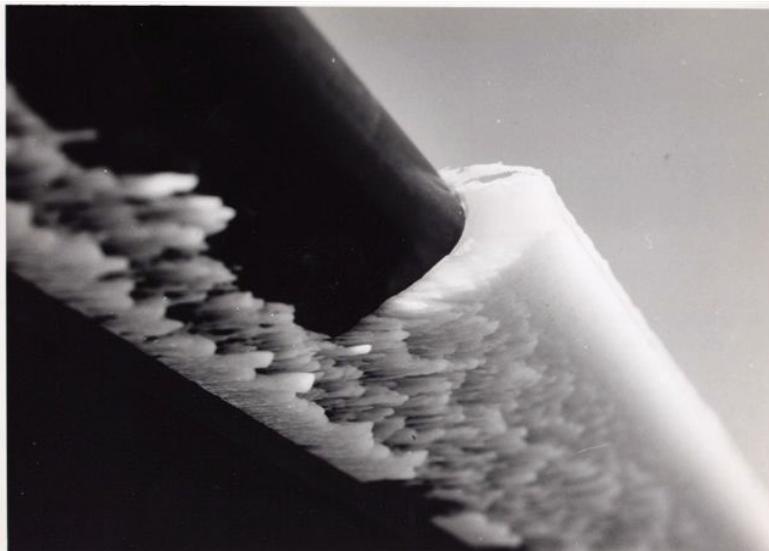


Рисунок 11 – Барьерный лёд

На вертолётах, ПОС которых имеют устройства очистки остекления (например, АС-2 на вертолетах семейства Ми-8), летчик должен контролировать скорость ВС, чтобы ее величина в горизонтальном полете не была больше 150 км/ч. Это ограничение продиктовано условиями эксплуатации щеток механического устройства.

Таким образом, в зависимости от географии района эксплуатации ВС (а тем более в зимний период полетов) необходимо проводить специальные мероприятия для адаптации механизмов для работы в экстремальных условиях.

В соответствии с техническим регламентом эксплуатации вертолета для полетов в зимних условиях необходимо провести специальную подготовку для повышения его надежности.

В двигателях вертолета применяются технические жидкости, которые в условиях зимней эксплуатации становятся более вязкими, что выводит технические параметры за допустимые пределы эксплуатационных свойств.

Наличие редукторов в трансмиссии несущего и рулевого винтов предъявляет повышенные требования для физических свойств технических жидкостей для исключения случаев нарушения безотказной работы при выполнении полетного задания в неблагоприятных метеоусловиях и при низких температурах зимнего периода эксплуатации ВС.

Низкие температуры окружающего воздуха могут отрицательно влиять на свойства соответствующих уплотнений сохранять герметичность гидросистемы двигателя. Возможны случаи нарушения надежной работы воздушной системы. Потеря герметичности может приводить к различным протечкам и другим соответствующим неисправностям, вызывающим снижение надежности работы систем вертолета [6].

В случае обильных атмосферных осадков в зимнее время аэродромные службы должны тщательно укрывать технику для исключения случаев попадания снега во внутренние полости механизмов вертолета.

Для этого необходимо всегда применять соответствующие защитные чехлы для фюзеляжа и лопастей несущего и рулевого винтов. При этом нужно тщательно следить за тем, чтобы защитные чехлы не примерзали к рабочим поверхностям винтов.

Неблагоприятные погодные условия требуют от обслуживающего персонала тщательно выполнять предписания инструкций и наставлений на каждом участке эксплуатации авиационной техники.

Для работы в условиях низких температур регламент выполнения работ предписывает внимательно следить за техническим состоянием механизмов и устройств и тщательно готовить ВС к выполнению полетного задания.

При полете ВС в облаках, особенно при низкой облачности обледенение может возникать в случае слабых отрицательных температур воздуха до  $-10^{\circ}\text{C}$  и ниже. Степень обледенения в таких неблагоприятных условиях может достигать значительной величины.

Атмосферная влага проникает во внутренние полости вертолета, в случае длительной стоянки на территории аэродрома под открытым небом. Сырая погода с обильными осадками усугубляет состояние авиационной техники и увеличивает риски отказов при работе на земле и в полете.

Возможна ситуация примораживания деталей управления ВС и двигателей, что затрудняет управление агрегатами вертолета.

В случае наличия льда в системе торможения, возможны отказы и заклинивания при рулении вертолета.

Указанные факторы, которые присутствуют при эксплуатации вертолета

в условиях пониженных температур и повышенной влажности воздуха, требуют от обслуживающего персонала повышенного внимания и тщательного выполнения предписаний и инструкций по эксплуатации авиационной техники в зимний период [7].

В соответствии с техническим регламентом, аэродромные службы должны иметь соответствующий инвентарь, который в условиях зимней эксплуатации вертолета дополняется подогревателями воздуха, которые необходимы для разогрева двигателей и соответствующих редукторов трансмиссии несущего винта (рис. 12).



Рисунок 12 – Обогреватели воздухозаборников двигателей

Эти части двигателя наиболее сильно подвергаются обледенению, и они обогреваются не воздухом, а электричеством, а уже за них поступает горячий воздух.

Винты обогреваются электрическим током, нагревательные секции проходят через каждую лопасть от начала до конца, на несущем винте четыре секции, на рулевом две в каждой лопасти (применительно к Ми-8). Это сделано для того, чтобы секции работали поочерёдно и не перегревались.

При эксплуатации авиационной техники в зимний период летчик в соответствии с инструкцией обязан обеспечить безаварийную эксплуатацию ПОС вертолета. Для этого необходимо проверить работоспособность следующих систем:

- 1) функционирование стеклоочистителя;
- 2) систему подачи противообледенительной жидкости;
- 3) работу электромагнитных кранов обогрева двигателей.

Выполнение полетного задания на семействе вертолетов типа Ми-8 раз-

решается инструкцией при температуре -6 °C и выше.

Летчик обязан включить ПОС при полете в светлое время суток непосредственно перед входом в зону возможного обледенения, а в темное время суток – сразу после взлета.

В сложных метеоусловиях при случайном попадании ВС в зону возможного обледенения с пониженной температурой атмосферы, летчик обязан в кратчайшее время вывести вертолет из этой зоны и в соответствии с инструкцией доложить руководителю полетов. В дальнейшем руководствоваться командами указанных лиц.

Стеклоочиститель вертолета активировать при возникновении дождя или снежного заряда.

Летчик должен в постоянном режиме визуально определять наличие образующегося льда на остеклении фюзеляжа, щетках стеклоочистителя и на деталях конструкции, которые находятся в зоне видимости.

Ухудшение видимости из кабины летчика является доказательством начала процесса обледенения фюзеляжа.

Обледенение несущего винта вертолета является серьезным признаком, который деструктивно влияет на аварийную ситуацию в полете. Для исключения подобного развития сценария возможного летного происшествия, используется система обогрева лопастей за счет электрического нагрева поверхностей лопастей несущего и управляющего винтов.

Лед, который накапливается на поверхности лопастей винта, растапливается за счет тепловой энергии, которая выделяется при прохождении электрического тока в нагревательных элементах лопастей. Этот электрический ток подается периодически с помощью командного устройства с целью экономии электроэнергии и предотвращения излишнего нагрева поверхности лопасти винтов.

Электронагревательная система лопастей винта вертолета потребляет около 3,9 Вт/см<sup>2</sup>, что повышает нагрузку на двигатели вертолета, увеличивают вес и повышают стоимость ВС.

В соответствии с разработанной тактикой удаления обледенения, лед на поверхностях лопастей винтов может нарастать до толщины не более 6,35 мм, после чего включаются нагревательные элементы. Лед превращается в воду и стекает с поверхности лопасти.

В результате лопасти винтов могут быть утяжелены наличием льда, что приводит к увеличению нагрузки на двигатели вертолета и может приводить в повышенной вибрации.

Также может возникать аэродинамические условия, при которых жидкая вода растопленного обледенения может перетекать по поверхности лопасти в зону, в которой отсутствуют нагревательные элементы. Это так называемая «корневая зона лопасти». В ней вода опять замерзает и таким образом утяжеляет лопасти несущего винта [8].

Эти проблемы вынуждают авиационных конструкторов разрабатывать малые вертолеты, которые массово используются в гражданской авиации без ПОС, что серьезно сокращает использование этих вертолетов применительно для сложных метеоусловий.

В передней части лопасти несущего винта ставят специальные накладки,

по которым пропускается электрический ток. Как правило, лопасти изготавливаются из стеклоткани, которую формируют в несколько слоев (рис. 13).

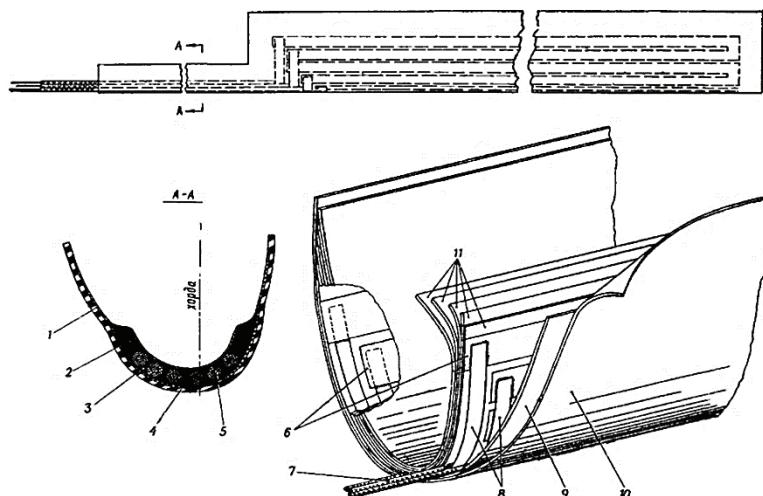


Рисунок 13 – Электронагревательная накладка в носке лопасти.

1, 2 – слои стеклоткани; 3 – резина; 10 – поверхностный слой резины; 5, 7 – силовые провода; 6 – нагревательный элемент; 8 – соединительные шины; 9 – наружный слой стеклоткани; 11 – внутренний слой стеклоткани

Лопасти рулевого винта имеют меньшую длину по сравнению с лопастями несущего винта.

Электронагревательные элементы рулевого винта также состоят из полосок нержавеющей стали. Используется до шести слоев стеклоткани, между которыми вклеиваются нагревательные элементы.

Вертолеты семейства Ми-8 имеют у несущего винта пять лопастей и трех лопастей рулевого винта. Соответственно специальным устройством, которое называется токосъемником, специальным образом включаются электронагревательные элементы на всех лопастях несущего и рулевого винтов.

Электронагревательные элементы располагаются вдоль всей длины лопасти несущего и рулевого винтов и перекрывают 12% хорды лопасти. Помимо всего лопасти подвергаются абразивному износу, что неблагоприятно влияет на срок работы лопасти. Для решения этой проблемы на поверхность лопасти наклеивается листовая резина.

Для обогрева передних стекол используются электрообогреватели плечевого типа, которые дополнительно предотвращают их от запотевания.

Воздухозаборники двигателей имеют систему обогрева. Кроме того, когда летчики включают ПОС, автоматически включается система обогрева воздухозаборников (рис. 14).

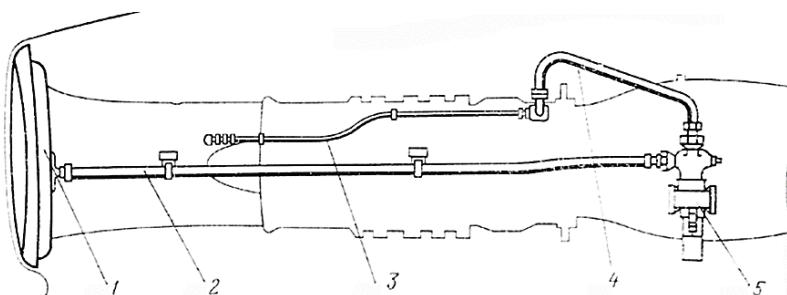


Рисунок 14 – Противообледенительное устройство воздухозаборника правого двигателя:  
1 – входное устройство воздухозаборника; 2, 3, 4 – воздухопровод;  
5 – воздушный клапан 525А

При полете вертолета в сложных метеоусловиях, когда существует вероятность начала процесса обледенения ВС, используется система детектирования обледенения РИО-3. У нее имеется датчик, который выдает сигнал о начале процесса обледенения вертолета.

Имеется возможность автоматического включения ПОС вертолета при его нахождении в опасной зоне возможного обледенения.

Сигнализатор РИО-3 устанавливается на вертолетах семейства Ми-8 в воздухозаборнике правого двигателя (рис. 15).

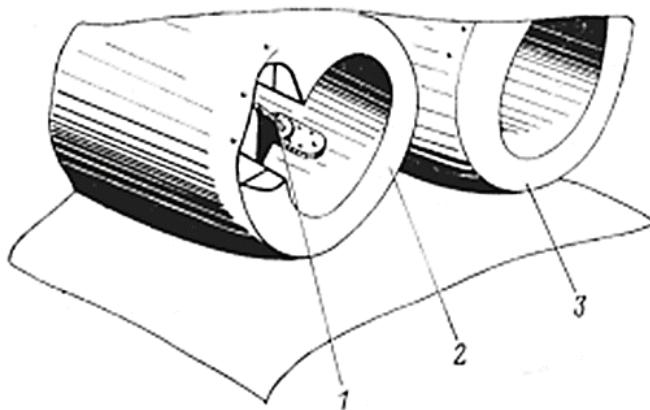


Рисунок 15 – Установка системы детектирования обледенения РИО-3:  
1 – детектор обледенения РИО-3; 2, 3 – правый и левый воздухозаборники

Все сигнализаторы, которые имеют радиоактивные элементы работают по принципу ослабления потока электронов бета излучения, который излучает радиоактивный изотоп, применяемый в данном случае.

В качестве радиоактивного изотопа применяется изотоп стронция.

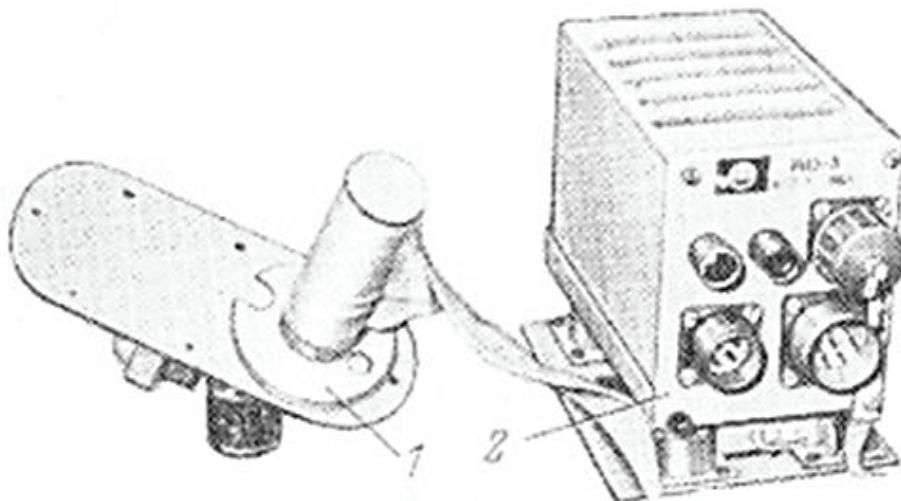


Рисунок 16 – Система детектирования обледенения РИО-3:  
1 – датчик сигнализатора; 2 – блок обработки сигнала

При обледенении слой льда нарастает в том числе и на штыре датчика и тем самым ослабляет поток электронов, попадающий на датчик, а электронный блок анализирует изменяющийся электронный поток и выдает командный сигнал на включение ПОС.

Детектор системы РИО-3 состоит из корпуса датчика 6, радиоактивного изотопа 1 и газоразрядный счетчик Гейгера 7 (рис. 17).

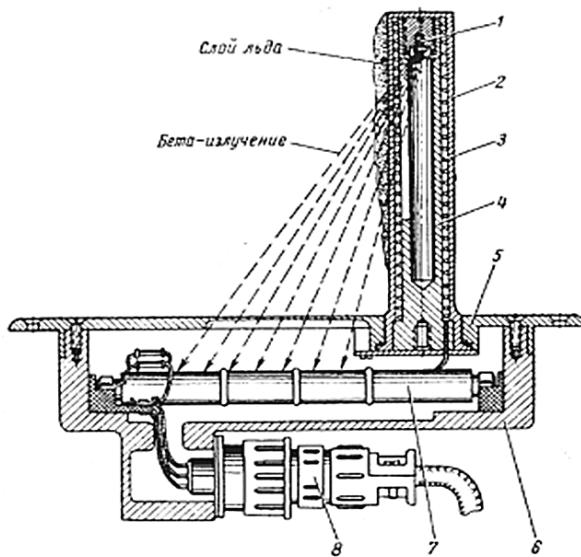


Рисунок 17 – Датчик детектора РИО-3:  
1 – радиоактивный изотоп типа БИ-4А; 2 – корпус измерительного штыря;  
3 – элемент обогрева детектора; 4 – толкатель; 5 – корпус счетчика;  
6 – корпус датчика; 7 – газоразрядный счётчик СТГ-5; 8 – электроразъём

Главными параметрами системы РИО-3 являются зависимость потока бетта-излучения от толщины льда, который намораживается на корпусе, в котором размещен радиоактивный изотоп (стронций 90). Поток электронов проходит через слой льда и интенсивность его уменьшается, что фиксируется детектором системы, который работает по принципу счетчика Гейгера.

Командный сигнал выдается на включение ПОС при толщине льда  $0,3 + 0,2$  мм.

График работы ПОС системы приведён на рисунке 18. Работа системы имеет периодический характер с промежутками включения и выключения обогрева с учетом дополнительного времени включения равным 5 секунд с дополнительным временем  $+ 3$  секунды (это время получено из эксперимента, и оно требуется для полного сброса льда с детектора [11]).

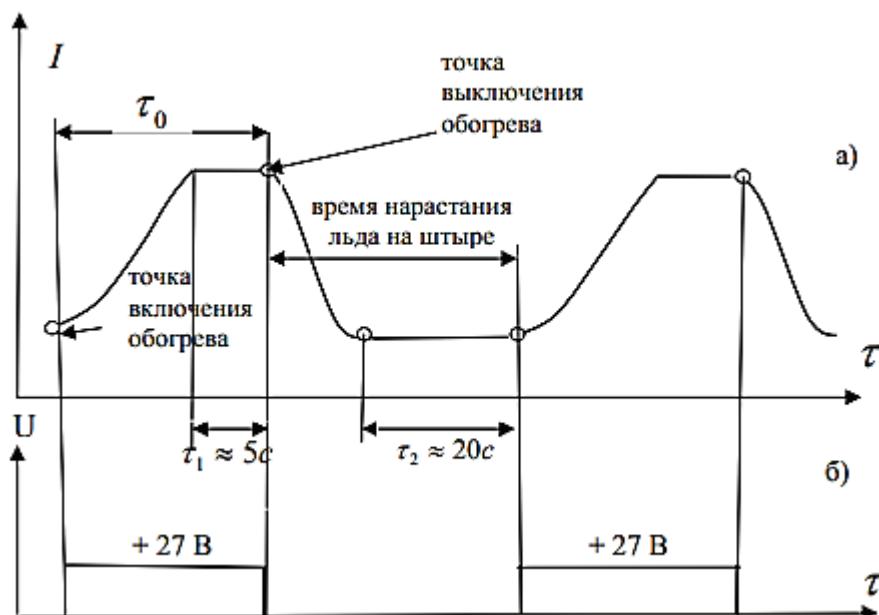


Рисунок 18 – График величины потока бетта-частиц, попадающих на детектор излучения СТС-5 а) и форма выходного сигнала с блока РИО б)

Антиобледенительная система, связанная с обогревом поверхностей фюзеляжа и лопастей несущего и рулевого винтов, имеет существенный недостаток в том, что электрообогрев требует затраты электроэнергии ВС, которая всегда имеется в ограниченном количестве и устройства в виде нагревательных элементов имеют вес, который тоже является лимитирующим параметром.

Поэтому возможен другой принцип избавления от намерзшего льда с помощью импульсных систем, которые создают колебания оболочки ВС различной частоты.

Создание колеблющейся поверхности можно достичь с помощью пневматических, ультразвуковых пьезоэлектрических и резонансных систем.

Практика показала, что применение в пневматических системах забора воздуха от двигателя возможно при использовании, например, для обогрева воздухозаборников, т.е. в непосредственной близости от источника горячего воздуха. Применение же на более удаленных устройствах с использованием трубопроводов снижает эффективность и вызывает увеличение веса системы.

Электроимпульсное антиобледенение никогда не применялось к лопастям несущего винта вертолета из-за большого объема приведения в действие, соображений усталостных напряжений и связанных с ними проблем реализации в конечном пространстве Д-лонжерона [12].

Применение пьезоэлектрических систем позволяет избежать указанных выше недостатков. Создание ультразвуковой волны на поверхности подверженной обледенению не требует больших затрат электрической энергии и в этом плане может быть эффективным выходом для скальвания поверхностного льда.

За счет генерирования ультразвуковых волн на границе лопасти несущего винта вертолета возникают поперечные сдвиговые напряжения, которые провоцируют отрыв ледяной корки от поверхности лопасти.

В случае резонанса колебаний поверхности лопасти и генератора ультразвуковых колебаний происходит интенсивное растрескивание поверхностного льда.

Для выбора ультразвукового привода, способного мгновенно расслаивать аккреционный лёд, важно не только обеспечить согласование импеданса между приводом и источником усилителя, но и обеспечить граничные напряжения сдвига, превышающие прочность сцепления аккреционного льда. Существует два различных типа межфазных сдвиговых напряжений, создаваемых на основной структуре при приведении в действие пьезоэлектрический материал: поперечные сдвиговые напряжения (ответственны за процессы расслоения льда между слоями) и продольные сдвиговые напряжения (способствуют растрескиванию льда) [12].

Для формирования поперечных сдвиговых напряжений используются дисковые ультразвуковые приводы PZT-4 [12].

Данный привод был выбран потому, что в ультразвуковом радиальном режиме (входная мощность 60 Вт, частота 28,5 кГц) он обеспечивал необходимые по значению поперечные сдвиговые напряжения на границе раздела слоя льда толщиной 2,5 мм. На рисунке 19 представлена схема передней кромки винта вертолёта с закреплёнными дисковыми приводами PZT-4. Прогнозируемые ультразвуковые частоты, наиболее подходящие для создания поперечных сдвиговых напряжений, способных мгновенно деактивировать лёд, будут такими, которые обеспечивают минимальные значения импеданса. Именно на этих частотах (28,5 и 30,5 кГц) поперечное напряжение сдвига ледяной поверхности максимизируется при заданном входном напряжении [12].

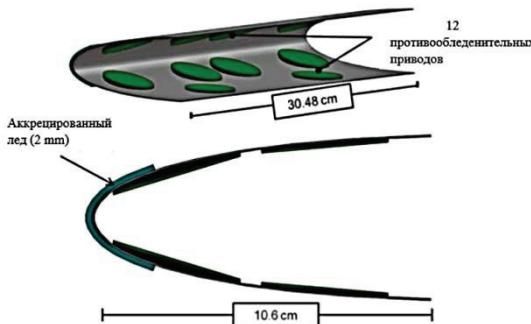


Рисунок 19 – Лопасть вертолёта с закреплёнными ультразвуковыми приводами PZT-4

Чтобы способствовать расслаиванию льда на данных частотах, потребуется увеличение входного напряжения (500 В для частоты 23 кГц и 375 В для частоты 33,5 кГц). Несмотря на то, что входное напряжение, необходимое для формирования поперечных напряжений, способных расслаивать лед, увеличится, соответствующая мощность, для анти - резонансного режима, уменьшится.

Резонансные ультразвуковые частоты (28,5 и 30,5 кГц) выбраны в качестве основных частот для работы с прогнозируемыми значениями поперечных сдвиговых напряжений на границе раздела лёд/сталь.

Таким образом, при обеспечении всех вышеперечисленных условий можно добиться мгновенного расслоения между льдом и поверхностью винта вертолёта при помощи ультразвукового возбуждения в виде поперечных сдвиговых напряжений. Данную систему можно применять как на габаритных вертолётах, так и на малогабаритных. Это объясняется небольшой входной мощностью, необходимой для мгновенного расслоения тонких слоёв льда ( $0,37 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ). Это значение мощности на 90% меньше по сравнению с системами современных электротермических противообледенительных систем [12].

Устранение обледенения ВС в полёте в условиях низких температур является сложной задачей, требующей сочетания различных методов и устройств [10]. Создание таких устройств должно сопровождаться анализом возможных рисков изменения характеристик работы отдельных частей и узлов вертолёта при образовании ледяного покрытия разной толщины. Например, для лопастей винтов применяют нагревательные элементы, подключенные к генератору переменного (импульсного) тока, а для стёкол кабины летчиков плёночные нагревательные элементы с источником постоянного тока. Для воздухозаборников и деталей двигателя применяется воздушно-тепловой способ обогрева горячим воздухом от компрессора.

Перспективным также является применение ультразвука для разрушения ледяного слоя и предотвращения его образования на поверхности лопастей и за крылков. Оптимизация описанных способов позволит повысить эффективность борьбы с таким опасным явлением, как обледенение вертолёта.

*Литература*

1. Авиационные правила. Ч. 27. Нормы лётной годности винтокрылых летательных аппаратов нормальной категории. МАК: ОАО «Авиаиздат», 2000. 108 с.
2. Авиационные правила. Ч. 29. Нормы лётной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории. МАК: ОАО «Авиаиздат», 2003. 136 с.
3. Астапенко П.Д., Баранов А.М., Шварев И.М. Авиационная метеорология. М.: Транспорт, 1985. 262 с.
4. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. Л.: изд. 2-е. Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
5. Володко А.М. Основы лётной эксплуатации вертолётов (динамика полёта). М.: Транспорт, 1986. 262 с.
6. Руководство по лётной эксплуатации вертолёта Ка-32А11ВС. Фирма «Камов». Изд. 1. декабрь 2001. 2001.
7. Качалкин П.Ю., Кузнецов И.Е., Романов Г.Я. Методика расчёта обледенения несущих поверхностей вертолёта. Воронеж: Вестник Воронежского военно-го института. № 1(6). 2007. С. 301-308.
8. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). М.: изд. Росгидромет, 1995. 160 с.
9. Руководство по технической эксплуатации вертолёта Ми-8МТВ-1. Изд. № 2/РТЭ-2009-ГА.
10. Gent R.W., Dart N.P., Candsdale J.T. Aircraft Icing // Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences. 2000. Vol. 358. Pp. 102-103.
11. Техническое обслуживание противообледенительного оборудования вертолёта Ми-8: Метод. указания к практ. работе / Н.Н. Игонин, С.Н. Тиц // Самар. гос. аэрокосм.ун-т. Самара. 2006. 52 с.
12. Ташлинцев Д.А., Попов А.А. Ультразвуковая противообледенительная система вертолета // Журнал «Трибуна ученого» Вып. 09/2022. С. 33-41.

УДК 621.454.2

## Повышение эффективности жидкостного ракетного двигателя малой тяги

**Игорь Иванович Ковалев**, кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационных технологий и управляющих систем,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,  
**Эльшан Магеррамович Аббасов**, кандидат технических наук, доцент,  
кафедра «Электротехника и электрооборудование»,  
Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ), г. Москва

*Проанализированы режимы работы, которые характерны для жидкостного ракетного двигателя малой тяги, а также компоненты топлива для исследуемого двигателя; на основании технических требований к работе топливной системы проведен выбор системы подачи топлива и полезной нагрузки; определен оптимальный коэффициент избытка окислителя для обеспечения максимальной эффективности летательного аппарата.*

Двухкомпонентное топливо, камера сгорания, полезная нагрузка, вывод на орбиту.

### Improving the efficiency of a low-thrust liquid rocket engine

**Igor Ivanovich Kovalev**, PhD in Engineering, Associate Professor,  
Department of Information Technology and Control Systems,  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,  
**Elshan Magerramovich Abbasov**, PhD in Engineering, Associate Professor,  
Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment,  
Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow

*The operating modes that are typical for a low-thrust liquid rocket engine, as well as the fuel components for the engine under study, were analyzed; based on the technical requirements for the operation of the fuel system, the fuel supply system and payload were selected; the optimal oxidizer excess ratio was determined to ensure maximum efficiency of the aircraft.*

Two-component fuel, combustion chamber, payload, orbital insertion.

#### Введение

Жидкостной ракетный двигатель малой тяги (ЖРДМТ) характеризуется низким уровнем тяги от несколько десятых долей Ньютона до 1600 Ньютон [9,

С.2] при непрерывном режиме работы. К ЖРМДТ предъявляются требования работы не только в непрерывном, но и в импульсном режиме работы.

Актуален выбор системы подачи топлива и полезной нагрузки, а также орбиты. В результате выбора рассчитывается вес и размер полезной нагрузки, а также размер и мощность ракеты, необходимой для вывода ее на орбиту или к месту назначения; а также определяется скорость и высота, которые космический корабль должен достичь, чтобы выполнить свою миссию, и оптимальный коэффициент избытка окислителя в камере двигателя.

### Результаты исследования

#### Выбор системы подачи топлива

В космических исследованиях в области двигателестроения и наземной инфраструктуры, обеспечивающей старт носителя с полезным грузом, широко применяются методы машинного обучения [1, С.123], автоматического управления [2, С.70], анализа данных [3, С.77], полунатурного моделирования [4, С.68].

Двигатели космического корабля относятся к активной системе управления положением летательного аппарата. Ракетный двигатель размещается в нижней части космического корабля, где камера сгорания является сердцем ракетного двигателя. Выхлопные газы с высокой скоростью и температурой проходят этапы сгорания и расширения через сопло подходящей смеси топлива и окислителя.

На рисунке 1 показано физическое понимание принципов действия и противодействия в ракетном двигателе.

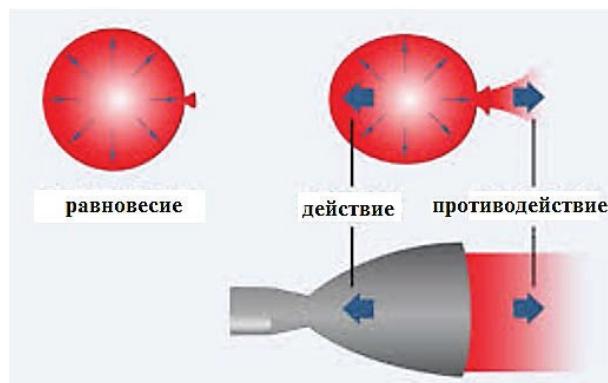


Рисунок 1 – Иллюстрация принципов действия и противодействия  
в ракетном двигателе

В ракетном двигателе источник кислорода называется окислителем. Окислитель и топливо смешиваются и сжигают камеру сгорания. Газы с высокой температурой и давлением, образующиеся в результате сгорания, пропускаются через сопло с очень высокой скоростью. Это создает толчок вверх. Эти процессы представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Процессы в ракетных двигателях

Ракетная двигательная установка работает по принципу тяги, создаваемой высокоскоростной струей, силами гравитации и сопротивления. Процесс появления силы тяги изображен на рисунке 3.

Число Маха в горловине, характеризующее поток горячего выхлопа, равно 1; массовый расход зависит от площади горловины. Соотношение площадей от горловины к выходу  $A_e$  задает скорость  $V_e$  на выходе и давление на выходе  $p_e$ .

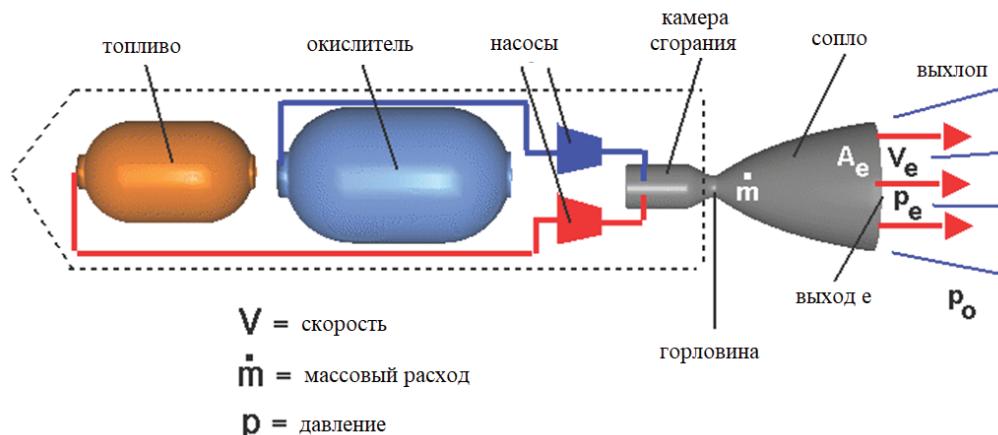


Рисунок 3 – Иллюстрация принципа тяги в ракетной установке

Давление на выходе равно давлению набегающего потока только при некоторых расчетных условиях. Поэтому мы должны использовать более длинную версию обобщенного уравнения тяги для описания тяги системы. Если давление набегающего потока определяется как  $p_0$ , уравнение тяги (толкания Thrust  $F_{\text{тяги}}$ ) для жидкостных и для твердотопливных ракетных двигателей принимает вид

$$F_{\text{тяги}} = \dot{m} \cdot V_e + (p_e - p_0) \cdot A_e. \quad (1)$$

Следует принять во внимание, что в уравнении тяги нет выражения «масса набегающего потока, умноженного на скорость набегающего потока», так как на борт не попадает внешний воздух.

В передней части ЖРД расположены коллекторы топлива и окислителя и форсунки, а в кормовой части находится сверхзвуковое сопло. Неотъемлемой частью основной камеры является рубашка охлаждающей жидкости, через которую жидкое топливо (обычно топливо) циркулирует со скоростью, достаточно высокой, чтобы двигатель мог работать непрерывно без чрезмерного повышения температуры в камере. Рабочее давление двигателя обычно находится в пределах  $1000 \div 10\,000$  килопаскалей ( $10 \div 100$  атмосфер). Топливо подается в коллектор форсунок под несколько более высоким давлением, обычно с помощью турбонасосов большой производительности (один для топлива, другой для окислителя). Снаружи жидкостный двигатель часто выглядит как лабиринт трубопроводов, который соединяет баки с насосами, проводит поток охлаждающей жидкости к рубашкам охлаждения и от них, а также подает перекачиваемые жидкости к инжектору. Кроме того, двигатели обычно устанавливаются на подвесах, чтобы их можно было поворачивать на несколько градусов для управления направлением тяги, а между двигателем (или двигателями) и конструкцией транспортного средства подключаются соответствующие исполнительные механизмы для ограничения и вращения двигателя. Тяга создается в соответствии с третьим законом движения Ньютона.

К ЖРДМТ предъявляются требования к срабатыванию до нескольких сотен тысяч раз [9, С.18]. Компоненты топлива: азотный тетраоксид (АТ); несимметричный диметилгидразин (НДМГ) [8, С.13].

Конструкция ЖРДМТ представлена на рисунке 4. Вихревой генератор обеспечивает сильное и быстрое смешивание жидкости и окислителя. ЖРДМТ состоит из турбонасоса наддува, камеры сгорания и форсунки.



Рисунок 4 – Экспериментальный образец жидкостного ракетного двигателя малой тяги

В разрезе на рисунке 5 можно увидеть множество насадок для быстрого перемешивания.

На рисунке 6 а представлено схематично устройство ЖРД, а на рисунке 6 б – цикл камеры сгорания ЖРД [8, С.12].



Рисунок 5 – Разрез камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя

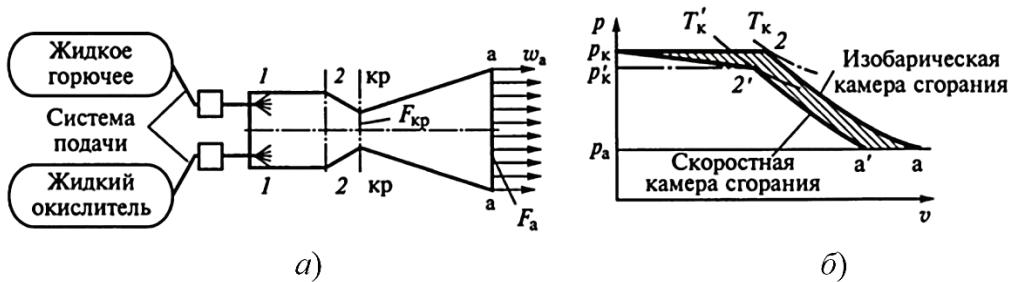


Рисунок 6 – Схема и цикл жидкостного ракетного двигателя

На рисунке 7 приведена схема, на которой показаны области рационального использования различных систем подачи топлива [8, С.109]. В двигателе с окислительным ЖГГ газифицируется весь окислитель, подаваемый в камеру. Коэффициент избытка окислителя в газогенераторе  $\alpha_{\text{тг.ок}}$  находится обычно в пределах 10...15. При выборе топлива для жидкостного ракетного двигателя необходимо учитывать несколько ключевых факторов [5, С.10;7, С.45].

Величина удельного импульса характеризует меру преобразования массы топлива в кинетическую энергию, эту величину важно учитывать. Более высокий удельный импульс означает, что ракета сможет развивать более высокие скорости или нести большую полезную нагрузку. Плотность топлива влияет на общий размер и вес ракеты.

Более плотное топливо позволит использовать ракету меньшего размера, но также может затруднить обращение с ней и ее транспортировку.

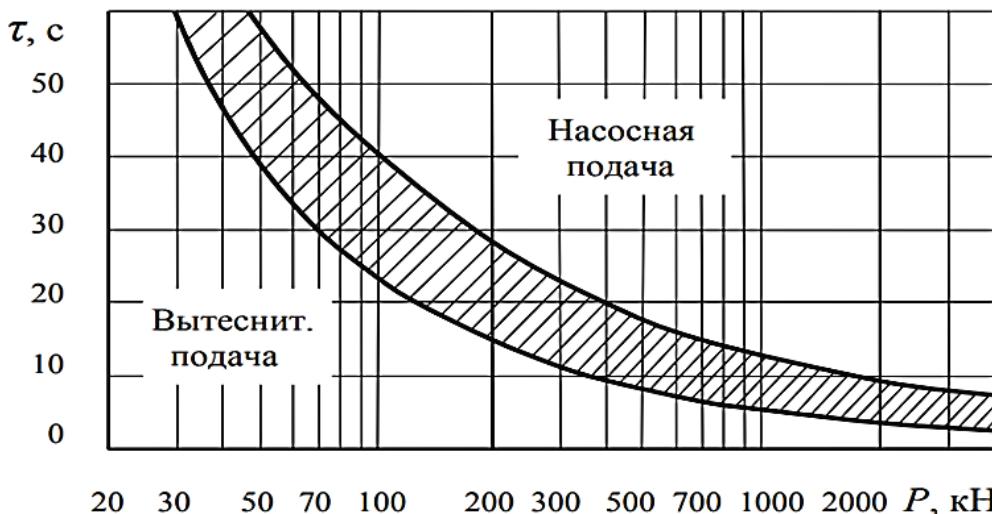


Рисунок 7 – Насосная подача и вытеснительная подача и области их использования

Температура сгорания – температура, при которой сгорает топливо, влияет на характеристики двигателя и материалы, используемые в конструкции двигателя. Топливо с высокой температурой сгорания может обеспечить лучшую

производительность, но также может потребовать более дорогих материалов.

Следует учитывать те обстоятельства, что стоимость топлива повлияет на общую стоимость ракеты и должна рассматриваться в связи с другими факторами.

Для ЖРМДТ обычно используется штатная пара – азотный тетроксид (АТ) и несимметричный диметилгидразин (НДМГ). В таблице 1 указаны параметры для работы такой топливной системы.

**Таблица 1 – Эксплуатационные параметры  
жидкостного ракетного двигателя малой тяги**

Параметры	Требования к параметрам
степень фильтрации компонентов топлива, поступающих к двигателям, мкм	≤ 40
соотношение компонентов топлива (пропорция плотности)	2,6
тяга двигателя $R$ , [кН]	800
отклонение тяги двигателя, [%]:	не более $-1\dots+1$
удельный импульс $I$ , [с]	290

Эти эксплуатационные параметры необходимо учитывать в расчетах.

### **Выбор полезной нагрузки для жидкостного ракетного двигателя малой тяги**

Вес и размер полезной нагрузки определяют размер и мощность ракеты. На размер ракеты и требования к мощности также оказывают влияние высота и тип орбиты. Например, низкая околоземная орбита требует меньше энергии, чем геостационарная.

Расположение стартовой площадки также может влиять на тип используемой ракеты, поскольку некоторые ракеты нельзя запускать из определенных мест.

При выборе ракеты-носителя следует учитывать чувствительность полезной нагрузки, поскольку некоторые ракеты-носители могут обеспечить более плавный или более контролируемый полет, чем другие. Следует также учитывать график запуска, так как у некоторых провайдеров запуска может быть больше времени, чем у других. Учитывать требования миссии к полезной нагрузке, такие как продолжительность миссии и требуемый уровень точности для орбиты полезной нагрузки.

В конечном итоге выбор полезной нагрузки, которая будет доставляться на орбиту с помощью жидкостного ракетного двигателя, будет зависеть от конкретных требований миссии и тактико-технических характеристик ракеты и средств ее запуска. Важно учитывать все вышеперечисленные факторы, чтобы обеспечить успешный запуск и доставку полезной нагрузки.

### **Выбор орбиты для ЖРД**

Выбор орбиты для жидкостного ракетного двигателя зависит от требований миссии и задач космического корабля. Выбор орбиты будет определять скорость и высоту, которые космический корабль должен достичь, чтобы выполнить свою миссию.

Некоторые распространенные типы орбит включают в себя:

Низкая околоземная орбита (НОО) обычно используется для спутниковой связи, наблюдения Земли и научных исследований. Высота составляет от 160 до 2000 километров (от 100 до 1200 миль) над поверхностью Земли.

Геостационарная орбита (GEO) используется для спутников связи и наблюдения за погодой. Высота составляет примерно 36 000 километров (22 000 миль) над поверхностью Земли.

Полярная орбита: эта орбита используется для наблюдения за Землей и дистанционного зондирования, а также для научных исследований. Спутник проходит над полюсами Земли и с течением времени покрывает всю поверхность.

Лунная орбита используется для лунных миссий, включая посадку на Луну и проведение научных исследований.

Как только тип орбиты определен, необходимо рассчитать скорость, необходимую для достижения желаемой высоты и поддержания орбиты. Эта скорость достигается за счет использования жидкостного ракетного двигателя.

Перечислим факторы, которые необходимо учитывать при выборе орбиты для жидкостного ракетного двигателя: размер и вес космического корабля, цели миссии, а также возможности стартовой площадки и ракеты-носителя. Ракетный двигатель должен быть спроектирован таким образом, чтобы обеспечить необходимую тягу и управляемость для достижения и поддержания желаемой орбиты. Топливная и топливная системы также должны быть спроектированы так, чтобы обеспечить необходимую энергию и эффективность для миссии.

### Оптимальный коэффициент избытка окислителя

Массовое соотношение компонентов  $m$  и  $K$  и связанный с этим соотношением коэффициент избытка окислителя  $\alpha_{\text{ок}}$  в камере сгорания должен быть выбран таким образом, чтобы обеспечить максимальную эффективность работы двигателя ракеты [9, С.128].

Максимальная эффективность будет достигаться при минимуме целевой функции

$$F = -I_{\text{упид}} \cdot \rho_T^c. \quad (2)$$

где  $\rho$

Для двигателей второй и верхних ступеней коэффициент избытка окислителя  $C$  определяется [9, С.329]

$$C = \frac{\frac{m_{k2}}{m_k}}{\ln \mu_k} = \frac{m_{k2}}{m_k} \cdot \frac{1}{\ln \mu_k}. \quad (3)$$

При выполнении проектных расчетов в первом приближении можно принять  $\frac{m_{k2}}{m_k} = 0,2..0,4$ . Если в задании на проектирование массовое число ракеты не указано, следует принять следующие значения:

- для первых ступеней ракет  $\mu_k = 2,0 \dots 2,6$ ;
- верхних ступеней  $\mu_k = 3,0 \dots 5,0$ .

Тогда найдем коэффициент  $C$

$$C = 0,2 \cdot \frac{1}{\ln 3} = 0,2 \cdot 0,9 = 0,18.$$

С помощью программы Астра заданы давление в камере и компоненты топлива, вычислены значения температуры при разных коэффициентах избытка окислителя в промежутке от 0,6 до 2,6 для ядра (по рекомендациям из источника [8, С.12]) и для пристеночного слоя в промежутке от 0,05 до 0,6. Результаты занесены в таблицу 2.

Коэффициент избытка окислителя задаётся самостоятельно, температура и газовая постоянная рассчитывается с помощью многоцелевого программного комплекса Астра, подпрограмма TDK [10].

**Таблица 2 – Определение коэффициента избытка окислителя в камере**

Коэффициент избытка окислителя $\alpha$	Температура $T$ , К	Газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)	Удельный импульс $I$ , м/с	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$F$
0.6	3303	403	2999	1117	-10610
0.8	3154	390	3009	1130	-10666
1	3243	378	3004	1142	-10669
1.2	3338	360	2974	1164	-10599
1.4	3356	353	2953	1174	-10540
1.6	3362	347	2930	1183	-10474
1.8	3359	341	2903	1192	-10391
2.0	3349	337	2882	1200	-10328
2.2	3319	328	2831	1214	-10166
2.4	3300	325	2809	1221	-10100
2.6	3295	324	2797	1227	-9940

Удельный импульс определяется

$$I = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma-1} RT \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}. \quad (4)$$

Плотность смеси топлива находится следующим образом

$$\rho_T = \frac{1 + \alpha_{OK} K_m^0}{\frac{1}{\rho_g} + \frac{\alpha_{OK} K_m^0}{\rho_{OK}}}, \quad (5)$$

где  $K_m^0 = 3,07$  – стехиометрическое соотношение для данной топливной пары.

Вывод рассчитанных данных показан на рисунке 8.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ  
ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

**Горючее:**

-N( .2.0000) H( .0000) O( .0000) C( .2.0000)	828.0000
-энталпия, кДж/кг	
-плотность, кг/м <sup>3</sup>	790.0000

**Окислитель:**

-N( .2.0000) O( .0000) O( .4.0000 ) C( .0000)	
-энталпия, кДж/кг	-207.0000
-плотность, кг/м <sup>3</sup>	1440.0000

Давление в камере, МПа

Температура замораживания, К

Снижение энталпии топлива, кДж/кг

1. Коэффициент избытка окислителя .70000  
Молярное соотношение компонентов 1.40000  
Массовое соотношение компонентов 2.14340  
Объемное соотношение компонентов 1.17589  
Плотность, кг/м<sup>3</sup> 1141.27179

Таблица 1.

ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И РАВНОВЕСНЫЙ СОСТАВ (объемные доли)

Сечениe	Входное	Критическое	
T, K	3302.2	3076.8	1038.4
H	.01162	.01162	.00000
O	.00153	.00071	.00000
Oz	.00167	.00082	.00000
H2	.11694	.11660	.19228
OH	.01866	.01184	.00000
HOx	.00001	.00000	.00000
H2O	.33108	.34107	.27791
Nz	.27753	.28067	.28571
NO	.00353	.00195	.00000
CO	.17198	.16945	.08743
COz	.06077	.06525	.15066
P, МПа	6.00000	3.42349	.00800
М, кг/моль	21.98674	22.17094	22.49105
1, кДж/кг	122.26441	-551.62841	-4902.14841
2, кДж/(кгK)	11.52176	11.52176	11.52176
3, кДж/(кгK)	.37817	.37503	.36969
4, м <sup>3</sup> /кг	.20813	.33705	47.98739
5, м/с		1741.912	
6, м/с		1160.9	3170.0
IV, з...м/с			1757.19
IV, п...м/с			3291.07
Kx-c		1.164	1.217
Ky,c-c			1.222
dmix/dkpx			7.2210
M			4.628
п, Н*м/с	.8962D-04	.8552D-04	.4056D-04
/, Вз/ (м <sup>3</sup> К)	.3222D+00	.3032D+00	.1321D+00
Ср, кДж/(кг/К)	.3837D+01	.3326D+01	.1924D+01

Рисунок 8 – Фрагмент расчета в компьютерной среде Астра

Значения плотностей горючего и окислителя [8, С.67]:

$$\rho_g = 785 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{ok} = 1450 \text{ кг/м}^3$$

По таблице определяется минимум функции  $F = -10669$ . Найденная величина соответствует коэффициенту избытка окислителя  $\alpha = 1$ .

Аналогично следует рассчитать коэффициент избытка окислителя в пристеночном слое камеры сгорания. В таблицу 3 сведены результаты расчета коэффициентов избытка окислителя.

По данным, приведенным в таблице 3, следует определить минимум функции, это  $F = -9798$ , но температура слишком высокая, поэтому берётся большее значение во избежание прогара стенок. Параметр  $F = -9107$  соответствует коэффициенту избытка окислителя  $\alpha = 0.4$ .

**Таблица 3 – Расчет коэффициентов избытка окислителя в пристеночном слое камеры двигателя**

Коэффициент избытка окислителя $\alpha$	Температура $T, \text{К}$	Газовая постоянная $R$	Удельный импульс $I, \text{м/с}$	Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$F$
0.05	1008	625	2151	453	-6476
0.1	1193	622	2337	493	-7136
0.15	1264	602	2366	529	-7320
0.2	1414	579	2455	563	-7678
0.25	1632	567	2610	595	-8244
0.3	1633	547	2564	625	-8170
0.35	1942	514	2710	652	-8704
0.4	2222	485	2816	678	-9107
0.45	2471	460	2892	702	-9412
0.5	2687	438	2943	724	-9632
0.55	2870	420	2978	746	-9798

При анализе данных таблицы 3 следует учитывать потери. Коэффициент удельного импульса  $\varphi_I$  состоит из

$$\varphi_I = \varphi_k \varphi_c \varphi_{\text{тепл.}} \quad (6)$$

Коэффициент камеры  $\varphi_k$  находится в диапазоне от 0,95 до 0,99. Коэффициент сопла  $\varphi_c$  находится в диапазоне 0,95 до 0,99 [8, С.81].

### Выводы

Проанализирована конструкция жидкостного ракетного двигателя малой тяги и требования к режимам его работы. Определены параметры работы двигателя с учетом максимальной эффективности его работы. Учтены потери камеры, сопла, теплового сопротивления. Для расчетов использовался отечественный программный комплекс Астра. С помощью программы Астра заданы давление в камере и компоненты топлива, вычислены значения температуры при разных коэффициентах избытка окислителя. Найдены оптимальные значения коэффициентов избытка окислителя.

### Литература

1. Аббасова Т.С., Ярыжко И.С. Применение больших данных и аналитики в космической науке / В сборнике: Русский космизм: история и современность. Место и роль науки и технологий в решении глобальных проблем современности. Сборник трудов по материалам VIII Всероссийской научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 122-131 (314 с.).
2. Artyushenko V.M., Abbasova T.S. Increasing the efficiency of satellite communication systems by optimizing the parameters of the ground stations // Radioengineering. 2015. № 2. С. 69-75.
3. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С., Кучеров Б.А. Повышение эффективности систем спутниковой связи путем оптимизации параметров земных станций // Радиотехника. 2015. № 2. С. 76-82.

4. Воловач В.И., Артощенко В.М., Аббасова Т.С. Синтез алгоритмов нелинейной обработки информационных параметров сигнала при воздействии узкополосных помех с негауссовским характером распределения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 3. С. 65-72.
5. ГОСТ 8.586.3-2005. Межгосударственный стандарт. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
6. ГОСТ 17655-89. Государственный стандарт Союза ССР. Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения.
7. ГОСТ 10227-2013. Межгосударственный стандарт. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия.
8. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005. 495 с.
9. Мелькумов Т.М., Мелик-Пашаев Н.И., Чистяков П.Г., Шиуков А.Г. Ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1976. 400 с.
10. Беседы о ракетных двигателях. Тепловой расчет камеры [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rocketengines.ru/rocket-engines-studying/practice/chamber-computation/lesson-four.html> (дата обращения 14.11.2024).

УДК 669.1

## Исследование структуры и свойств азотированных гранул из жаропрочного сплава на основе молибдена

**Василина Владимировна Круткова**, ассистент кафедры

«Техники и технологии»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

**Иван Александрович Логачев**, кандидат технических наук, ведущий инженер,  
ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», г. Москва

*Работа посвящена разработке технологии для создания молибденовых сплавов с дисперсно-упрочнённой структурой, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками при повышенных температурах. Разработаны режимы плазменного центробежного распыления (ПЦР) для получения гранул из сплава на основе молибдена. Описан процесс горячего изостатического азотирования сплавов на основе молибдена, а также разработаны оптимальные режимы для азотирования полученных гранул. Были проведены исследования, направленные на изучение морфологических характеристик, внутренней структуры, фазового и элементного составов этих гранул.*

Сплавы на основе молибдена, жаропрочные сплавы, плазменное центробежное распыление, горячее изостатическое прессование.

## Investigation of structure and properties of nitrided pellets from molybdenum-based heat-resistant alloys

**Vasilina Vladimirovna Krutikova**, assistant of the Department  
of Engineering and Technology,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,  
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

**Ivan Aleksandrovich Logachev**, Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer,  
National University of Science and Technology «MISIS», Moscow

*The work is devoted to the development of technology for the creation of molybdenum alloys with a disperse-strengthened structure with high performance characteristics at elevated temperatures. The modes of Plasma Rotating Electrode Process (PREF) for obtaining molybdenum-based alloy pellets have been developed. The process of hot isostatic nitriding of molybdenum-based alloys is described, and optimal modes for nitriding of the obtained pellets are developed. Studies were carried out to investigate the morphological characteristics, internal structure, phase and elemental compositions of these pellets.*

Molybdenum-based alloys, heat-resistant alloys, plasma centrifugal sputtering, hot isostatic pressing.

С повышением требований к эксплуатационным характеристикам авиационной и ракетно-космической техники возрастает необходимость в материалах, способных выдерживать высокие температуры. Молибденовые сплавы занимают одно из ведущих мест среди таких материалов благодаря своим уникальным свойствам: высокая температура плавления ( $T_{пл} = 2625^{\circ}\text{C}$ ); относительно невысокая плотность ( $\rho(\text{Mo}) \sim 10,2 \text{ г/см}^3$ ); высокое значение модуля упругости ( $E(\text{Mo}) = 336,3 \text{ ГПа}$ ); малый коэффициент терморасширения ( $\alpha = 5,6 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) и высокая термостойкость. Также эти сплавы демонстрируют значительную удельную прочность вплоть до температуры  $1370^{\circ}\text{C}$ , заметно опережая лучшие серийные сплавы на основе никеля. Молибден позволяет создавать сварные соединения с хорошим соотношением прочности и пластичности, что невозможно добиться с использованием вольфрамовых сплавов. Исключительные прочностные характеристики молибденовых сплавов позволяют использовать их для создания деталей и конструкций, которые могут долго выдерживать нагрузки при повышенных температурах ( $1500\text{-}1700^{\circ}\text{C}$ ) и кратковременно работать (до 5 минут) в экстремальных условиях высокотемпературных газообразных сред ( $2300\text{-}2500^{\circ}\text{C}$ ). Данные свойства значительно превосходят возможности жаропрочных никелевых сплавов, чей предел рабочих температур ограничен  $1100^{\circ}\text{C}$  [16].

Высокая жаропрочность молибденовых сплавов определяется степенью легирования, особенностями взаимодействия легирующих компонентов с матрицей сплава и технологическими методами их обработки. Оценивая потенциал влияния легирующих элементов на жаропрочность молибденового сплава, стоит сосредоточиться на элементах IV-V групп периодической системы (цирконий, гафний, tantal, титан). Данные элементы могут образовывать твердые растворы в сплавах молибдена, улучшая их механические свойства при высоких температурах. Однако важно учитывать, что введение легирующих элементов также может влиять на другие свойства, такие как пластичность, свариваемость и коррозионная стойкость, поэтому при выборе легирующих элементов необходимо учитывать конкретные требования к сплаву. Большая часть жаропрочных молибденовых сплавов относится к группе малолегированных, это связано с тем, что введение большого количества легирующих элементов IV-V групп, кроме вольфрама и рения приводит к заметному росту хрупкости и резкому снижению деформируемости молибдена [1-2, 6-12, 15-18].

Дополнительное увеличение жаропрочности молибденовых сплавов связано с использованием дисперсного упрочнения посредством карбидов и нитридов легирующих элементов [16-18]. Среди упрочняющих фаз наибольшую эффективность демонстрирует дисперсная нитридная фаза, отличающаяся высокой термодинамической стабильностью по сравнению с карбидной фазой и отсутствием химического взаимодействия с матрицей сплава. Это позволяет прогнозировать значительное повышение жаропрочных свойств молибденовых сплавов [4, 5, 8, 10].

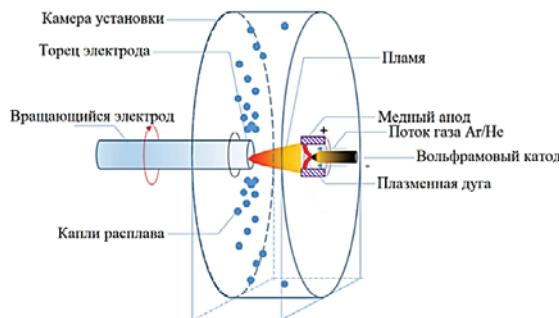
Среди современных подходов к созданию дисперсно-упрочнённых структур на основе нитридов одним из наиболее эффективных является азотирование в газовой среде. Этот метод обеспечивает простоту управления составом среды, быстрый нагрев

до необходимой температуры и возможность полной механизации и автоматизации процесса химико-термической обработки. Особенностью молибдена является низкая диффузионная подвижность в нем азота, что значительно усложняет процесс образования нитридов. На сегодняшний день для процессов азотирования аммиак служит основой, поскольку при определенных параметрах скорость азотирования в нем оказывается выше, чем в чистом азоте. Тем не менее, из-за поглощения водорода изделия, прошедшие азотирование в аммиачной среде, демонстрируют заметно большую хрупкость по сравнению с теми, что были обработаны в азоте [6, 14]. Помимо прочего, нельзя обойти вниманием экологические риски, связанные с применением аммиака, включая неблагоприятные условия труда для работников и повышенную вероятность пожаров и взрывов. Эти факторы делают процесс азотирования в среде чистого азота более предпочтительным.

Отсутствие сплошного нитридного слоя приводит к формированию структуры сплава, состоящей из зоны внутреннего азотирования и основы. Зона азотирования включает мелкие частицы нитридов легирующих элементов, равномерно распределенные в чистом основном металле. Это обеспечивает повышенную твердость и износостойкость материала, одновременно сохраняя его пластичность благодаря сохранению свойств основной металлической матрицы.

Основная трудность азотирования заключается в невозможности обеспечить однородное распределение нитридных частиц по всему объему изделия. Перспективный подход к решению этой проблемы предлагаю методы гранульной металлургии, в частности, технология получения гранул путем плазменного распыления вращающегося электрода под действием центробежных сил (ПЦР) с последующим компактированием в формообразующей оснастке методом горячего изостатического прессования (ГИП) в газостате.

Распыление расплава производится с торца быстровращающейся цилиндрической заготовки. Нагрев осуществляется посредством электрической дуги, плазмы или электронного луча. Плавка и последующее распыление металла объединены в одном непрерывном процессе. Расплавленный металл на торце заготовки под воздействием центробежных сил сдвигается к внешней кромке, создавая по её периметру жидкий слой, который удерживается благодаря силам поверхностного натяжения. По мере увеличения объема расплава, центробежные силы начинают преобладать над силой поверхностного натяжения, что вызывает распыление металла. Общая схема процесса ПЦР представлена на рисунке 1 [20].



**Рисунок 1 – Общая схема процесса плазменного центробежного распыления быстровращающейся заготовки**

Методика ПЦР позволяет производить гранулы сферической формы в различных диапазонах размеров частиц. Каждая гранула рассматривается как отдельный микрослиток, характеризующийся заданным составом, ультрадисперсной структурой, высокой химической однородностью, минимальным содержанием газовых включений и отличными технологическими свойствами. Этот метод открывает широкие возможности для оптимизации производственных процессов, позволяя создавать материалы с заданными физико-механическими характеристиками [9, 3].

Для исследования в данной работе выбран сплав на основе молибдена с повышенным содержанием гафния (Hf). Добавление гафния увеличивает устойчивость молибдена к высоким температурам, способствует повышению пластичности, а также улучшает обрабатываемость молибдена [15]. Химический состав исследуемого сплава представлен в таблице 1.

**Таблица 1 – Химический состав исследуемого сплава**

Состав	C, %	O, %	Hf, %	Zr, %	W, %	Ta, %
1	0,01-0,05	≤0,003	1,3	0,2	0,3	0,5

Исходным материалом для получения гранул из молибденового сплава служили цилиндрические заготовки (электроды) диаметром 55 мм и длиной 650 мм. Электроды изготавливались методом вакуумной электронно-лучевой плавки с последующей электродуговой плавкой с расходуемым электродом в медном кристаллизаторе. Затем полученные слитки подвергались экструзии при температуре 1600 °C, формируя цилиндрические заготовки диаметром 55 мм. Заключительным этапом изготовления заготовок являлся вакуумный отжиг при 900 °C в течение одного часа [17].

Для получения гранул разработаны 6 экспериментальных режимов распыления электродов. Разработка режимов проводилась путем варьирования основных параметров установки в следующих диапазонах: скорость вращения электрода изменялась от 15 000 об/мин до 25 000 об/мин, сила тока дуги плазматрона регулировалась в пределах от 1500 А до 2000 А, а напряжение на дуге плазматрона составляло от 50 В до 90 В [7].

После изготовления гранулы рассеивали методом ситового анализа для отделения основной фракции с размерами частиц от 40 до 150 мкм. Ситовой анализ показал, что доля нежелательной фракции (частицы меньше 40 мкм и больше 150 мкм) составляет примерно 20%, тогда как целевая фракция (размер частиц 40-150 мкм) свыше 80% от общего веса полученных гранул. Мелкая фракция способствует уменьшению размеров зерен, дополнительно снижая пластичность молибденовых сплавов, изначально характеризующихся ограниченной пластичностью. Избыточное количество мелких частиц (менее 40 мкм) отрицательно влияет на технологические свойства материала, что может привести к неравномерному распределению гранул внутри капсул для ГИП. Крупные частицы (свыше 150 мкм) также ухудшают технологические свойства гранул и снижают эффективность азотирования для исследуемого сплава.

Гранулометрический состав гранул подтверждали с помощью лазерного анализатора ANALYSETTE 22 MicroTec plus фирмы Fritsch GmbH (Германия). Измерения гранулометрического состава показали, что гранулы из молибденово-

го сплава обладают полидисперсной структурой, характеризуются узким распределением по размерам, с пиком в диапазоне фракций от 50 до 75 мкм, причем наибольший размер гранул составляет 150 мкм, а наименьший – 25 мкм. Средний массовый диаметр гранул равен 73,7 мкм (рис. 2).

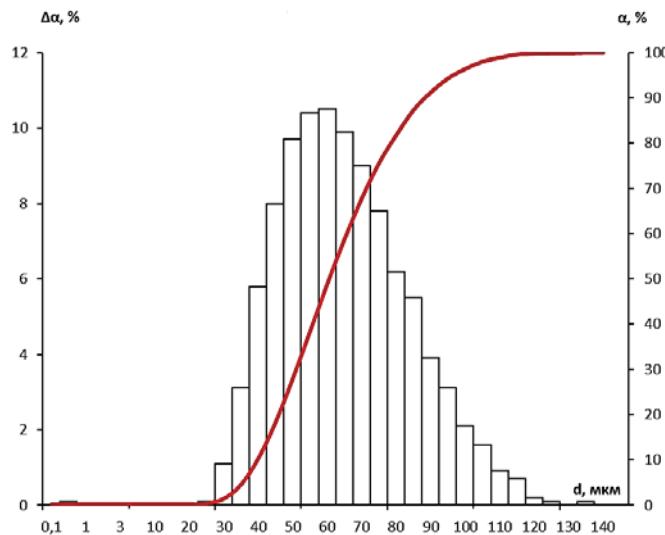


Рисунок 2 – Дифференциальные и интегральные кривые гранулометрического состава гранул

Определение технологических параметров полученных гранул проводились в соответствии с ГОСТ 20899-98 (метод определения текучести с помощью калибровочной воронки (прибор Холла)) и ГОСТ 19440-94 (метод определения насыпной плотности при стандартизованных условиях с помощью воронки).

Показатель текучести гранул фракционного состава (40-150) мкм, согласно измерениям, составил 12,7 секунды, тогда как значение насыпной плотности составило 6,9 г/см<sup>3</sup>.

Поскольку азотирование молибдена в чистом азоте при атмосферном давлении не приводит к образованию нитридов при температурах до 2500 °C, процесс горячего изостатического насыщения гранул из сплава на основе молибдена проводили в среде азота в установке горячего изостатического прессования ABRA HIRP10/26-200-200 (Швеция), которая позволяет проводить процесс при высоких температурах (до 2000 °C) и давлении (до 207 МПа). Азотирование гранул проводилось при различных коммерческих режимах, в которых варьировали основные параметры процесса: давление, температура, время выдержки.

Для проведения процесса азотирования спроектирована специальная пористая оснастка, позволяющая рабочему газу (азоту) эффективно поступать к гранулам и предотвращая их унос из-за скачков давления в газостате, возникающих при подаче и сбросе газа. В качестве материала для оснастки выбран титановый сплав ВТ6. При выборе материала для технологической оснастки учитывались такие критерии, как высокая прочность, обеспечивающая устойчивость к пиковым нагрузкам в условиях баротермической обработки на протяжении про-

должительного периода времени, а также низкая химическая активность материала оснастки с исследуемым материалом.

После получения азотированных гранул выполнены исследования их морфологии, структуры, а также элементного и фазового состава. Анализ морфологии и микроструктуры проводился на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) модели Kyky SEM-69, оснащенном приставкой для энергодисперсионного элементного микроанализа (ЭДС) от компании Bruker Quantax EDS. Изображение формировали по силе тока обратнорассеянных и вторичных электронов. Исследования микроструктуры образцов проводились методом оптической микроскопии (ОМ) при увеличениях до 1000 крат на металлографическом микроскопе отраженного света Axio Vert.A1 с комплексом программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел ThixometPro. Элементный и фазовый состав определяли методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре Empyrean («PANalytical B.V.»). Расшифровка полученных дифрактограмм осуществлялась с помощью программы сбора данных Data Collector и специализированной компьютерной программы HighScore Plus для фазового анализа со встроенной базой справочных стандартов PAN-ICSD (InorganicCrystalStructureDatabase). Изображения гранул, снятые в режиме вторичных электронов с использованием СЭМ, отражают морфологию поверхности исследуемого материала. Морфология гранул после процессов ПЦР и азотирования представлена на рисунке 3 при увеличении 200<sup>х</sup>.

Исходя из представленных результатов, видно, что морфология азотированных гранул (рис. 3б) аналогична исходной (рис. 3а): гранулы сохраняют сферическую форму, а на их поверхности отсутствуют крупные сателлиты.

Исследования методом ОМ не обнаружено структурных изменений и дополнительных фазовых выделений в объеме азотированных гранул. Структура гранул характеризуется отсутствием внутренних дефектов, таких как газовые поры и трещины. Она состоит из молибденовых зерен, размер которых колеблется в пределах от 3 до 20 мкм, с хорошо различимыми границами между ними. Легирующие компоненты в структуре не наблюдаются из-за их крайне малого размера, что требует применения методов микроскопии с высоким разрешением для их идентификации.

На рисунке 4 представлена карта распределения азота в объеме гранулы.

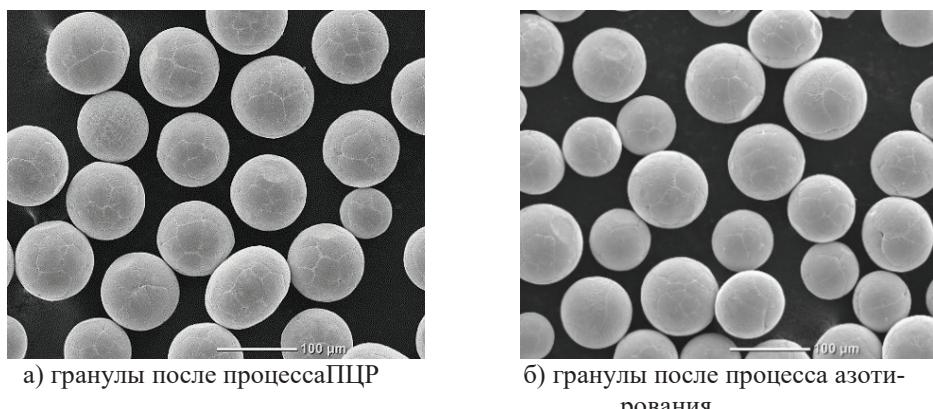


Рисунок 3 – Морфология полученных гранул

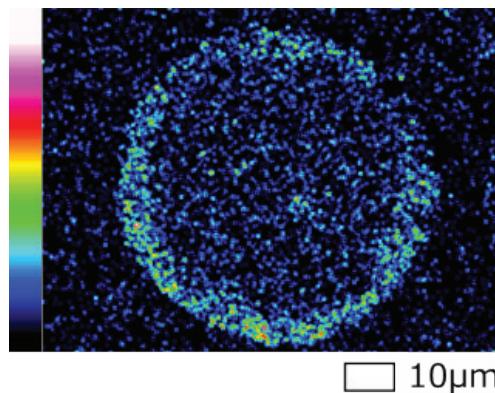


Рисунок 4 – Карта распределения азота в объеме гранулы

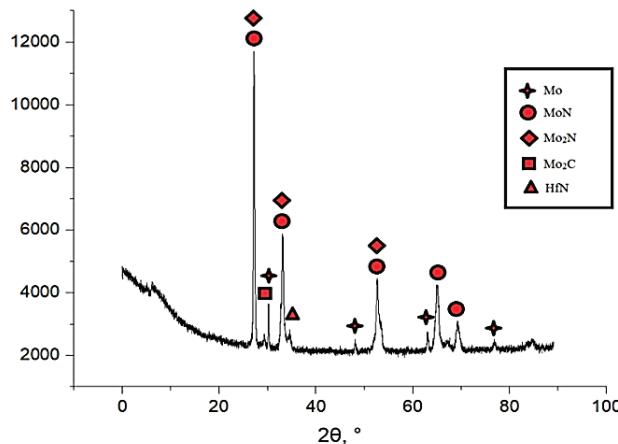
Анализ результатов показал формирование азотированного слоя на поверхности гранул и равномерное распределение легирующих элементов во всем объеме гранул. Диффузионный слой происходит в глубь гранул, толщина азотированного слоя достигает от 10 до 30 мкм. Результаты определения химического состава показали, что в гранулах не содержатся посторонние примеси, а количественный анализ легирующих элементов соответствует исходным данным. В таблице 2 представлены результаты МРСА анализа, показывающие повышенную концентрацию азота и легирующего элемента в структуре азотированных гранул, что подтверждает формирование нитридной фазы.

Таблица 2 – Результаты МРСА анализа азотированных гранул

Об- ласть МРСА	N	Zr	Mo	Hf	Ta	W	Итого
1	7,39	0,65	89,34	5,34	0,82	0,46	100,00
Об- ласть МРСА	N	Zr	Mo	Hf	Ta	W	Итого
2	6,07	0,54	90,99	4,36	0,79	0,25	100,00
3	5,82	0,48	91,14	5,33	0,90	0,33	100,00
4	6,32	0,52	90,69	4,41	0,80	0,26	100,00
5	6,44	0,63	90,03	3,66	0,82	0,43	100,00
6	5,50	0,60	90,90	4,50	1,06	0,45	100,00

Результаты фазовой идентификации образцов с содержанием фаз, определенным методом Ритвельда, показали наличие пиков характерных нитридным фазам Mo, MoN, Mo<sub>2</sub>N, Mo<sub>2</sub>C, а также фазам нитридов легирующего элемента HfN. Дифрактограмма гранул после процесса азотирования представлена на рисунке 5. В свою очередь для исследований нитридных фаз, их размеров и формы необходимо провести дополнительные исследования методом просвечивающей

электронной микроскопии.



**Рисунок 5 – Дифрактограмма азотированных гранул**

Выяснено, что разработанная методика получения гранул из молибденового сплава гарантирует получение более 80% целевой фракции с размерами частиц от 40 до 150 мкм. Гранулы исследуемого состава имеют сферическую форму частиц с минимальным содержанием внешних и внутренних дефектов, на поверхности гранул имеется азотированный слой. В гранулах имеются нитридные фазы легирующих элементов. Химический состав азотированных гранул соответствует исходному материалу.

Следующий этап исследования предполагает работы по разработке режимов компактирования азотированных гранул методом ГИП. Полученные образцы будут исследоваться на предмет химического и фазового состава. Механические испытания с целью определения прочностных характеристик будут проводиться при температуре 20 °C и выше 1000 °C.

#### Литература

- Батиенков Р.В., Больщакова А.Н., Ефимочкин И.Ю. Проблема высокотемпературной пластичности // Труды ВИАМ. 2016. № 3. С. 12-17.
- Больщакова А.Н., Ефимочкин И.Ю., Дмитриева В.В., Бурковская Н.П. Дисперсионноупрочненные композиционные материалы на основе молибдена (обзор) // Новости материаловедения. Наука и техника. 2018. № 3. С. 15-24.
- Гиршов В.Л., Котов С.А., Цеменко В.Н. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие // СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. 2010. 385 с.
- Гольдштейн М.И., Гринь А.В., Блюм Э.Э. и др. Упрочнение конструкционных сплавов нитридами. М.: Металлургия, 1970. 222 с.
- Григорович В.К., Шефталь Е.Н. Дисперсионное упрочнение тугоплавких металлов. М.: Наука. 1980. 304 с.
- Кипарисов С.С., Левинский Ю.В. Азотирование тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1972. 160 с.

7. Крутикова В.В., Басков Ф.А., Авдеенко Е.Н., Логачев И.А., Логачёва А.И. Технология получения азотированных гранул из сплава на основе молибдена // Издательский центр Южно-Уральского государственного университета. 2024. 587 с.
8. Коган Я.Д., Лахтин Ю.М., Шашков Д.П. Влияние азотирования на жаро-прочность и температурный порог хрупкости молибденовых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 1968. № 9. С. 20-26.
9. Копецкий Ч.В. Структура и свойства тугоплавких металлов// Москва: Изд-во «Металлургия». 1974. 208 с.
10. Лахтин Ю.М. Высокотемпературное азотирование // Металловедение и термическая обработка металлов. 1991. № 2. С. 25-29.
11. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Влияние азотирования на свойства молибдена // Металловедение и термическая обработка металлов. 1968. № 1. С. 24.
12. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение. 1980. 493 с.
13. Лахтин Ю.М. Перспективы развития процесса азотирования // Металловедение и термическая обработка металлов. 1980. № 7. С. 39-45.
14. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов // Москва: Изд-во «Металлургия». 1985. 256 с.
15. Моргунова Н.Н., Клыпин Б.А., Бояршинов В.А., Тараканов Л.А., Манегин Ю.В. Сплавы молибдена // М.: Металлургия. 1975. 392 с.
16. Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. Тугоплавкие сплавы для новой техники // Труды ВИАМ. 2016. № 10. С. 55-64.
17. Прохоров Д.В., Карпов М.И., Внуков В.И., Гнесин Б.А., Гнесин И.Б., Желтяткова И.С., Строганова Т.С., Логачева А.И., Логачев И.А., Гусаков М.С., Григорович К.В. Жаропрочный сплав на основе молибдена. Патент РФ на изобретение № 2774718; заявлено 16.12.2021; опубликовано 22.06.2022. 7 с.
18. Семененко В.Е., Пилипенко Н.Н. Дисперсионное упрочнение сплавов Mo-Zr-C // Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 1.С. 205-210.
19. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. Киев: Наукова думка, 1975. 315 с.
20. YangLiu, ShujinLiang, ZhiyuHan, JiamingSong, QingxiangWang. Anovelmodelofcalculatingparticle sizes in plasma rotating electrode process for superalloys // Powder Technology. 2018. № 336. P. 406-414.

УДК 621.794

## **Основные факторы влияния внешней среды на усталостную прочность металлических материалов**

**Максим Леонидович Скрябин**, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Общетехнических дисциплин»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Вятский государственный агротехнологический университет, г. Киров, Кировская область

*В современном машиностроении задача повышения надежности деталей механизмов и машин, работающих при циклических, динамических повторно-переменных нагрузках является одной из приоритетных. Процесс усталостного разрушения металлов и сплавов является одним из наиболее опасных и сложно предсказуемых повреждающих процессов. Быстрый рост усталостной трещины часто приводит к аварийному выходу из строя деталей машин и механизмов. Особенно опасными процессы усталостного и коррозионно-усталостного разрушения становятся в случае эксплуатации изделий, аварийное разрушение которых может привести к техногенной катастрофе или сопровождаться человеческими жертвами. Именно поэтому изучение факторов влияния внешней среды на усталостную прочность металлических материалов является одной из приоритетных задач современного машиностроения. В работе проведен анализ основных факторов, влияющих на появление усталостных микротрещин деталей машин и механизмов.*

Усталостная прочность, микротрещины, дефекты строения твердого тела.

## **The main factors influencing the external environment fatigue strength of metal materials**

**Maxim Leonidovich Scriabin**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of General Technical Disciplines,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vyatka State

Agrotechnological University, Kirov, Kirov region

*The process of fatigue failure of metals and alloys is one of the most dangerous and difficult to predict damaging processes. The rapid growth of a fatigue crack often leads to emergency failure of machine parts and mechanisms. The processes of fatigue and corrosion-fatigue destruction become especially dangerous in the case of operation of products, the emergency destruction of which can lead to a man-made disaster or be accompanied by human casualties. That is why the study of the factors influencing the external environment on the fatigue strength of metal materials is one of the priority tasks of modern mechanical engineering. The work analyzes the main factors influencing the appearance of fatigue cracks in machine parts and mechanisms.*

Fatigue strength, microcracks, structural defects of solids.

Процесс усталостного разрушения металлов и сплавов является одним из наиболее опасных и сложно предсказуемых повреждающих процессов. Быстрый рост усталостной трещины часто приводит к аварийному выходу из строя деталей машин и механизмов, работающих при циклической, динамической, повторно-переменной нагрузке. Особенно опасными процессы усталостного и коррозионно-усталостного разрушения становятся в случае эксплуатации изделий, аварийное разрушение которых может привести к техногенной катастрофе или сопровождаться человеческими жертвами. Причина возникновения усталости металлов заключается в локальном перенапряжении, однако до сих пор не может считаться окончательно выясненной. Кроме того, ни одна из существующих схем механизма усталости не может объяснить всех явлений, имеющих место при переменном циклическом нагружении образцов различных сплавов, особенно в коррозионной среде [13, С.31].

Большой интерес для выяснения механизма усталостного разрушения и влияния на него среды может иметь определение момента образования усталостной трещины и наблюдение за ее развитием до критического состояния образца. Фиксирование начальных стадий разрушения образцов весьма сложно, а современные методы выявления трещин еще не позволяют спрогнозировать начальный момент зарождения микротрещины.

Наряду с другими факторами, влияющими на появление усталостных трещин, интересно действие частоты изменения напряжений на усталостное разрушение металла. Известно, что процесс появления усталости металла сопровождается сложными явлениями упрочнения и отдыха, а также явлениями перераспределения напряжений между отдельными зернами металла, происходящими при повторной деформации. Упрочнение происходит под влиянием микропластических деформаций, вызывающих появление в отдельных зернах внутренних поверхностей раздела с искажением кристаллической решетки и изменением характера связей атомов [4, С.125].

Процесс разупрочнения – вторичный процесс; он противоположен процессу упрочнения и ведет к исчезновению внутренних поверхностей раздела и искажения кристаллической решетки, а также к смыканию раскрывшихся ультрамикротрещин у поверхности зерен. Поверхностно-активные вещества, проникая в устья микротрещин, облегчают процесс пластической деформации и значительно ускоряют его течение [5, С.181].

Частота изменения контактных напряжений в коррозионных средах влияет на усталостную прочность стали, вызывая понижение выносливости стали, так как при высоких частотах агрессивная среда не успевает внедряться в раскрывшиеся под влиянием растягивающих напряжений ультрамикротрещины. Приходящие им на смену напряжения сжатия захлопывают эти ультрамикротрещины и делают их недосягаемыми для влияния коррозионной среды [7, С.228].

Время, необходимое для возникновения явлений как статической, так и циклической усталости, основной фактор при воздействии внешних рабочих сред на механические характеристики твердых тел. Изменения механических свойств твердых тел под влиянием внешних сред, вызванные коррозионными, диффузионными, эрозионными и кавитационными процессами, обычно требу-

ют значительного времени. Поэтому внешние активные среды почти всегда влияют на длительную прочность и циклическую усталость твердых тел.

Достаточно малого времени для изменения механических свойств твердых тел при воздействии сред, в основе влияния которых на твердые тела лежит значительное адсорбционное понижение уровня поверхностной энергии. К таким средам относятся некоторые металлические расплавы, снижающие в несколько раз пластичность металлов в процессе деформации, происходящей со скоростью нескольких миллиметров в минуту.

Далее, к быстродействующим средам относятся такие, в основе которых лежит действие водорода, что объясняется высокой скоростью перемещения внутри материала водорода. Протонный газ, возникший в результате воздействия среды, вызвавший наводороживание металла, не успевает вызвать изменения механических свойств материалов лишь при деформациях, происходящих с весьма высокими скоростями, например, вызванными динамическими нагрузками.

Таким образом, при явлениях усталости материалов, возникающих при длительном действии статических, динамических или циклических напряжений, почти всегда может проявляться воздействие внешних рабочих сред на усталостную прочность.

При воздействии рабочей среды материал, подверженный усталости, может претерпевать либо обратимые, либо необратимые изменения, причем в большинстве случаев материал разупрочняется. Усталостная прочность металлов понижается даже без концентраторов напряжения при коррозионном влиянии среды. Это понижение тем сильнее, чем более термодинамически неуравновешенной является среда. Среды, вызывающие эрозионное и кавитационное поражение металла, также снижают усталостную прочность обычно в связи с неравномерным износом и образованием концентраторов напряжения [11, С.18].

Также существуют среды, растворяющие конструкционный материал; в этом случае обычно наблюдается снижение усталостной прочности, в основном вызванное неравномерным растворением и образованием концентраторов напряжения. Это явление наблюдается в некоторых металлических сплавах по отношению к сплавам на ферритной основе. Среды, взаимодействие с которыми приводит к образованию химического соединения либо твердого раствора, могут вызвать как повышение, так и понижение усталостной прочности конструкционного материала. Это зависит от того, будет ли вновь образовавшийся материал прочнее или слабее исходного конструкционного материала, работающего на усталость, причем возможно повышение усталостной прочности и в случае образования менее прочного материала, когда в приповерхностном слое появляются остаточные сжимающие напряжения.

Особенность исследований усталостной прочности материалов в рабочих средах связана с наложением на чисто механические явления усталости поверхностных и диффузионных явлений. Различные рабочие среды могут оказывать разнообразное влияние на усталостную прочность материалов, однако все же возможно выделить некоторые, общие для большинства сред и всех материалов факторы, с изучения которых необходимо систематизировать исследования в области влияния внешних сред на усталостную прочность.

Так как адсорбция наблюдается из большинства сред и предшествует

коррозионно-диффузионным явлениям, возможно говорить об универсальности этого фактора воздействия внешних сред на механические свойства материалов. Адсорбция поверхностно-активных элементов среды вызывает снижение уровня поверхностной энергии твердого тела, при этом облегчается его деформация и разрушение, так как зарождение пластических сдвигов и рост разнообразных дефектов возможны уже при меньших напряжениях, это последнее явление известно под названием эффекта Ребиндера (облегчение процесса диспергирования под влиянием адсорбции).

Адсорбция из внешней среды может оказать большое влияние на механические свойства твердых тел, в том числе и на их усталостную прочность. Снижение уровня поверхностной энергии вследствие адсорбции может привести даже к самопроизвольному диспергированию распаду металла на частицы коллоидных размеров вообще без приложения внешних нагрузок, либо при весьма малых напряжениях.

Сильнодействующие поверхностью-активные среды обычно вызывают разупрочнение конструкционных материалов, а слабодействующие, в зависимости от условий, либо разупрочнение, либо упрочнение благодаря пластификации материала, способствуя в последнем случае «тренировке» металла, которая вызывает повышение усталостной прочности. Пластификация металла при адсорбции объясняется снижением энергетического барьера при выходе дислокаций на свободную поверхность [3, С.238].

Адсорбционные явления происходят как на поверхности раздела среда – твердое тело, так и внутри его. В последнем случае посредством двух механизмов: адсорбционной миграции из внешней среды внутрь твердого тела по развитым поверхностям дефектов и путем диффузионного выхода на внутренние разделы фаз поверхностью-активных элементов, растворенных в твердом теле.

В результате адсорбционного взаимодействия внешней среды и деформируемого металла его сопротивление усталости обычно снижается. Этот весьма общий эффект, вызванный «адсорбционной усталостью», вполне аналогичен понижению поверхностного напряжения на данной поверхности раздела под влиянием адсорбции и его проявление тем сильнее, чем активнее среда [2, С.115].

Другой универсальный фактор, проявляющийся при взаимодействии циклически нагружаемых материалов и внешних сред, связан со свойством твердых тел: их дефектностью, наличием в твердых телах разнообразных статистически распределенных дефектов (от ультрамикроскопических до макроскопических размеров). К дефектам относятся также дислокации и вакансии, предопределяющие деформацию твердых тел.

Характерной особенностью дефектов твердых тел является их развитие в процессе деформации и концентрация этой дефектности в приповерхностных слоях твердого тела и на границах раздела между зернами и включениями внутри твердого тела, т.е. в местах, где твердое тело может находиться в контакте с рабочей средой. На развитие поверхностных дефектов на границах раздела различных фаз оказывает влияние градиент поверхностного напряжения, связанный с кривизной поверхности и непостоянством плотности поверхностной энергии твердого тела. Адсорбция из внешней среды способствует развитию количества дефектов.

Дефекты строения твердого тела позволяют внешней среде взаимодействовать со значительными объемами твердого тела проникновением вглубь его путем двухмерной адсорбции по поверхностям этих дефектов. Пластическая деформация, способствующая развитию дефектов, особенно дислокаций, вакансий и их коагуляции, содействует тем самым адсорбционному проникновению внешних сред внутрь металла.

Характерным является взаимодействие некоторых видов активных сред с дислокациями. Известно, что локальные дислокации могут служить путями для проникновения среды внутрь металла. Однако главным фактором взаимодействия среды и дислокаций является блокирование дислокаций активными элементами среды, вызывающее хрупкость материала.

Атомы растворенных элементов твердых растворов, возникших в результате действия среды, могут блокировать дислокации в связи с образованием внешних облаков Котрелла (ограничивать подвижность дислокаций в локальном объеме металла).

Важным фактором, который необходимо учитывать при изучении влияния среды на усталостную прочность твердых тел, является изменение энергетического уровня твердого тела при деформации. Деформация, повышая энергетический уровень твердого тела, снижает тем самым необходимую добавочную энергию активации для химических, электрохимических диффузационных и других видов взаимодействия среды и твердого тела [1, С.145].

Облегчению разрушения металлов от усталости особенно содействует неравномерное воздействие среды, связанное с неравномерной активацией отдельных участков металла при деформации металлов и сплавов. Поэтому предварительная деформация металла, предшествующая длительному нагружению в активных средах, может оказаться решающей при оценке усталостной прочности.

Таким образом, взаимодействие внешних сред с металлом значительно усиливается в процессе деформации; это относится как к адсорбционному воздействию внешних сред, так и другим видам взаимодействия. Повышение энергетического уровня металла в связи с его деформацией обуславливает более низкую работу выхода ионов при коррозионных процессах, так как в этом случае ион металла может легче покинуть решетку. Кроме того, деформация поликристаллических металлов вызывает появление градиентов внутренних напряжений между отдельными его участками (например, зернами). Эта неравномерная деформация увеличивает в отдельных областях разность потенциалов, существующую между анодными и катодными участками, т.е. усиливает действие электрохимических пар в пределах одной детали. Места с наиболееискаженной решеткой (анодные участки) подвергаются коррозионному разъеданию, тогда как на катодных участках происходит осаждение ионов водорода, приводящее к водородной хрупкости металла.

Неравномерная деформация (как упругая, так и пластическая) усиливает также диффузионное проникновение элементов внешней среды в твердое тело. В этом случае диффузия протекает с относительно малой скоростью в равномерно деформированные участки твердого тела и с высокой скоростью по возникшим дефектам, в том числе и типа дислокаций; в этом случае следует уже говорить

скорее о поверхностной диффузии, чем диффузии интегрального типа.

Если учитывать изложенные факторы, то возможно объяснить ряд интересных явлений, наблюдаемых при усталости металлов в активных средах. Остановимся на одновременном влиянии концентраторов напряжения и активных сред. Так как в местах концентрации напряжений происходит максимальное искажение решетки металла и появляются первые признаки пластической деформации, то эти места наиболее активны при адсорбционных, электрохимических и диффузионных процессах. Поэтому возможно пластифицирование мест с концентрацией напряжения и снижение их отрицательного влияния на усталость, которое мы наблюдаем, например, в некоторых металлических расплавах. Возможен другой вид воздействия среды, когда местное интенсивное растворение или коррозионное разъедание дна концентратора напряжений вызывает снижение влияния концентратора на усталостную прочность, наблюдавшееся в некоторых металлических расплавах и в коррозионных средах.

Влияние обработки поверхности на усталость металлов в активных средах также необходимо исследовать, учитывая изменения в металле, вызванные обработкой. Появление наклена и остаточных напряжений вызывает активацию металла, которая особенно усиливает воздействие среды на усталостную прочность в случае неравномерного наклена и появления градиентов остаточных напряжений. В этих случаях происходит резкое снижение усталостной прочности.

В заключение, стоит обратить внимание на усиление влияния на усталостную прочность металлов в активных средах технологической наследственности, то есть влияния технологических процессов, предшествующих окончательной обработке. В случае, когда окончательная обработка не ликвидирует термодинамической неоднородности приповерхностного слоя, вызванной предшествующей обработкой, среда избирательно влияет на материал, вызывая появление концентраторов напряжения и снижая усталостную прочность. Таким образом, конечная обработка, подавляющая все изменения, вызванные предшествующими видами обработки, а также создающая равномерный наклен на поверхности, является чрезвычайно выгодной для деталей, работающих в активных средах. Необходимо иметь в виду, виды равномерного поверхностного наклена ликвидируют дефекты поверхности, по которым среда может проникать внутрь металла, повышая этим усталостную прочность.

#### *Литература*

1. Алехин В.П., Алиев Г.Г., Шоршоров М.Х. Образование градиента плотности дислокации в поверхностных слоях кристаллов кремния на начальной стадии деформации // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 3. С. 143-146.
2. Андреев В.В., Муравьев С.Н., Шетулов Д.И. Оценка параметров модели усталостного поведения некоторых конструкционных материалов // Материаловедение и высокотемпературные технологии: Межвуз. сб. науч. тр. Выпуск 1. Н. Новгород: НГТУ. 1999. С. 108-110.
3. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн; пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина; под ред. В.П. Зломанова. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. С. 400.

4. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургиздат, 1963. С. 272.
5. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Прогноз долговечности конструкционных материалов по параметрам их структуры // Труды III Международной конференции «Deformation & fracture of materials and nanomaterials». М: ИМЕТ РАН. 2009. Т. II. С. 180-181.
6. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Пронин А.И., Чернышов Е.А. Прогнозирование прочности и долговечности материалов деталей машин и конструкций с учетом частоты циклического нагружения // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. № 9. С. 32-37.
7. Одинг И.А. Механика деформируемого твёрдого тела. М.: Наука, 1972. С. 480.
8. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов // Вестник научно-технического развития. 2015. № 12(100). С. 42-62.
9. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. С. 61.
10. Шанявский А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 32-44.
11. Шанявский А.А., Никитин А.Д. Процессы самоорганизованного разрушения металлов при многопараметрическом нагружении // Фундаментальные исследования. 2012. № 4(5). С. 3-20.
12. Шетулов Д.И. К оценке сопротивления усталости материалов по повреждению поверхностных аномальных слоев // Физико-химическая механика материалов. 1984. № 6. С. 117.
13. Шибаров В.В., Шетулов Д.И., Соколов Л.Д. К исследованию влияния частоты приложения нагрузки на усталостную прочность некоторых чистых металлов // Физико-химическая механика материалов. 1971. № 3. С. 29-32.

УДК 674.815

## **Особенности применения методов виртуального закрытия трещины для изучения процессов разрушения изотропных материалов**

**Борис Леонидович Спирин**, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,

**Сергей Владимирович Фролов**, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой механики и инженерной графики,

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

*В данной статье рассмотрено применение методов виртуального закрытия трещины, которые хорошо зарекомендовали себя при использовании конечно элементного анализа проблем разрушения изотропных объектов. Также рассмотрены проблемы физического разделения режимов разрушения, связывая их вклады с количеством работы, необходимой для виртуального закрытия протяженной трещины. Также уделено внимание дальнейшему развитию данного метода, связанного с понятием «эллипса упругости вершины трещины», позволяющего учесть эффекты взаимного проникновения трещин.*

Метод конечных элементов, изотропные пластины, эллипсупругости, комбинированный режим разрушения.

## **Features of the application of virtual crack closure methods for studying the processes of destruction of isotropic materials**

**Boris Leonidovich Spirin**, Senior Lecturer of the Department of Mechanic and Engineering Graphics,

**Sergei Vladimirovich Frolov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia», Moscow

*This article discusses the application of virtual crack closure methods that have proven themselves well when using finite element analysis of isotropic object fracture problems. It also discusses the problems of physical separation of fracture modes, linking their contributions to the amount of work required for virtual closure of an extended crack. Attention is also paid to the further development of this method, associated with the concept of the «ellipse of elasticity of the crack tip», which allows taking into account the effects of mutual penetration of cracks.*

Finite element method, isotropic plates, elastic ellipse, combined failure mode.

### *Вводная часть*

Метод виртуального закрытия трещины (The virtual crack closure technique (VCCT)) используется для численного определения скорости распростране-

нения трещины при изучении механики разрушения материала. В последнее время получил особенно широкое распространение в связи с развитием метода конечных элементов (МКЭ). Метод часто используется для разделения этапов (режимов) разрушения в смешанных задачах, поскольку позволяет определить вклад каждого режима разрушения в величину скорости распространения энергии при трех классических режимах разрушения. Такой подход, основанный на концепции скорости высвобождения энергии при развитии трещины, имеет решающее значение для понимания физической природы разрушения материалов под действием механических напряжений.

В действительности VCCT позволяет рассчитать энергию, которая высвобождается при образовании и расширении трещины путем моделирования как бы обратного процесса – закрытия трещины (виртуального). Основная идея метода заключается в том, что если при помощи приложения виртуальных сил мы сможем «закрыть» трещину виртуальным перемещением, то работа, проделанная силами, необходимыми для «закрытия», даст оценку для энергии, связанной с появлением и ростом трещины. Одним из достоинств метода является то, что он позволяет разделить вклады, которые вносят различные режимы в общий процесс роста трещины, особенно это касается классических режимов:

- режим I – режим раскрытия;
- режим II – режим скольжения;
- режим III – режим разрыва.

Одной из сильных сторон данного метода является его способность рассчитывать результаты методом конечных элементов при сложном взаимодействии трещин в условиях изменяющихся нагрузок, что делает его ценным инструментом в руках инженеров-исследователей в области строительного материаловедения. Изучение контактных явлений взаимного проникновения и трения между поверхностями трещин является очень важным при изучении разрушения конструкций. Названные факторы могут заметно повлиять на прочность конструкций, особенно находящихся как в сложном напряженно-деформированном состоянии, так и под действием динамических нагрузок [1].

Одним из недостатков стандартного метода VCCT является то, что при некоторых условиях он начинает давать физически невозможные и, даже, отрицательные значения для вкладов режимов в процесс разрушения. Исследованиями установлено, что это происходит при отсутствии ортогональности между компонентами силовых факторов, действующих на вершинах трещины. Ортогональность является необходимой для правильного определения вкладов компонентов разрушения. Это проявляется, например, для несимметричных трещин.

Модификацией метода является правильное разделение смешанного режима I/II, где вклад этих режимов связывается с количеством работы в процессе закрытия трещины. При дальнейшем изучении проблемы понадобится введение геометрической конструкции «эллипс гибкости вершины трещины».

Основой метода VCCT является численная реализация интеграла Ирвина закрытия трещины [3], которая впервые для двухмерных задач была предложена Рыбицки (Rybicki) и Канниненом (Kanninen) [5]. Затем данная реализация была распространена и на трехмерные задачи Шивакумаром (Shivakumar) [11]. В дальнейшем VCCT стал широко использоваться для изучения проблем смешан-

ного режима разрушения, например, для изучения расслоения композитных материалов, а также разрушения между различными фазами разнородных материалов. Для этих случаев приходится не только вычислять общую скорость высвобождения энергии, но и обязательно учитывать вклад каждой фазы из трех классических режимов разрушения.

В данной статье в первую очередь рассматривается реализация основного VCCT и на примере показывается, что вычисленные таким образом вклады компонентов энергии G<sub>I</sub> и G<sub>II</sub> не являются правильно определенными [8]. Далее рассматривается модифицированный метод, который значительно точнее обеспечивает разделение режимов разрушения. В модифицированном варианте VCCT разделение режимов разрушения связано со скоростью высвобождения энергии и с количеством работы, совершаемой в соответствующим образом построенном процессе виртуального закрытия протяженной трещины. Также рассмотрена процедура вычисления коэффициентов гибкости вершины трещины и проведено сравнение результатов расчета, получаемых на основе данных методов.

#### *Основной метод виртуального закрытия трещины*

При решении прикладных задач с учетом различных геометрических особенностей, физических свойств и назначения конструкций были разработаны различные формулировки метода. Для простоты рассматривается только задача плоского напряженного состояния для изотропного тела, находящегося в пределах действия закона Гука. Рассмотрим элемент шириной  $b$ , в котором возникла трещина длиной  $a$ , к которому приложена некоторая нагрузка и заданы кинематические граничные условия. Используем Декартову систему координат с осями параллельными и нормальными трещине (рисунок 1). В данной задаче будем использовать модель для МКЭ, где объект дискретизируется с использованием четырех узловых элементов. Обозначим через A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> – узлы на нижней, а через A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub> – на верхней поверхности трещины. Узлы, находящиеся напротив друг друга, связаны соответствующими ограничениями, которые могут изменяться, моделируя рост трещины. В качестве начально положения трещины установим C<sub>1</sub> (рисунок 1).

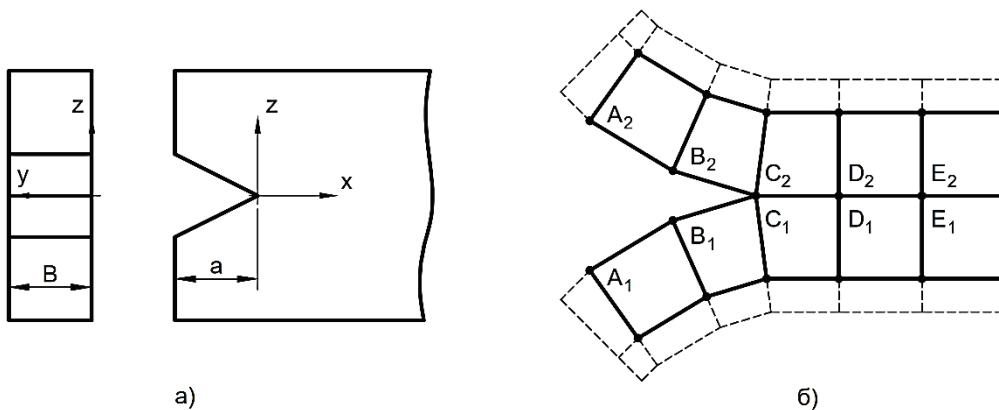


Рисунок 1 – Постановка задачи МКЭ: а) плита с трещиной, б) непрерывная сетка элементов трещины и ее вершины

Скорость выделения энергии  $G$  можно определить как полную потенциальную энергию системы, которая выделяется на единице площади поверхности, которая создается вследствие роста трещины. Как показано в работе Ирвина [7] энергия, выделяемая при малом расширении трещины (виртуальном), равна работе сил, которые действовали на поверхности трещины до ее увеличения, необходимой для закрытия данной трещины.

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \left[ \int_0^{\Delta a} \sigma_z(x) \Delta \omega(x - \Delta a) dx + \int_0^{\Delta a} \tau_{zx}(x) \Delta u(x - \Delta a) dx \right] \quad (1)$$

здесь  $\sigma_z$  – вектор нормального напряжения,  $\tau_{zx}$  – соответственно вектор касательного напряжения, которые действуют на поверхности разрушения,  $\Delta u$  и  $\Delta \omega$  – в свою очередь относительные перемещения поверхностей трещины по соответствующим осям, которые возникают вследствие увеличения длины трещины на величину  $\Delta a$ . За начало оси  $z$  принимается вершина трещины. Переводя концепцию Ирвина в форму для МКЭ, можно записать следующее выражение для скорости выделения энергии:

$$G = \frac{1}{2B\Delta a} [X_c \Delta u_c + Z_c \Delta \omega_c] \quad (2)$$

здесь  $X_c$  и  $Z_c$  – компоненты вектора внутренних усилий, действующих вдоль соответствующих осей, а  $\Delta u_c, \Delta \omega_c$  – соответствующие им относительные перемещения, появляющиеся вследствие расширения трещины по ее длине  $a$ , что эквивалентно перемещению вдоль оси  $-x$  в вершине трещины.

В общем случае вычисление сил и перемещений входящих в уравнение (2) требует двух этапов (шагов), что приводит к так называемому two-step VCCT. На первом этапе усилия, действующие на вершине трещины, вычисляются при помощи недеформированной сетки на ее исходной длине:

$$X_c = X_c^{(1)} = -X_{C_2}^{(1)}; Z_c = Z_c^{(1)} = -Z_{C_2}^{(1)} \quad (3)$$

На следующем этапе вычисляются относительные смещения вершины трещины, при помощи сетки, в которой длина трещины изменяется на величину  $\Delta a$ , моделируемые путем снятия ограничений на перемещение узлов  $C_1$  и  $C_2$ . Этот процесс изображен на рисунке 2.

$$\Delta u_c = u_{C_2}^{(2)} - u_{C_1}^{(2)}; \Delta \omega_c = \omega_{C_2}^{(2)} - \omega_{C_1}^{(2)} \quad (4)$$

$$\Delta u_c \cong \Delta u_B = u_{B_2}^{(1)} - u_{B_1}^{(1)}; \Delta \omega_c \cong \Delta \omega_B = \omega_{B_2}^{(1)} - \omega_{B_1}^{(1)} \quad (5)$$

Если допустить, что  $\Delta a \ll a$ , то оба метода могут дать результат с достаточной степенью точности. Следовательно, один расчет выполняется на исходной сетке, где трещина имеет начальную длину, а относительное смещение оценивается в узлах, расположенных непосредственно за вершиной трещины  $B_1$  и  $B_2$ .

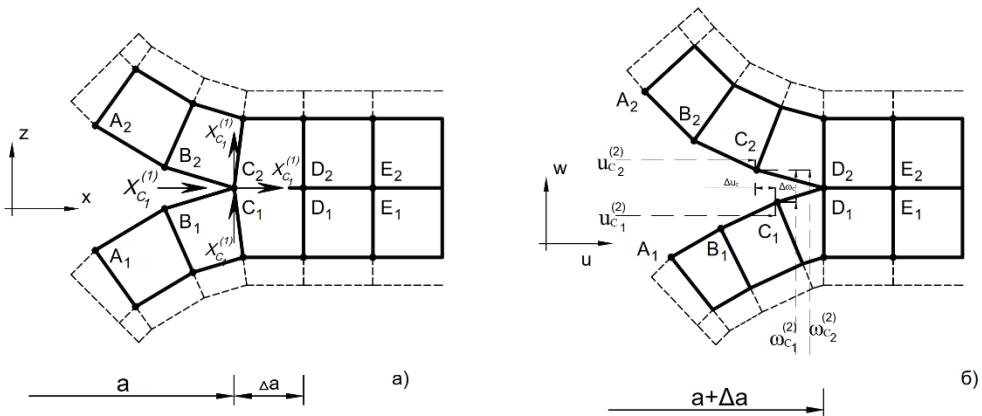


Рисунок 2 – Двухэтапный метод VCCT: а) вычисление силы разрыва узла трещины, б) вычисление относительного перемещения при разрыве

*Выделение режимов разрушения из общего процесса*

При изучении процесса разрушения плоских пластин разрушение обычно происходит по смешенному режиму (при одновременном присутствии режима I – раскрытие и 2 – скольжение). Таким образом, для скорости высвобождения энергии можно записать:

$$G = G_I + G_{II} \quad (6)$$

Обозначения соответствуют вкладу режима разрушения, соответственно 1 и 2 типов в общий баланс энергии.

Как было показано Ирвином [11], для случая изотропной однородной плоскости, в которой возникает линейная трещина эти компоненты можно записать в следующем виде:

$$G_I = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \left[ \int_0^{\Delta a} \sigma_z(x) \Delta \omega(x - \Delta a) dx \right] \quad (7)$$

$$G_{II} = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta a} \left[ \int_0^{\Delta a} \tau_{zx}(x) \Delta u(x - \Delta a) dx \right] \quad (8)$$

Подставив в уравнение (7) выражение для напряжений, полученных методами теории упругости, а в уравнение (8) выражение для соответствующих перемещений, получим:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E}; \quad G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E} \quad (9)$$

здесь  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжения для режима I, а  $K_{II}$  – коэффициент для режима II соответственно. Следуя процедуре метода, можно получить [6].

$$G_I = \frac{Z_C \Delta \omega_C}{2B\Delta a}; \quad G_{II} = \frac{X_C \Delta u_C}{2B\Delta a} \quad (10)$$

При выводе данного уравнения было учтено, что трещина проходит в сплошной изотропной среде по оси симметрии пластины. Также необходимо отметить, что, исходя из (9), полученные коэффициенты должны быть положительными или могут быть равны нулю только в случае отсутствия напряжений в элементе, что соответствует их физическому смыслу. Однако из полученного выражения (10) не следует, что определяемые величины однозначно положительные. Например, данное уравнение может дать отрицательное значение величин, когда узловые силы и соответствующие им перемещения противоположно направлены. Для линейных моделей можно записать:

$$\Delta u_C = f_{xx} X_C + f_{xz} Z_C; \quad \Delta \omega_C = f_{zx} X_C + f_{zz} Z_C \quad (11)$$

здесь через  $f$  обозначены соответствующие коэффициенты гибкости. Из энергетических соображений заключаем, что  $f_{xx}$  и  $f_{zz}$  должны быть больше нуля. Исходя из данного выражения можно заключить, что если  $f_{zx} \neq 0$  (несимметрическая трещина), то появляется зависимость между силой на вершине трещины (по  $z$ ) и перемещением в направлении оси  $x$ , и наоборот (сила по оси  $x$  – смещение по оси  $z$ ). Эта зависимость становится равной 0 только для симметрических трещин ( $f_{zx} = 0$ ). Аналогичная связь возникает между касательными и нормальными напряжениями для несимметрических трещин и разнородных материалов (Ванг и Райс) [12]. Можно переписать выражение (11) в форме зависимости силы от перемещения:

$$X_C = k_{xx} \Delta u_C + k_{xz} \Delta \omega_C; \quad Z_C = k_{zx} \Delta u_C + k_{zz} \Delta \omega_C \quad (12)$$

здесь

$$k_{xx} = \frac{f_{zz}}{f_{xx} f_{zz} - f_{xz}^2}; \quad k_{xz} = k_{zx} = -\frac{f_{xz}}{f_{xx} f_{zz} - f_{xz}^2}; \quad (13)$$

$$k_{zz} = \frac{f_{xx}}{f_{xx} f_{zz} - f_{xz}^2}$$

Подставляя (11) в (2) и последовательно в (10), получаем следующую (положительно определённую) зависимость между силой и энергией разрушения, а также зависимость между вкладом каждой фазы и силой:

$$G = \frac{1}{2B\Delta a} (f_{xx} X_C^2 + 2f_{xz} X_C Z_C + f_{zz} Z_C^2) \quad (14)$$

Что эквивалентно:

$$G_I = \frac{1}{2B\Delta a} (f_{zz} Z_C^2 + f_{xz} X_C Z_C); \quad G_{II} = \frac{1}{2B\Delta a} (f_{xx} X_C^2 + f_{xz} X_C Z_C) \quad (15)$$

Исходя из (15) можно установить, что исходя из обычной модели  $f_{zz} \geq 0$  связано с  $G_I$ , а  $f_{xx} \geq 0$  с  $G_{II}$ , с другой стороны, а неопределенный по знаку коэффициент  $f_{xz}$  распределен между обоими режимами.

Это означает, что режимы могут не являться положительно определёнными, если они рассчитаны по стандартной модели. Такое возможно (как уже было упомянуто выше) для несимметричных трещин и будет показано на примере.

### *Модифицированный метод виртуального закрытия трещины*

При модификации метода VCCT вклады режимов разрушения зависят от количества работы, которая совершается в процессе закрытия трещины. При первом режиме разрушения (раскрытие трещины) для ее закрытия необходимо приложить к вершине соответствующую силу  $Z_c$  направление которой совпадает с направлением раскрытия (в направлении координаты  $z$ ). Одновременно прикладывается сила  $X_c=0$  в соответствующем направлении. Однако, данные величины взаимозависимы, а потому перемещение  $u_c$  частично открывает или полностью закрывает трещину в зависимости от знака  $f_{xz}$ . На следующем шаге, соответствующем режиму скольжения, оставшееся перемещение компенсируется за счет приложение сил  $X_c$  и  $Z_c$  – соответственно (рисунок 3).

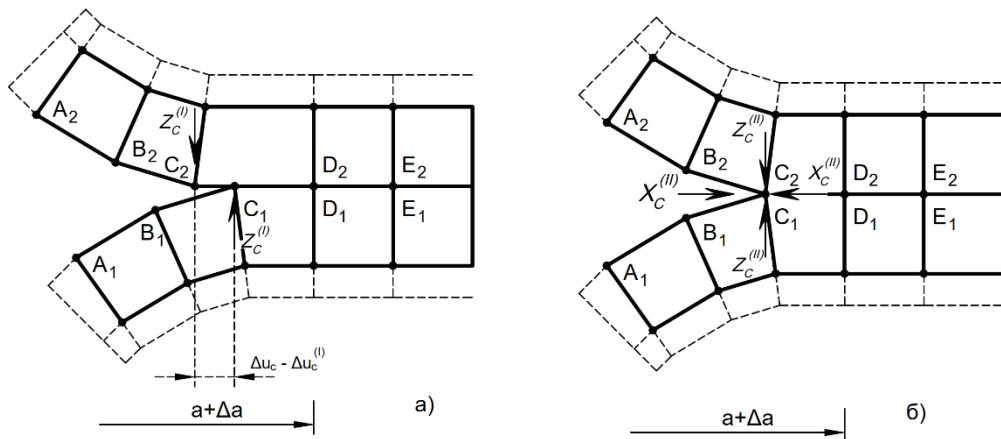


Рисунок 3 – Двухэтапный метод VCC: а) шаг 1 – закрытие трещины в  $z$  направлении, б) шаг 1 – закрытие трещины в  $x$  направлении

Исходя из уравнения (11), сила, необходимая на этапе I, может быть определена как:

$$X_c^{(I)} = 0; \quad Z_c^{(I)} = \frac{\Delta\omega_c}{f_{zz}} = \frac{f_{xz}}{f_{zz}} X_c + Z_c \quad (16)$$

Эта сила вызывает следующее перемещение:

$$\Delta u_c^{(I)} = f_{xz} Z_c^{(I)} = \frac{f_{xz}}{f_{zz}} \Delta\omega_c; \quad \Delta\omega_c^{(I)} = f_{zz} Z_c \Delta\omega_c \quad (17)$$

Соответственно на этапе величина необходимой силы будет равна сумме

полной величины силы для перемещения в направлении  $x$  и остаточной в направлении  $z$ :

$$X_C^{(II)} = X_C; \quad Z_C^{(II)} = Z_C - Z_C^{(I)} = -\frac{f_{xz}}{f_{zz}} X_C \quad (18)$$

Учитывая вышеприведенные определения для соответствующих факторов, получаем:

$$\Delta u_C^{(II)} = \left( f_{xx} - \frac{f_{xz}^2}{f_{zz}} \right) X_C = \Delta u_C - \Delta u_c^{(I)}; \quad \Delta \omega_C^{(II)} = 0 \quad (19)$$

И величины компонентов энергий, необходимых для закрытия трещины в модифицированном методе, будут равны:

$$G_I = \frac{Z_c^{(I)} \Delta \omega_c^{(I)}}{2B\Delta a}; \quad G_{II} = \frac{X_c^{(II)} \Delta u_c^{(II)}}{2B\Delta a} \quad (20)$$

Подставляя в данное выражение (16)-(18), получаем

$$G_I = \frac{1}{2B\Delta a} \frac{1}{f_{zz}} (f_{xz} X_C + f_{zz} Z_C)^2 = \frac{1}{2B\Delta a} \frac{\Delta \omega_c^2}{f_{zz}} \quad (21)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2B\Delta a} \left( f_{xx} - \frac{f_{xz}^2}{f_{zz}} \right) X_C^2 = \frac{1}{2B\Delta a} \frac{X_C^2}{k_{xx}} \quad (22)$$

Из анализа этих выражений видно, что в модифицированном методе ВССТ полученные величины не могут принять отрицательные значения. Это свидетельствует о том, что данный метод более точно моделирует физику процесса развития трещины.

При использовании основного метода ВССТ силы, действующие в узлах, вычисляются как результаты напряжений, а перемещения являются неизвестными в уравнениях. Однако удобнее будет определять величины энергии через перемещения основания трещины. Для этого перепишем уравнения в следующем виде:

$$G_I = \frac{1}{2B\Delta a} \frac{\Delta \omega_c^2}{f_{zz}}; \quad G_I = \frac{1}{2B\Delta a} \frac{1}{f_{zz}} \frac{(f_{xz} \Delta u_C - f_{zz} \Delta \omega_C)^2}{f_{xx} f_{zz} - f_{xz}^2} \quad (23)$$

Коэффициенты гибкости можно определить, если провести предварительные расчеты с использованием сетки метода конечных элементов, приложенной к расчетной трещине. Единичные силы для этого прикладываются в узлах сетки ( $C_1$  и  $C_2$ ) по направлению соответствующих осей, а коэффициенты гибкости определяются также, как и относительные перемещения (рисунок 4).

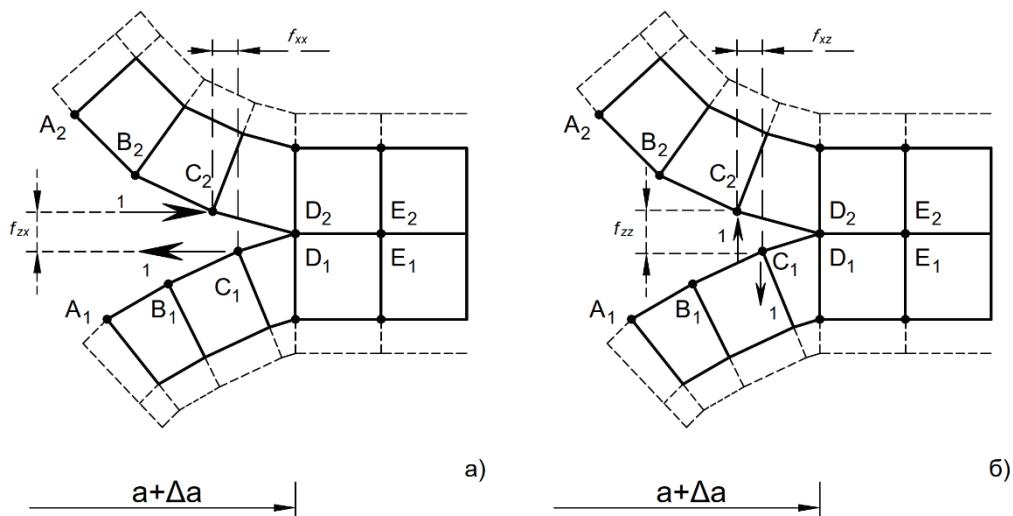


Рисунок 4 – Определение коэффициентов гибкости: а) для сил вдоль оси x, б) для сил вдоль оси z

Исходя из данной схемы коэффициенты гибкости определяются по следующим формулам:

$$f_{xx} = f_{xz} = (u_{C_2} - u_{c_1}); \quad f_{zx} = f_{zz} = (\omega_{C_2} - \omega_{c_1}) \quad (24)$$

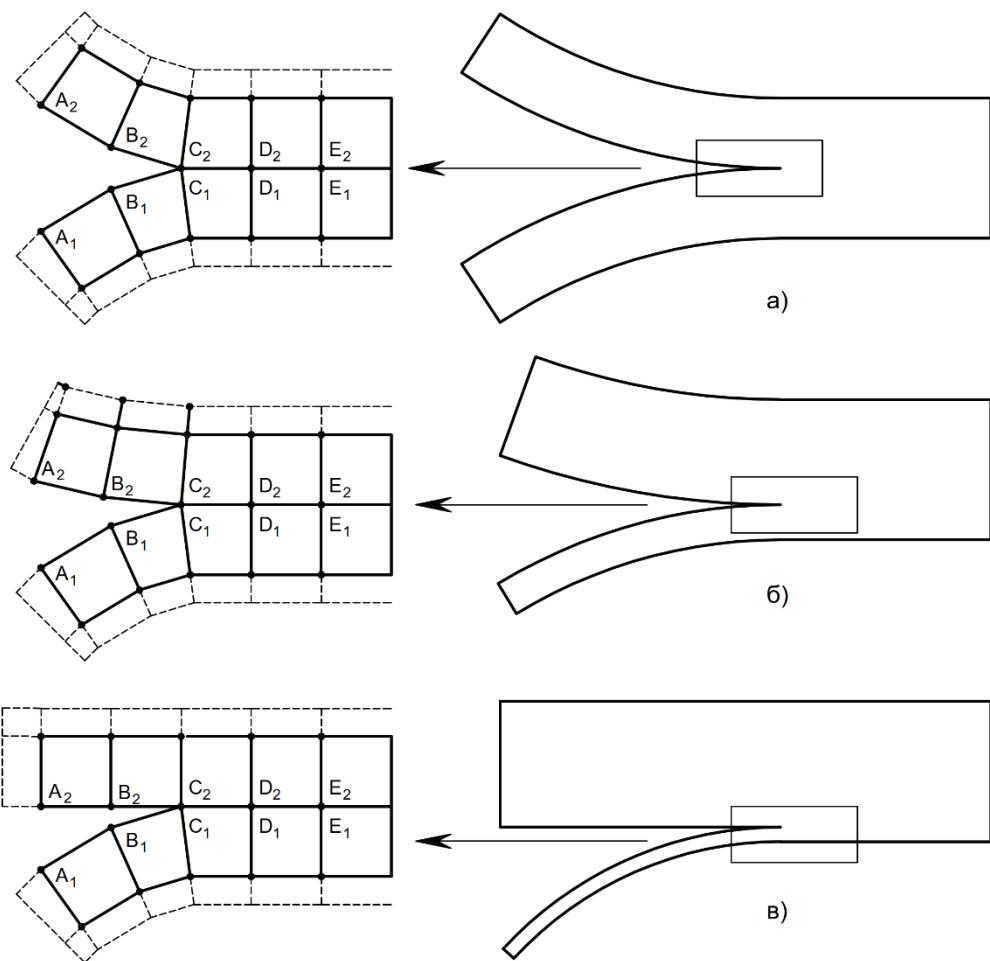
Используемые коэффициенты гибкости не зависят от вида внешней нагрузки, они определяются только физическими и геометрическими характеристиками объекта и могут быть определены один раз при решении задачи. В дальнейшем для каждого типа внешней нагрузки на соответствующей сетке интересующие значения  $GI$ ,  $GII$ ,  $G$  определяются исходя из уравнений (23) и (6) соответственно.

#### *Проверка методов и сравнение результатов*

Для проверки рассмотренных методов была рассмотрена задача появления трещины в консольной балке, к краю которой приложены два изгибающих момента противоположного знака.

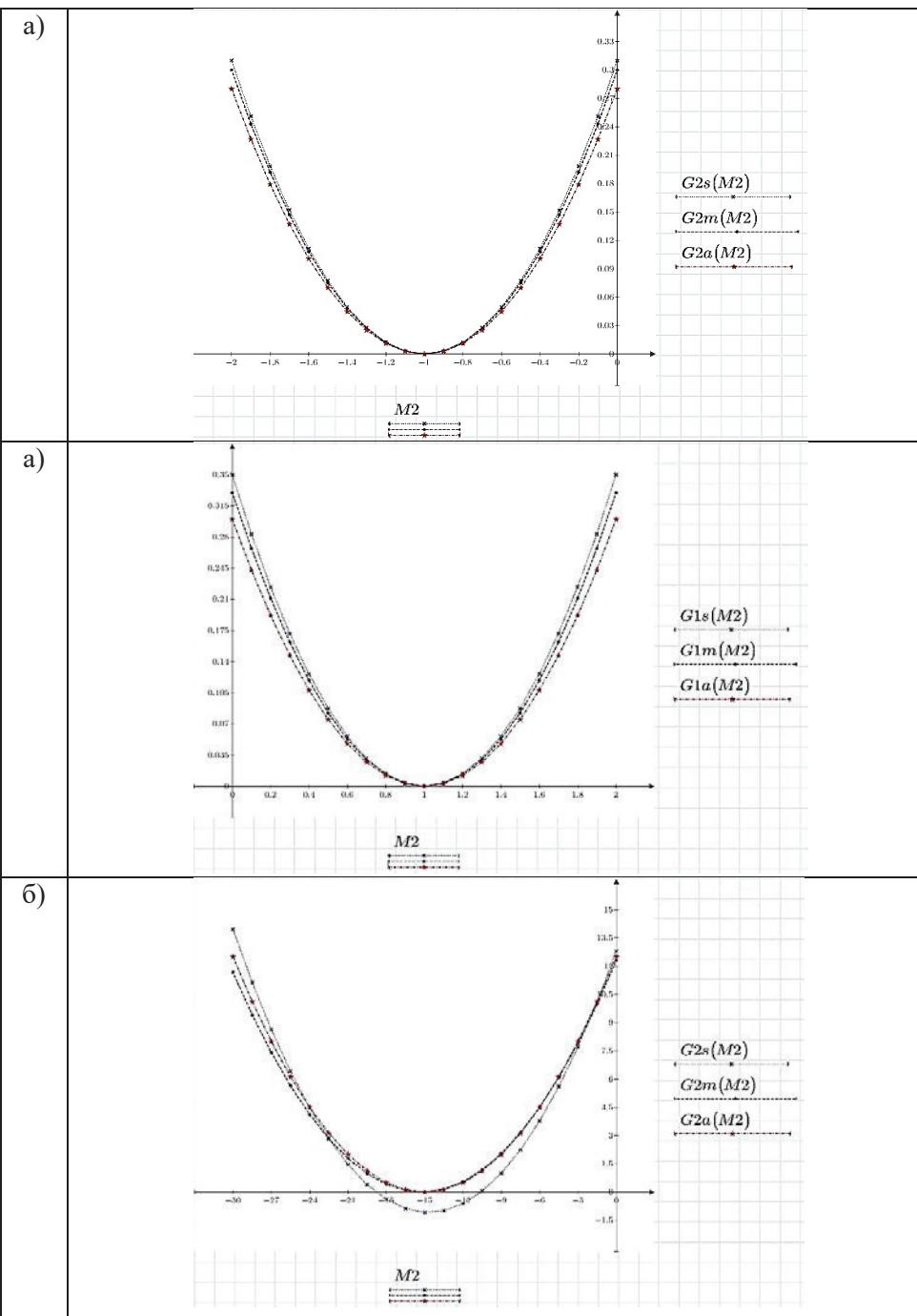
Для балки, используемой в моделировании  $L$  – длина балки,  $B$  и  $H$  соответственно ширина и высота,  $a$  – длина трещины,  $\eta$  – коэффициент несимметричности трещины.  $E$  – модуль Юнга (был принят  $1 \cdot 10^8$  Па),  $v$  – коэффициент Пуассона (был принят 0,3). Величина изгибающего момента  $M_1$  была принята равной  $1 \text{ Н}^*\text{м}$ , а величина  $M_2$  изменялась в достаточно широких пределах. Также в процессе моделирования менялись коэффициенты несимметричности (рисунок 5).

На рисунке 6 представлены результаты расчетов, которые отображают вклад каждой фазы в величину энергии, выделяющейся за время процесса разрушения как функции от коэффициента несимметричности и величины момента  $M_2$ .



**Рисунок 5 – Модель МКЭ для расчета трещины:** а)  $\eta = 1; M_2 = -1 \text{ H} * \text{м}$ ,  
б)  $\eta = 0,25; M_2 = -15 \text{ H} * \text{м}$ , в)  $\eta = 0,05; M_2 = -300 \text{ H} * \text{м}$

На этом графике показаны расчётные значения для стандартного (G1s, G2s) (9) и модифицированного (G1m, G2m) (22) методов, также проведено сравнение с результатами, полученными аналитическими методами (Суо и Хатчинсон [11]) по методике Ших и Асасро [12] (G1a, G2a). Для строго симметричного разрушения (рисунок 5а) результаты совпадают с достаточной степенью точности. В случае небольшой несимметричности (рисунок 5б) различия в методах становятся заметными, и в расчетах GII появляется физически невозможное значение отрицательной энергии. В случае резкой несимметрии (рисунок 5в) отрицательное значение GII становится более заметно, также, как и отклонение результатов от теоретических методов.



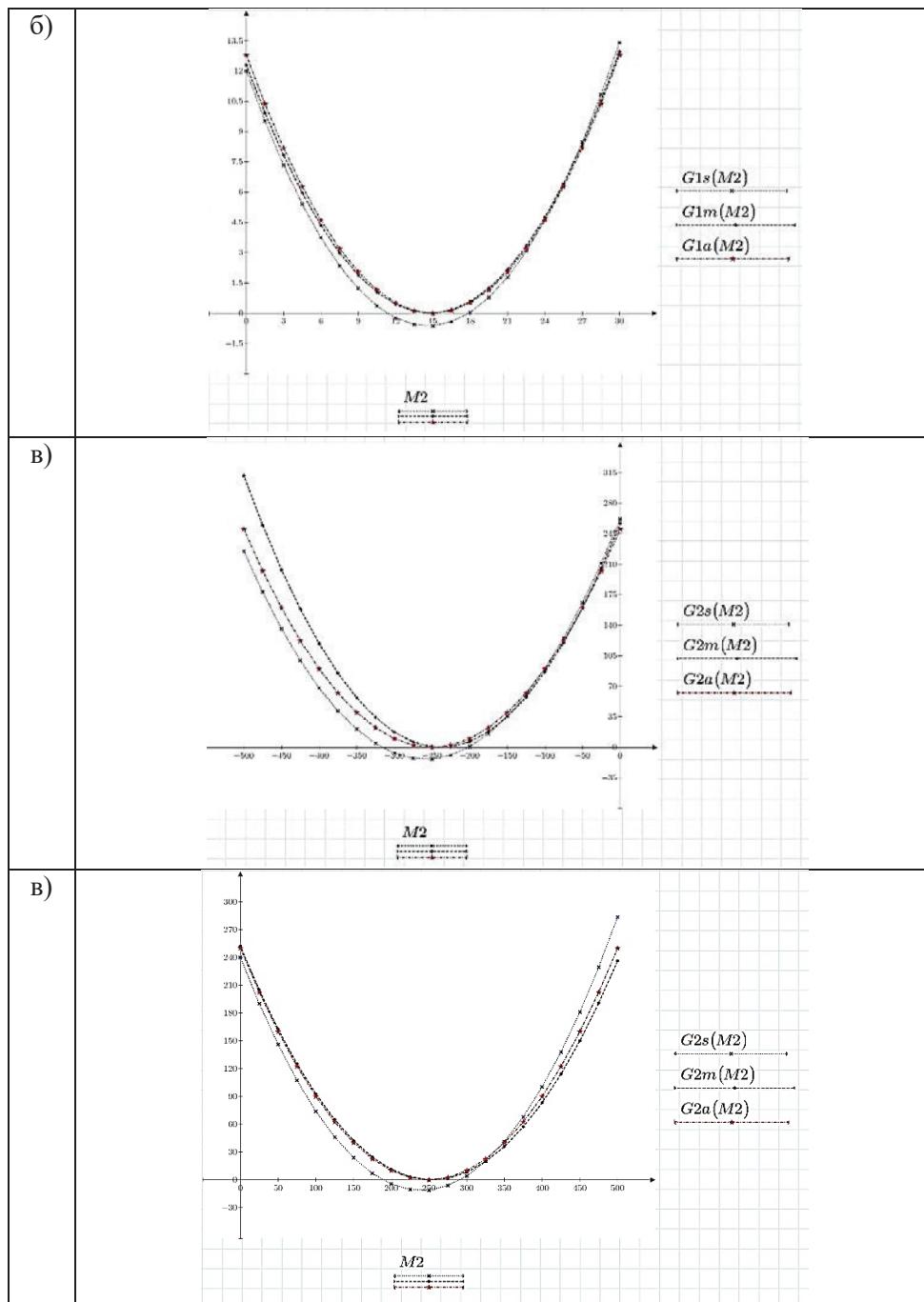


Рисунок 6 – Результаты расчетов: а)  $\eta = 1$ ;  $M2 = -1 \text{ H} * \text{м}$ ,  
б)  $\eta = 0,25$ ;  $M2 = -15 \text{ H} * \text{м}$ , в)  $\eta = 0,05$ ;  $M2 = -300 \text{ H} * \text{м}$

Эллипс гибкости трещины:

Для геометрического изучения трещины методом виртуального закрытия удобно использовать эллипс гибкости трещины.

Рассмотрим сечение, которое связано с геометрической формой, которая задается уравнением (14).

$$f_{xx}x^2 + 2f_{xz}xz + f_{zz}z^2 - 1 = 0 \quad (25)$$

Это уравнение представляет собой эллипс с центром в начале координат с осями, повёрнутыми (кроме случая  $f_{xz} = 0$ ) относительно главных осей. Для изучения свойств данного эллипса удобно использовать эллипсы Кулмана и Беллучи [9]. Обозначим через  $r$  радиус эллипса в направлении действующей силы, а  $s$  – в направлении перемещения вершины,  $\Delta s_c$  – соответствующее перемещение. Углы, которые данные радиусы образовывают с осью  $x$ , могут быть вычислены следующим образом:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{Z_c}{X_c}; \quad \operatorname{tg}(\beta) = \frac{\Delta\omega_c}{\Delta u_c} \quad (26)$$

Из определения эллипса можно вывести, что диаметр  $t$ , являющийся со-пряжённым с  $r$  в точке пересечения  $P$  имеет наклон к оси под следующим углом

$$\operatorname{tg}(\gamma) = -\frac{f_{xx} + f_{xz}\operatorname{tg}(\alpha)}{f_{xz} + f_{zz}\operatorname{tg}(\alpha)} \quad (27)$$

Подставляя в (11) (22) и (26) получаем:

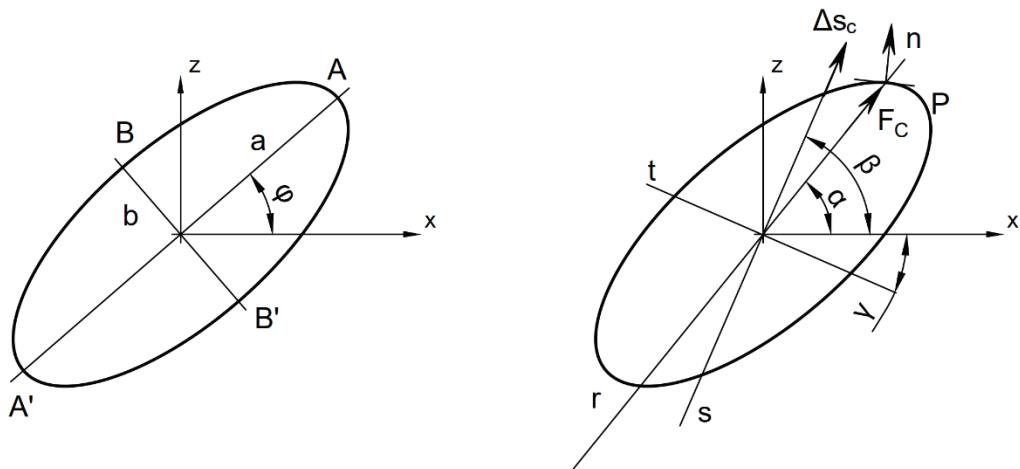
$$\operatorname{tg}(\beta) = \frac{f_{xx} + f_{xz}\operatorname{tg}(\alpha)}{f_{xz} + f_{zz}\operatorname{tg}(\alpha)} - ctg(\gamma) \quad (28)$$

Откуда следует, что  $s$  направлено по нормали к  $t$ .

Отсюда непосредственно следует, что направление смещения вершины трещины совпадает с нормалью к эллипсу в точке  $P$ . И, окончательно, векторы силы и перемещения параллельны только в случае, если они параллельны осям эллипса.

Также эллипс позволяет понять различие между разложением на компоненты сил и перемещений в стандартном и модифицированном ВССТ. Если разложение силы представить в виде проекций на оси:  $F_c = X_c i + Z_c k$  (здесь  $i, k$  единичные вектора вдоль  $x, z$  соответственно), а компоненты вектора перемещений представить соответственно:

$\Delta s_c^{(X)} = f_{xx}X_c i + f_{xz}X_c k; \quad \Delta s_c^{(Z)} = f_{xz}Z_c i + f_{zz}Z_c k$ , то для стандартного ВССТ  $X_c i$  и  $Z_c k$  будут иметь направление такое же как у соответствующих осей  $x, z$ . Эти оси пересекают контур эллипса в точках  $P_x, P_z$ , где вектора нормали имеют тоже направление, что и соответствующие вектора перемещений  $\Delta s_c$ , а значит не имеют конкретного направления и будут производить некоторую работу с компонентами силы.



**Рисунок 7 – Эллипс гибкости вершины трещины:**  
**а) Определение эллипса, б) Силы и перемещения при разрыве**

В модифицированном же методе компоненты силы будут иметь направление осей  $\bar{x}, \bar{z}$  соответственно. Эти оси пересекают контур в точках  $P_I, P_{II}$ , где нормальные вектора к контуру эллипса имеют тоже направление, что и соответствующие перемещения. Следовательно, в данном методе проекции вектора силы ортогональны геометрически и энергетически, а, значит, работа равна нулю для несоответствующих компонентов перемещения.

#### *Выводы:*

В результате моделирования было установлено, что основной метод VCCT может давать физически некорректные результаты для определенного типа задач с несимметричными трещинами. В таких случаях в результате действующих в вершине трещины сил возникают смещения в направлении, перпендикулярном действию силы. Особенно заметно это становится при значительных коэффициентах несимметричности ( $\eta > 10$ ). Модифицированный же метод VCCT для такого рода задач позволяет получать результаты, хорошо согласующиеся с аналитическим решением задачи. Для повышения точности расчетов может быть рассмотрен вариант использования коэффициентов гибкости, которые вводятся в используемую модель МКЭ. В целом основной и модифицированный методы VCCT позволяют получить достаточно точную картину поведения трещины, если правильно учитывать рассмотренные для них ограничения.

#### *Литература*

1. Аннин Б.Д., Черепанов Г.П. Упруго-пластиическая задача. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
2. Броек Д. Основы механики разрушения. М.: Высш. школа, 1980. 368 с.
3. Ишлинский А.Ю., Ивлев Д.Д. Математическая теория пластичности. М.: Физматлит, 2001. 704 с.
4. Карманов В.Г. Математическое программирование. М.: Наука, 1986. 273с.

5. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
6. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике: 2-е изд. М.: Наука, 1970. 512 с.
7. Надаи А. Пластиичность и разрушение твердых тел. Т. 2. М.: Мир, 1969. 864 с.
8. Парсон В.З., Борисковский В.Г. Динамическая механика разрушения. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
9. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
10. Рачков М.Ю. Оптимальное управление в технических системах. М: Юрайт, 2024. 120 с.
11. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. Киев: Наук. думка, 1981. 324 с.
12. Сергиенко И.В. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации. Киев: Наукова Думка, 1980. 275 с.
13. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1986. 416 с.
14. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 590 с.
15. Ширяев В.И. Исследование операций и численные методы оптимизации М.: Ленанд, 2017. 224 с.

УДК 621.891

**Разработка композитных материалов на основе  
политетрафторэтилена с использованием дисперсных наполнителей:  
улучшение триботехнических и эксплуатационных характеристик**

**Андрей Сергеевич Цай**, инженер по испытаниям 3 категории,  
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Исток»  
имени А.И. Шокина», г. Фрязино, Московская область

*В представленной работе проводится исследование, направленное на создание композитных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), модифицированного дисперсными наполнителями. В ходе работы рассматриваются различные виды наполнителей, которые могут быть использованы для улучшения свойств ПТФЭ. Особое внимание уделяется анализу влияния этих наполнителей на эксплуатационные характеристики политетрафторэтилена, такие как прочность, износостойкость, термическая стабильность и химическая стойкость. На основе проведенных испытаний и анализа полученных данных был выбран наиболее оптимальный вид наполнителя ПТФЭ.*

Политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, наполнители для ПТФЭ.

**Development of composite materials based on polytetrafluoroethylene  
using dispersed fillers: improvement of tribotechnica  
and operational characteristics**

**Andrei Sergeyevich Tsai**, 3rd category test engineer,  
A.I. Shokin Research and Production Enterprise Istok Joint Stock Company,  
Fryazino, Moscow region

*In the presented work, research is carried out aimed at creating composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) modified with dispersed fillers. In the course of the work, different types of fillers that can be used to improve the properties of PTFE are considered. Special attention is paid to analyze the effect of these fillers on the performance characteristics of PTFE such as strength, wear resistance, thermal stability and chemical resistance. Based on the conducted tests and analysis of the obtained data, the most optimal type of PTFE filler was selected.*

Polytetrafluoroethylene, polymer composites, fillers for PTFE.

Современные технические достижения требуют разработки новых конструкционных материалов, обладающих превосходными прочностными, упругими и иными характеристиками, превосходящими традиционные аналоги. Сегодня прогресс в создании композиционных полимерных материалов основывается на научных изысканиях в сфере полимерного материаловедения, поскольку взаимодействие напол-

нителей и матриц представляет собой комплексную задачу. Полимерные композиты активно применяются в триботехнике. Узлы трения и другие конструктивные элементы машин, изготовленные из полимерных материалов, отличаются меньшим весом, работают практически бесшумно, проявляют демпфирующие свойства и зачастую не требуют смазки [3-4].

Триботехнические материалы классифицируются на фрикционные и антифрикционные. Фрикционные материалы характеризуются коэффициентом трения в пределах 0,2...0,5 и применяются в фрикционных передачах, таких как диски сцепления и тормозные системы. Антифрикционные материалы, напротив, обладают коэффициентом трения до 0,2...0,3 и используются в подшипниках скольжения, торцевых уплотнениях и аналогичных устройствах. Независимо от области применения, триботехнические материалы должны демонстрировать высокую устойчивость к износу. В роли полимерной основы для таких материалов чаще всего выступают полиимида, полиамида, фторопласти, полиарилаты и прочие полимеры, отличающиеся низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и возможностью функционирования в широком температурном диапазоне. Среди рассматриваемых полимеров наибольший интерес представляют композиты на основе ПТФЭ, используемые в узлах трения, благодаря уникальному сочетанию свойств (таблица 1), обусловленному особенностю электронной структуры атома фтора, стабильными ковалентными связями между фтором и углеродом, а также специфическими внутримолекулярными и межмолекулярными взаимодействиями между фторированными фрагментами полимера и основной цепью. ПТФЭ выделяется крайне высокой вязкостью расплава, достигающей уровня порядка 1010 Па при температурах спекания в диапазоне 633-643 К, что определяет его обработку методами порошковой металлургии. Помимо этого, материал демонстрирует низкую поверхностную энергию, минимальную адгезию к любым твердым поверхностям, высокий коэффициент теплового линейного расширения, исключительно низкий коэффициент трения (0,04...0,05 по отношению к стали без смазки) и отличные изоляционные свойства [9-11].

Таблица 1 – Свойства ПТФЭ

Наименование показателя	Значение
Температура плавления,	317...337 °C
Наименование показателя	Значение
Модуль упругости,	550 МПа
Относительное удлинение при разрыве	300...550%
Диэлектрическая прочность,	19,7 кВ/мм
Диэлектрическая постоянная	2
Динамический коэффициент трения	0,04
Поверхностная энергия,	18 дин/Г
Максимальная температура использования	260°C
Показатель преломления	1,35

Тем не менее, промышленные полимерные композиты на основе ПТФЭ обладают ограниченными деформационно-прочностными показателями. В этой связи возникает необходимость в разработке материалов с усиленной полимерной матрицей на основе ПТФЭ для создания триботехнических решений. Таким образом, данная задача представляет собой актуальное направление исследований, имеющее важное научное и прикладное значение.

Для улучшения механических и триботехнических показателей материала, современные исследования всё чаще сводятся к созданию композиционных материалов на основе ПТФЭ с дисперсными наполнителями и армирующими волокнами [3-6].

Существуют разные типы политетрафторэтилена, различающиеся методами модификации. Одно из наиболее перспективных решений – создание дисперсно-наполненных композитов. В роли наполнителей часто выступают разнообразные материалы, такие как оксиды, стекловолокно, углеродные нановолокна и соединения металлов. Эти добавки внедряются в матрицу ПТФЭ в форме, существенно улучшая механические характеристики композита. Так, введение углеродных волокон заметно повышает прочность и жёсткость материала, тогда как стекловолокно усиливает его ударопрочность и термостойкость. Данные композиты проявляют повышенную устойчивость к деформациям, увеличенную износостойкость и долговечность, что имеет решающее значение для эксплуатации в условиях интенсивных нагрузок и трения [6-10].

Применение различных наполнителей подразумевает необходимость учета их воздействия не только на механические параметры, но и на триботехнические характеристики композитов. Например, некоторые добавки способны существенно снизить коэффициент трения, делая композиции более эффективными в условиях минимального износа. Следовательно, правильный подбор наполнителя требует тщательного анализа и экспериментов, что является основополагающим аспектом исследовательской деятельности в этой сфере.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния дисперсных наполнителей на триботехнические характеристики композитов, созданных на основе политетрафторэтилена. Это позволит сформулировать выводы относительно эффективности применения определенных наполнителей в зависимости от специфики предполагаемых областей использования.

Триботехнические свойства полимерных композитов на основе ПТФЭ имеют первостепенное значение для их использования в промышленных секторах, где требуются высокие уровни износостойкости и устойчивости к трению. Следует подчеркнуть, что ПТФЭ изначально характеризуется низким коэффициентом трения, что делает его особенно привлекательным для триботехнических назначений. Тем не менее, внедрение различных наполнителей и армирующих волокон способно существенно повысить его рабочие характеристики [4-5].

Одним из ключевых критериев, рассматриваемых в триботехнике, выступает механическая прочность композитов. Она обычно определяется через такие параметры, как предел прочности на сдвиг, растяжение и модуль упругости. К примеру, включение стекловолокна в структуру композита может увеличить его прочность в разы, обеспечивая большую устойчивость к механическим воздействиям и деформациям. Кроме того, важно, чтобы композиты сохраняли свои прочностные характеристики даже при высоких температурах, поскольку во

многих производственных процессах материалы эксплуатируются в экстремальных условиях [6-7].

Износостойкость – ещё один важный параметр, непосредственно влияющий на долговечность и надёжность триботехнических изделий. Научные данные свидетельствуют, что добавление различных видов наполнителей, таких как углеродные и металлические порошки, может значительно повысить сопротивляемость композитов к износу. При этом стоит учесть, что эффективность каждого наполнителя варьируется, и его воздействие на износостойкость зависит как от конкретного типа добавки, так и от условий эксплуатации материала.

Коэффициент трения является важным показателем, определяющим эффективность функционирования триботехнических соединений. В случае композитов на основе ПТФЭ, по сравнению с исходным полимером, добавление армирующих наполнителей может изменить этот показатель. Как правило, повышение жесткости композита сопровождается увеличением коэффициента трения, хотя в ряде случаев грамотный выбор наполнителя позволяет сохранить низкий коэффициент трения наряду с увеличением прочности [6-9].

Совершенствование триботехнических характеристик требует непрерывного учёта узкоспециализированных требований для разных применений, что стимулирует разработку новых материалов. В этой связи изучение сочетаний различных наполнителей и полимеров является приоритетным направлением для достижения оптимальных показателей, необходимых для эффективной работы в триботехнических системах.

Среди основных категорий наполнителей выделяют:

- минеральные;
- органические;
- металлические;
- углеродные компоненты [4-6].

Каждый из вышеуказанных наполнителей обладает особыми характеристиками и предназначением.

Минеральные наполнители, такие как тальк, каолин или карбонат кальция, нередко применяются для усиления механической прочности и термостойкости композитов. Они способствуют улучшению технологичности обработки полимеров и часто оказываются экономически привлекательными. Например, введение талька может повысить жесткость композита и уменьшить его тепловое расширение. Минеральные наполнители также могут стабилизировать размеры конечных продуктов при термическом воздействии, что делает их популярными в производстве изделий, подверженных значительным температурным колебаниям [6].

Органические наполнители, вроде древесных волокон или бамбуковых нитей, находят применение в создании облегчённых композитов и придают изделиям дополнительные экологические достоинства. Помимо снижения массы, эти добавки улучшают тепло- и звукоизоляционные свойства материала. Однако их применение ограничено из-за меньшей прочности и стойкости к воздействию влаги.

Металлические наполнители, такие как аллюминиевые, медные или стальные порошки, применяются для увеличения прочности, жесткости и теплопро-

водности композитов. Введение металлических компонентов способствует заметному повышению износостойкости материалов, однако каждый вид металла требует тщательной подготовки для обеспечения качественной адгезии с полимерной матрицей. Металлы также могут существенно утяжелять готовое изделие, что не всегда целесообразно [10-11].

Углеродные наполнители, включая нановолокна и нанотрубки, считаются одними из самых многообещающих и инновационных добавок. Их применение способно существенно усилить прочность и модуль упругости композитов при незначительном увеличении массы, что делает их особо ценными в высокотехнологичных областях. Включение углеродных частиц также может существенно сократить коэффициент трения, что особенно актуально для триботехники [5-6].

В данной работе экспериментальное исследование включало серию тестов, направленных на получение данных о механических параметрах, износостойкости и триботехнических показателях композитов с разнообразными наполнителями.

Механические показатели разработанных материалов оценивались в соответствии с требованиями ГОСТ 4651 [1] на универсальной тестирующей установке. Исследование триботехнических характеристик проводилось в рамках стандартов ГОСТ 11629 [2] с применением универсального трибометра. Анализ микроструктуры образцов выполнялся посредством метода сканирующей электронной микроскопии.

В качестве наполнителей для ПТФЭ использовались: ультрадисперсный ПТФЭ (УПТФЭ) с максимальным размером частиц до 5 мкм, углеродные волокна диаметром 9-12 мкм и длиной, не превышающей 500 мкм, а также среднедисперсный (20-40 мкм) стальной порошок с повышенным содержанием углерода (до 0,6%). Данные о составах представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Составы композиционных материалов на основе ПТФЭ**

Состав №	Основа	Добавки
1	ПТФЭ	2 мас.% УПТФЭ
2	ПТФЭ	4 мас.% УПТФЭ
3	ПТФЭ	3 мас.% УВ + 3 мас.% УПТФЭ
4	ПТФЭ	5 мас.% УВ + 4 мас.% УПТФЭ
5	ПТФЭ	15 мас.% порошка
6	ПТФЭ	30 мас.% порошка

Процесс изготовления образцов из предложенных композиций описан стандартной технологией, схема которой представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Общая технологическая схема получения ПТФЭ с различными наполнителями**

Сушка ПТФЭ проводилась при температуре 180 °C, время выдержки – 4 часа. Сушка наполнителя проводилась при температуре 120 °C при времени выдержки – 4 часа.

Результаты исследований показали, что включение УПТФЭ (до 2%) ведет к увеличению жесткости композитов, что проявляется в росте их прочности на растяжение до 10% в матрице ПТФЭ, прироста прочности на сжатие в сравнении с базовым материалом не наблюдалось. Увеличение УПТФЭ (до 4%) в матрице приводит к ухудшению прочностных характеристик.

Добавление металлических наполнителей, существенно усилило прочность и жесткость композитов. Введение стального порошка в объеме до 15% повысило прочность на растяжение до 20%. Увеличение содержания металлического наполнителя до 30% приводит к повышенной плотности состава, что в свою очередь приводит к растрескиванию или разрушению при динамических нагрузках.

Углеродные наполнители, оказали самое значительное влияние на триботехнические свойства полученных составов. Материалы с содержанием 5% УВ в сочетании с 4% УПТФЭ показали увеличение значения прочности на 30% и существенное снижение коэффициента трения до 0,1, что резко улучшило их износостойкость.

Исследование позволило сформировать важные выводы о значимости разработки композитных материалов на основе ПТФЭ и их взаимодействий с разными наполнителями, что оказывает непосредственное влияние на эксплуатационные свойства материалов. Добавление углеродных волокон в качестве наполнителей подтвердило свою результативность, показав уменьшение коэффициента трения, улучшение износостойкости и сохранение прочностных характеристик при деформации. Разработанные композиции могут использоваться в качестве антифрикционных материалов в узлах трения, работающих без использования смазочных материалов, что расширяет сферу их применения.

*Литература*

1. ГОСТ 4651-2014 Пластмассы. Метод испытания на сжатие.
2. ГОСТ 11629-2017 Пластмассы. Метод определения коэффициента трения.
3. Белый В.А., Свириденок А.И., Петрововец М.И. и др. Трение и износ материалов на основе полимеров // Минск: Наука и техника. 1976. 432 с.
4. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие // Томск: Томский политехнический университет. 2013. 118 с.
5. Кропотин О.В. Создание полимерного антифрикционного нанокомпозита на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью // Омский научный вестник. 2013. № 2. С. 86-90.
6. Маркова М.А., Готовцева М.Е. Исследование композитов на основе ПТФЭ и углеродных наполнителей // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. № 1. С. 11-15.
7. Матренин С.В., Овечкин Б.Б. Композиционные материалы и покрытия на полимерной основе // Томск: Томский политехнический университет. 2008. 190 с.
8. Машков Ю.К. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация // М.: Машиностроение. 2005. 240 с.
9. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. // СПб.: Научные основы и технологии. 2010. 822 с.
10. Охлопкова А.А. Разработка технологических приемов управления свойствами композитов на основе политетрафторэтилена, содержащих наномодификаторы // Вопросы материаловедения. 2013. № 1. С. 136-145.
11. Свириденок А.И., Савкин В.Г. Структурная трибомеханика материалов на основе полимеров // Трение и износ. 1980. № 1. С. 150-167.

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
ул.. Октябрьская, 10а  
Тел.: +7 (495) 543-34-30 (доб. 138)

[www.unitech-mo.ru](http://www.unitech-mo.ru)

Формат 100x70/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.-печ. л. 10. Тираж 500 экз.  
Заказ № 3978.

Отпечатано в типографии ИП Копыльцов П.И.  
394086, г. Воронеж, ул. Любы Шевцовой, 34,  
тел.: +7 995 494-84-77, [www.strokivrn.ru](http://www.strokivrn.ru)