

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 – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «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; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, 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.
Багдасарян А.А.
Харитонов А.А.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (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, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Артюшенко В.М.

АНАЛИЗ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ПАКЕТА ОШИБОК В УЗКОПОЛОСНОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ.....3

Воловач В.И., Артюшенко В.М., Строганова С.М.

ОЦЕНКА ЗАЩИТНОГО РАССТОЯНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВ МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ ОТ ПОМЕХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....10

Самаров Е.К.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОШИБОК СВЯЗИ НА КАЧЕСТВО ПОТОКОВОГО ВИДЕО В СЕТЯХ БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА.....26

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Меньшикова Л.В., Яковлев Д.А., Найденова Д.М.

ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ WEB-САЙТОВ.....38

Стреналюк Ю.В., Леандров И.Н.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ, ПОВЫШЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПОВ И КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ СЕТИ (ЧАСТЬ 3).....60

Строганова С.М., Теодорович Н.Н., Шумилин М.П.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА БЕСПРОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ.....67

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аббасова Т.С.

ИНТЕРАКТИВНЫЙ МОБИЛЬНЫЙ ПОМОЩНИК ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКИПАЖА.....84

Антипова Т.Н., Тихонов В.А.

ПРИМЕНЕНИЕ РОБАСТНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ.....92

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. Стрэналок Ю.В., д.т.н., профессор
19. Халиулин В.И., д.т.н., профессор
20. Чесноков А.В., д.т.н.
21. Щурин К.В., д.т.н., профессор

Подписано в печать 20.03.2023

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 13,2

Тираж 500 экз.

Заказ № 95-01

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Мороз А.П., Полехин А.И., Полехина Г.Е., Полехина К.А.
**АНАЛИЗ СВОЙСТВ РЯДОВ ДОПУСТИМЫХ ЧАСТОТ
ОПРОСА ТЕЛЕМЕТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
В СИСТЕМАХ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ
АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....101**

Панин И.Г., Щурин К.В.
**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
МАГНЕТРОНОВ ДЛЯ АКТИВАЦИИ ЖИДКИХ
ДИАМАГНЕТИКОВ.....119**

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Прохоров В.Ю., Фролов С.В., Абрамузов В.В., Токарева О.В.
**УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЙ КОМПОЗИТ КАК
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
НАВЕСНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ.....133**

Соловьев М.Е., Кокарев С.С., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.
**ПРОФИЛЬ ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ НАКЛОННОЙ
ГЕОМЕТРИИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАНЕСЕНИИ
ПОРОШКОВОГО ПОКРЫТИЯ.....152**

Сошина Т.О.
**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ TiN ПОД ВЛИЯНИЕМ МОЩНОСТИ
ИМПУЛЬСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ СИСТЕМЫ.....173**

Спирин Б.Л., Фролов С.В., Абрамузов В.В.
**МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР.....181**

Шахназаров К.Ю., Вологжанина С.А., Хузнахаметов Р.М.
**ОБЪЯСНЕНИЕ АНОМАЛИЙ ФОРМИРОВАНИЯ
СТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.....196**

УДК 621.396

Анализ вероятности появления пакета ошибок в узкополосном канале связи с использованием теории автоматов

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Рассмотрена и проанализирована вероятность появления пакета ошибок в узкополосном канале связи с использованием теории автоматов. Представлена модель, имеющая три состояния, позволяющая определить появление b ошибок в блоке, состоящем из m бит и пропускную способность узкополосного канала связи. Показано, что пропускная способность канала связи может быть представлена как функция от длины пакета данных и числа ошибок, которые могут быть исправлены.

Пакет ошибок, узкополосный канал связи, теория автоматов, вероятность появления пакета ошибок, пропускная способность канала связи.

Analysis of the probability of occurrence of a packet of errors in a narrow-band communication channel using the theory of automata

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of information technologies and control systems, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The probability of occurrence of a packet of errors in a narrow-band communication channel using the theory of automata is considered and analyzed. A model with three states is presented, which makes it possible to determine the occurrence of b errors in a block consisting of m bits and the bandwidth of a narrowband communication channel. It is shown that the bandwidth of the communication channel can be represented as a function of the length of the data packet and the number of errors that can be corrected.

Error packet, narrow-band communication channel, automata theory, probability of occurrence of error packet, bandwidth of the communication channel.

Введение. В цифровых радиоканалах очень важен такой параметр как пропускная способность. Максимальное значение этого параметра позволяет максимально эффективно использовать систему передачи данных [1-3].

Основной задачей канала связи является передача блоков данных и их

защита с применением специальных схем кодеров. Канальные кодеры могут исправлять b бит в последовательности длиной m .

Когда число ошибок превышает число в b бит, происходит искажение принятой информации. Затухание радиоволн может приводить к появлению пачек ошибок.

Очень важно определить количество верно переданной информации и пропускную способность канала связи.

Как известно, пропускная способность определяется как:

$$B = 1 - \sum_{k=b}^m P(k, m), \quad (1)$$

где $P(k, m)$ – вероятность наличия k ошибок в блоке данных длиной m .

Необходимо определить вероятность $P(k, m)$ для оптимизации пропускной способности канала связи.

Вероятность ошибок $P(k, m)$ является функцией, зависящей от характеристик канала связи. Длина пакета ошибок зависит от параметров канала связи и сильно различается для узкополосных и широкополосных каналов связи.

Теория автоматов используется для предсказания ошибок и может быть применена к модели Гильберта-Эллиота, имеющий два состояния. Однако, модель Гилберта-Эллиота достаточно сложно применить к широкополосным каналам связи. Для этой цели лучше всего подходит модель Фричмана, имеющая несколько состояний и позволяющая предсказать появление пачек ошибок.

Из открытых источников известно, что модели Фричмана не способны предсказать поведение ошибок.

В данной работе описано в общих чертах исследование, проведенное с использованием модели Фричмана с тремя состояниями для оценки вероятности $P(b, m)$ применительно к узкополосному каналу связи. Данная работа позволяет расширить подход к моделированию широкополосных каналов связи.

В данной статье содержатся теоретические сведения и результаты компьютерного моделирования, позволяющие оценить предсказание вероятности ошибок связи. Мы также определили зависимости между пропускной способностью канала связи, размером пакета данных и длиной пачек ошибок.

Анализируя полученные результаты можно предсказать вероятность появления пакета ошибок, а также определить пропускную способность канала связи для трех состояний, вероятность изменения состояния и вероятность установившегося режима работы.

Полученные результаты хорошо соотносятся с результатами моделирования.

Опишем в общих чертах теорию автоматов применительно к определению вероятностей ошибок.

Теория автоматов, применительно к определению вероятностей ошибок. Теория автоматов использует граф переходов между ошибочными состояниями. Благодаря этому можно определить вероятность наличия ошибки или вероятность без искажённой передачи данных. На рисунке 1 показано три состояния модели Фричмана, определенных для узкополосного канала.

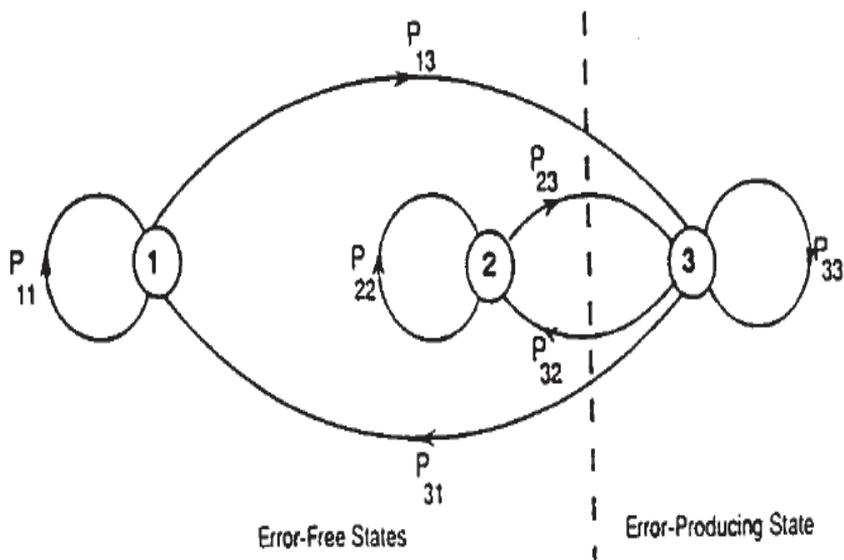


Рисунок 1 – Модель Фричмана с 3 состояниями

Модель Фричмана содержит два ошибочных конечных состояния (А и В), при этом одна ошибка приводит к смене состояния. Единственным ограничением данной модели является то, что переходы осуществляются только между состояниями А и В.

Данной диаграмме соответствует матрица переходных состояний:

$$D \begin{pmatrix} y \\ x \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & P_{13} \\ 0 & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь x – переданный бит, а y – полученный бит. При этом необходимо определить получены неискаженные данные или бит подвергся ошибке.

В теории автоматов матрицу переходных состояний преобразуют таким образом, чтобы матрица переходов $F(z=0/x)$, $F(z=1/x)$ при наличии ошибки z меняла своё состояние.

То есть, если $z = 0$, то никакой ошибки не произошло, если же $z = 1$, то имела место ошибка.

Для оценки матрицы переходных состояний применительно к модели Фричмана с 3 состояниями используются формулы:

$$F(z = 0/x) = \begin{bmatrix} P_{11} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & 0 \\ P_{31} & P_{32} & 0 \end{bmatrix};$$

$$F(z = 1/x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & P_{13} \\ 0 & 0 & P_{23} \\ 0 & 0 & P_{33} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Теория автоматов позволяет определить вероятность появления последовательности ошибок w^n при ошибочной передаче слова u^n (n – число бит), а, следовательно, определить вероятность перехода в новое состояние

$$P(w^n, u^n) = \sigma F(z_1/x)F(z_2/x)F(z_3/x)F(z_n/x), \quad (4)$$

где σ – это распределение вероятности $P(w^n, u^n)$.

Если изменение состояния не зависит от переданной последовательности данных, то вероятность ошибки будет определяться как:

$$P(w^n) = \sigma F(z_1/x)F(z_2/x)F(z_3/x)F(z_n/x), \quad (5)$$

Вероятность появления ошибки $P(1)$ после m верных переходов после ошибки $P(0^m/1)$ равна:

$$P(1) = \sigma F(z = 1/x), \quad (6)$$

$$P(1/0^m) = P\left(\frac{0^m}{1}\right) P(1). \quad (7)$$

Отсюда:

$$P\left(\frac{0^m}{1}\right) = \frac{\sigma F(z=1/x)(F(z=0/x))^m \epsilon}{\sigma F(z=1/x)\epsilon}. \quad (8)$$

Данное уравнение может быть упрощено, если вероятность $P(0^m/1)$ выразить через вероятности изменения всех трех состояний модели Фричмана:

$$P\left(\frac{0^m}{1}\right) = \left(\frac{P_{31}}{P_{11}}\right) P_{11}^m + \left(\frac{P_{32}}{P_{22}}\right) P_{22}^m. \quad (9)$$

Функция $f(k)$ является вероятностью возвращения в первое состояние:

$$f(k) = P(0^{k-1}/1) - P\left(\frac{0^k}{1}\right) = P(0^{k-1}1/1). \quad (10)$$

Используя выше выведенные уравнения можно определить вероятность появления b ошибок в последовательности, состоящей из m бит:

$$\begin{aligned} P(b, m) = & \left(P_3 P_{31} P_{11}^{m-b-2} \left(2P_{11} + (m-b-1)P_{31} + \frac{2P_{32}P_{11}}{P_{11}-P_{22}} \right) + \right. \\ & \left. + P_3 P_{32} P_{22}^{m-b-2} \left(2P_{22} + (m-b-1)P_{32} - \frac{2P_{31}P_{22}}{P_{11}-P_{22}} \right) \right) \times \\ & \times \sum_{r=1}^{b-1} M(r, b-1) \end{aligned} \quad (11)$$

Для $2 \leq b \leq m$:

$$P(1, m) = \left(P_3 P_{31} P_{11}^{m-3} \left((m-2) P_{31} + \frac{2P_{32}P_{11}}{P_{11}-P_{22}} \right) + \right. \\ \left. + P_3 P_{32} P_{22}^{m-3} \left((m-2) P_{32} - \frac{2P_{31}P_{22}}{P_{11}-P_{22}} \right) \right). \quad (12)$$

Для $b = 1$, в противном случае определяется вероятность отсутствия ошибок:

$$P(0, m) = P_1 (P_{11})^{n-1} + P_2 (P_{22})^{n-1}. \quad (13)$$

Здесь P_3 – вероятность установившегося режима, соответствующая переходу в третье состояние модели Фричмана, а $M(r, l)$ – вероятность наличия r ошибок в блоке данных длиной l бит.

Эта вероятность определяется из выражения:

$$M(r, l) = \sum_{j=r-1}^{b-1} M(r-1, j) f(l-j) \text{ where } M(1, l) = f(l). \quad (14)$$

На основании выше изложенного была написана программа для моделирования на компьютере, в которой описано три состояния модели Фричмана. Были определены вероятности перехода из одного состояния в другое.

Моделирование проводилось для случайно выбранного состояния. Смена состояний происходила в соответствии с вычисленными вероятностями. Ошибка происходила при моделировании в состоянии 2. Зарегистрированные ошибки были сохранены в отчете.

Был выбран промежуток длиной M бит, в котором вероятность возникновения ошибки минимальна. Каждый раз при возникновении ошибки в интервале $a...b$ внутренний счетчик увеличивался на единицу.

На рисунке 2 представлены результаты сравнения теоретических (сплошная линия) и эмпирических (пунктирная линия) расчетов.

Вероятность наличия b бит в блоке данных длиной m бит измерена в процессе моделирования. Мы определили пропускную способность канала связи при успешной передаче сообщений с использованием схем кодирования информации. Мы также определили вероятность $P(b, m)$ с помощью уравнения 11. Полученные результаты хорошо сочетаются с теоретическими выкладками.

Выводы. В данной работе описан метод, позволяющий определить пропускную способность канала связи при условии безошибочной передачи сообщений. Были определены вероятности появления пачек ошибок. Результаты измерений получены для трех состояний модели Фричмана.

Результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими данными. Было доказано, что любой другой метод определения вероятностей появления пачек ошибок и вычисления пропускной способности канала занимает в 2-3 раза больше времени. Показано, что данный метод весьма точен. Однако он имеет ряд недостатков, в первую очередь, связанных с оценкой параметров узко-

полосных каналов связи.

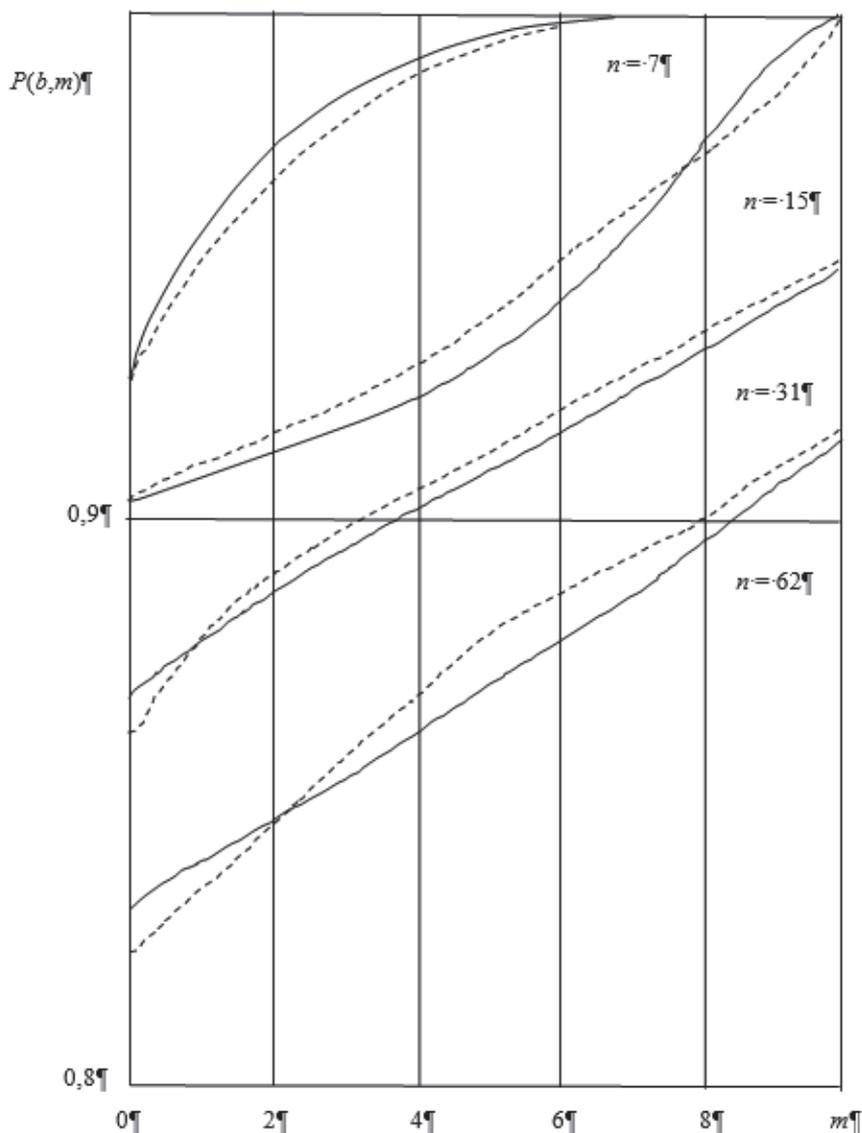


Рисунок 2 – Сравнение теоретических и эмпирических результатов

В настоящее время проводятся исследования, направленные на определение вероятностей ошибок и пропускной способности канала на основании методов, разработанных для широкополосной связи. Можно определить вероятности ошибок с помощью импульсной характеристики канала связи. При этом необходимо применение специальных алгоритмов, позволяющих ослабить влияние межсимвольной интерференции.

Литература

1. Артюшенко В.М., Шелухин О.И., Афонин М.Ю. Цифровое сжатие видеоинформации и звука: Учебное пособие / Под ред. В.М. Артюшенко. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2003. 426 с.
2. Kittel L. «The Set-up & use of Generative Stochastic Channel Models for Mobile Radio Data Communications» IEEE International Conference on Communications 1982, pp 2П.4.1-2П.4.5.
3. Kanal L.N. & Sastry A.R.K. «Models for Channels with Memory As Their Application to Error Control» Proc. IEEE July 1978. Vol. 66 No 7.

УДК 621.31

Оценка защитного расстояния для устройств малого радиуса действия от помех радиоэлектронных средств

В.И. Воловач, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования,
Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти,

В.М. Артюшенко, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,

С.М. Строганова, старший преподаватель кафедры
«Информационные технологии и управляющие системы»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В работе приводится методика расчета защитного расстояния от помех радиоэлектронных устройств, приводящих к блокированию беспроводных устройств малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Показано, что с увеличением рабочего цикла источника помех, для недопущения блокировки УМРД должны возрасти не только значения отношения сигнал-шум, но и защитные расстояния.

Беспроводные устройства малого радиуса действия, отношение сигнал-шум, защитные расстояния, рабочий цикл устройств.

Evaluation of the protective distance for short-range devices against interference from electronic equipment

V.I. Volovach, doctor of technical Sciences, associate Professor,
head of the Department «Information and electronic service»,
State budgetary educational institution of higher education
Volga region state University of service, Tolyatti,

V.M. Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,
head of the Department of information technologies and control systems,

S.M. Stroganova, senior teacher of information technology
and management systems department,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article presents a method for calculating the protective distance from interference of electronic devices, leading to blocking of short-range wireless devices with pseudo-random tuning of the operating frequency. It is shown that with an in-

crease in the operating cycle of the interference source, in order to prevent blocking of the MRRD, not only the values of the signal-to-noise ratio, but also the protective distances should increase.

Short range wireless devices, signal-to-noise ratio, protection distances, device duty cycle.

Защитное расстояние УМРД с ППРЧ

Рассмотрим систему устройств малого радиуса действия, использующей скачкообразную перестройку частоты (ППРЧ), под воздействием помех окружающих радиоэлектронных средств, в которых реализуется аналогичный метод псевдослучайной перестройки рабочей частоты. В таблице 1 приводятся оценки (по данным работы [3]) защитных расстояний для беспроводных устройств малого радиуса действия, при воздействии разных источников помех.

Таблица 1 – Защитные расстояния от разных источников помех для Bluetooth-устройств [3]

Источники помех	Рабочий цикл, %	Характер помех	Защитное расстояние, м
SRD, CATV	100	Внутриканальные	35,7
RLAN, DSSS	100	Внутриканальные	44
Узкополосные SRD	100	Блокирование	1,5
RLAN, FHSS	100	Блокирование	4,9
RFID, FHSS	100	Блокирование	24,3

Значение рабочего цикла источников помех, равное 100%, означает, что источники работали непрерывно в течение суток. Однако, как показано в работе [10], рабочий цикл источника помех обычно составляет порядка 15%.

Вероятность внутриканальной помехи $P_{\text{вн-п}}$ может быть представлена согласно работе [10] в виде следующей формулы:

$$P_{\text{вн-п}} = DN_{\text{ч}}^{-1}$$

где: D – рабочий цикл устройства; $N_{\text{ч}}$ – число скачков частоты.

На рисунке 1 показан график зависимости вероятности помехи от РЦ. Рабочий цикл определяет работу устройства, создающего помехи. При уменьшении рабочего цикла вероятность падает.

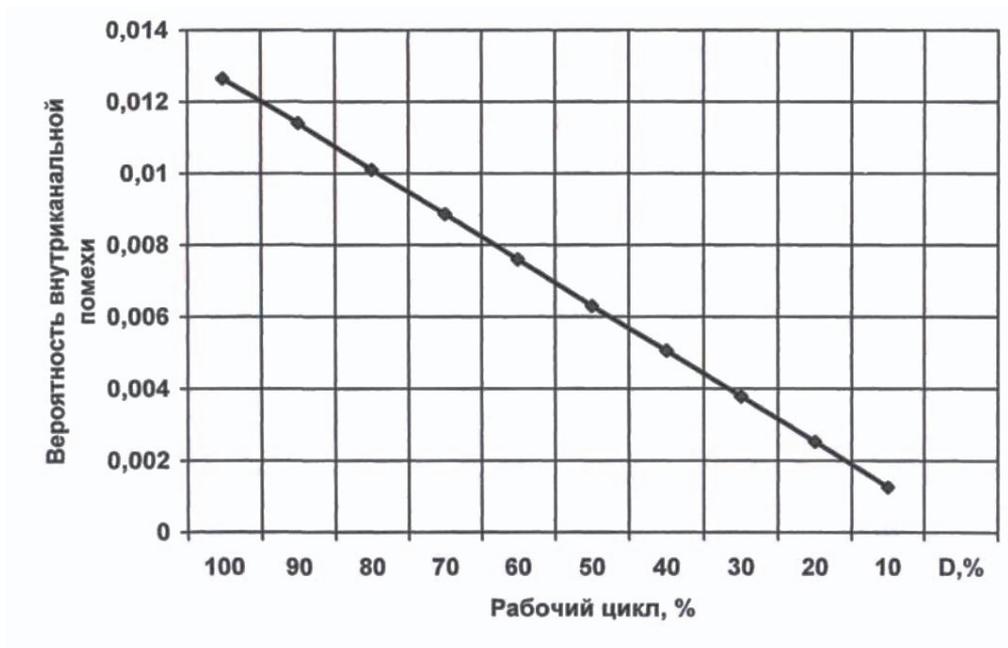
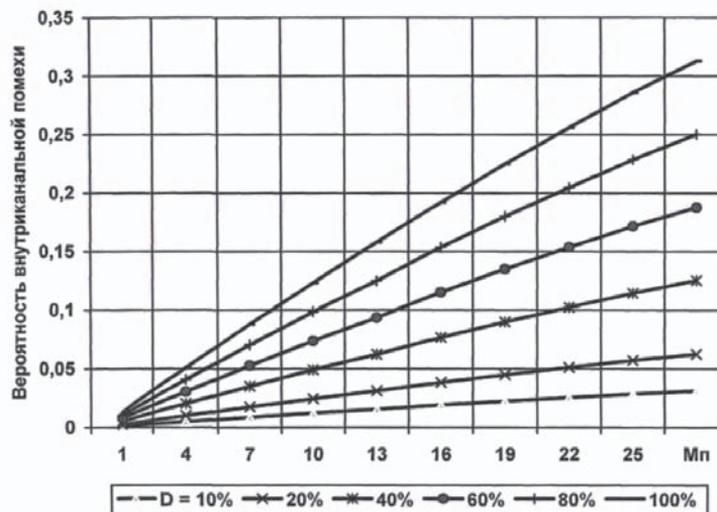


Рисунок 1 – Зависимость вероятности ВП от РЦ

ВВП $P_{\text{вн.п}}$ от нескольких источников может быть представлена согласно работе [89] в виде следующей формулы:

$$P_{\text{вн.п}} = D(1 - [(N_{\text{ч}} - 1)N_{\text{ч}}^{-1}])^{M_{\text{п}}}$$

На рисунке 2 показана зависимость ВВП от N для разных значений рабочего цикла. Чем больше количество помех, тем больше ВВП.

Рисунок 2 – Зависимость ВВП от N для разных значений рабочего цикла

Величина РЦ и мощность РЭС также влияют на значение защитного расстояния для устройств малого радиуса действия с ППРЧ. На рисунке 3 показана математическая модель зависимости защитного расстояния УМРД с ППРЧ от рабочего цикла радиоэлектронных устройств для разных величин их мощности. При этом считается, что внутриканальная помеха отсутствует, т.е. 90% спектра не подвергается воздействию помех. Таким образом пропускная способность РЭС не меняется.

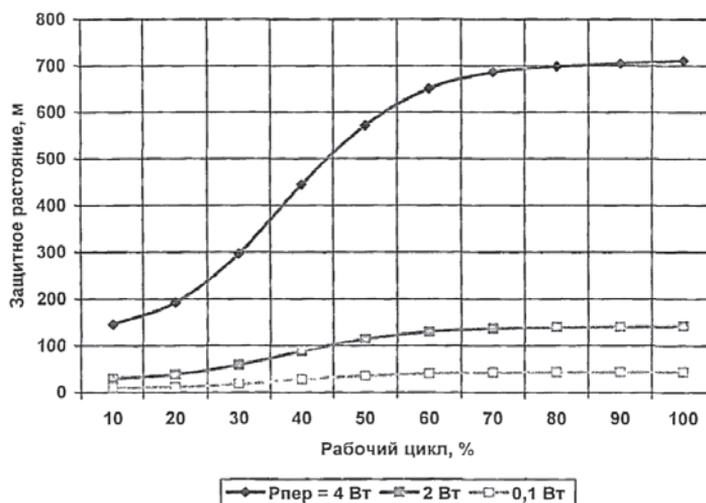


Рисунок 3 – Зависимость защитного расстояния от рабочего цикла

Защитное расстояние для УМРД с ППРЧ

Обычно УМРД по мощности значительно ниже, чем окружающие РЭС, которые оказывают помехи на работу УМРД. Например, мощность передатчика RFID примерно 4Вт. Поэтому возникает угроза возникновения блокировки для УМРД от помех. Если рабочий цикл RFID-устройств составляет 100%, то, для защитного расстояния для беспроводных устройств малого радиуса действия составляет примерно 24 метра [4]. Отношение СШ при этом составляет порядка 33 дБ.

Поскольку минимальные значения отношения сигнал-шум зависят от величины РЦ и вида передающего устройства, то должно меняться и защитное расстояние для УМРД. Когда увеличивается рабочий цикл устройства, вызывающего помехи, для увеличивается величина отношения сигнал – шум и соответственно увеличивается защитное расстояние для радиоустройств. На рисунке 3 представлены кривые зависимости минимумов ОСШ и величин защитного расстояния УМРД от рабочего цикла (Мощность устройств составляет порядка 4 Вт) [3; 9].

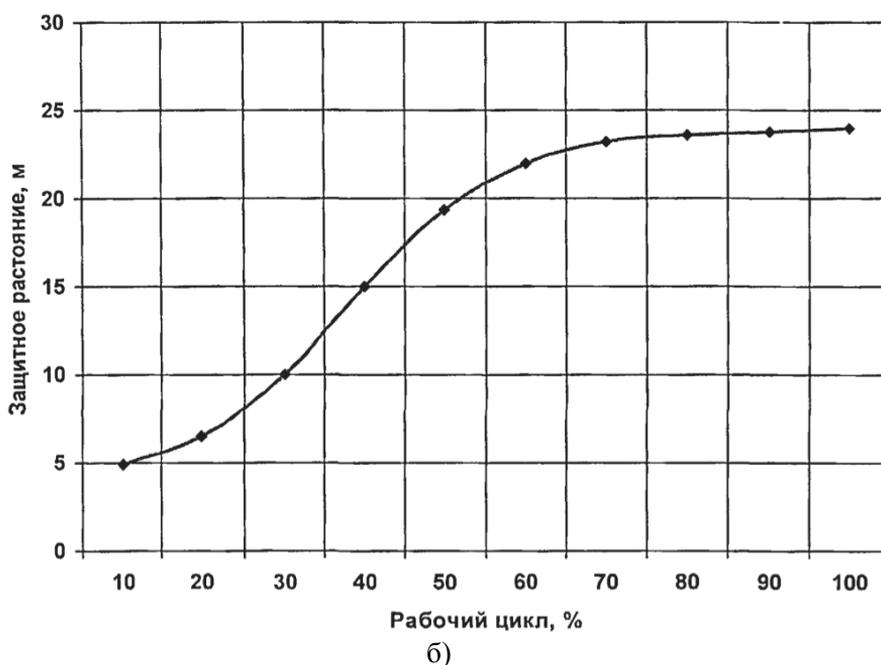
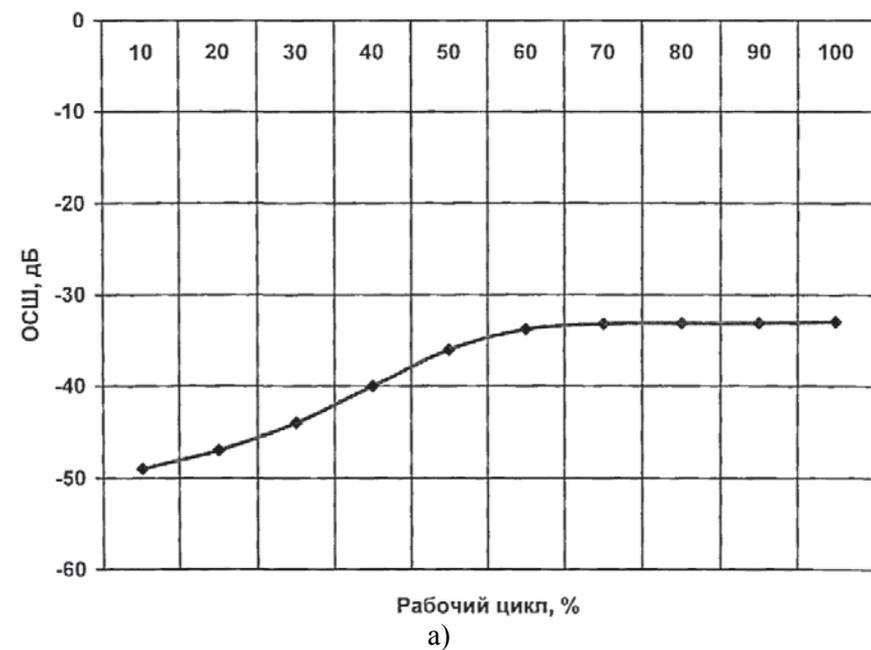
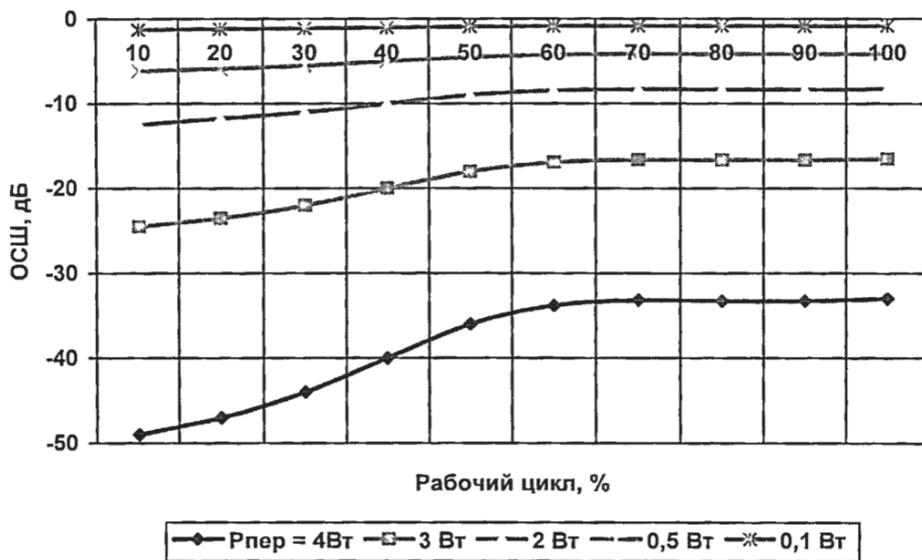


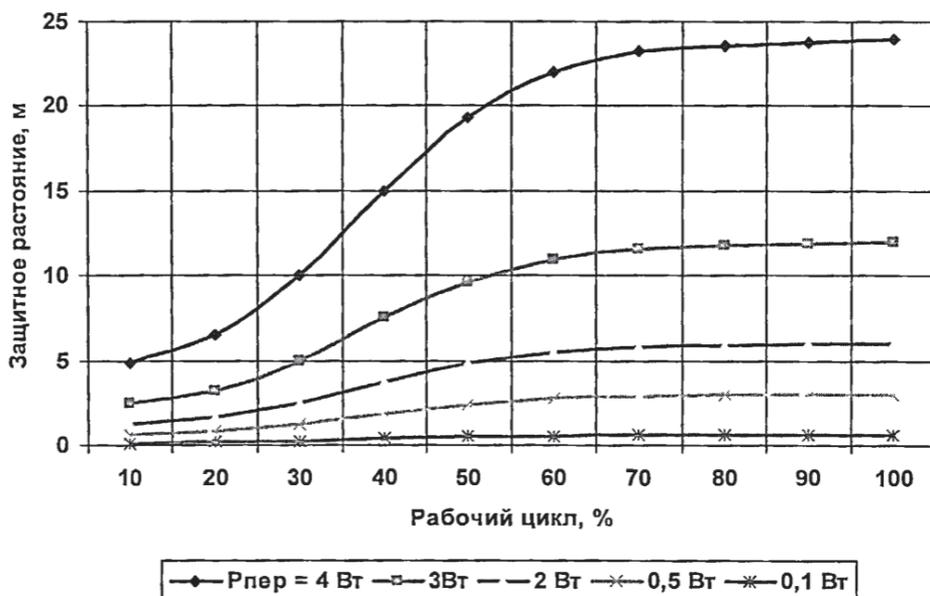
Рисунок 3 – а) – Зависимости минимумов ОСШ от рабочего цикла;
б) – Зависимости величин защитного расстояния в зависимости от рабочего цикла

Таким образом, можно сделать вывод, что когда мешающее устройство работает больше чем на 70% от минимум ОСШ, то защитное расстояние практически остается постоянным и не меняется. Когда рабочий цикл составляет порядка 15% защитное расстояние функционирует при низких ОСШ.

Рассмотрим на примере математического моделирования случай, когда для помех с радиоустройств при воздействии на УМРД нет препятствий. На рисунке 4 показана зависимость минимум ОСШ от рабочего цикла. Аналогично в соответствии с рисунком 4б показаны аналогичные оценки для УМРД с ППРЧ. Видно, что, когда растет величина рабочего цикла, растут и значения защитного расстояния и ОСН.



а)



б)

Рисунок 4 – а) – Зависимость минимума ОСШ от рабочего цикла;
б) – Зависимость величины защитного расстояния от рабочего цикла
(разные мощности передатчика)

На защитное расстояние также влияют мощности устройств РЭС, которые оказывают шумовое воздействие. На рисунке 5 показана зависимость защитного расстояния от рабочего цикла. Когда мощность устройств, вызывающих помехи, растет, то защитное расстояние тоже увеличивается. Для одинаковых значений рабочего цикла.

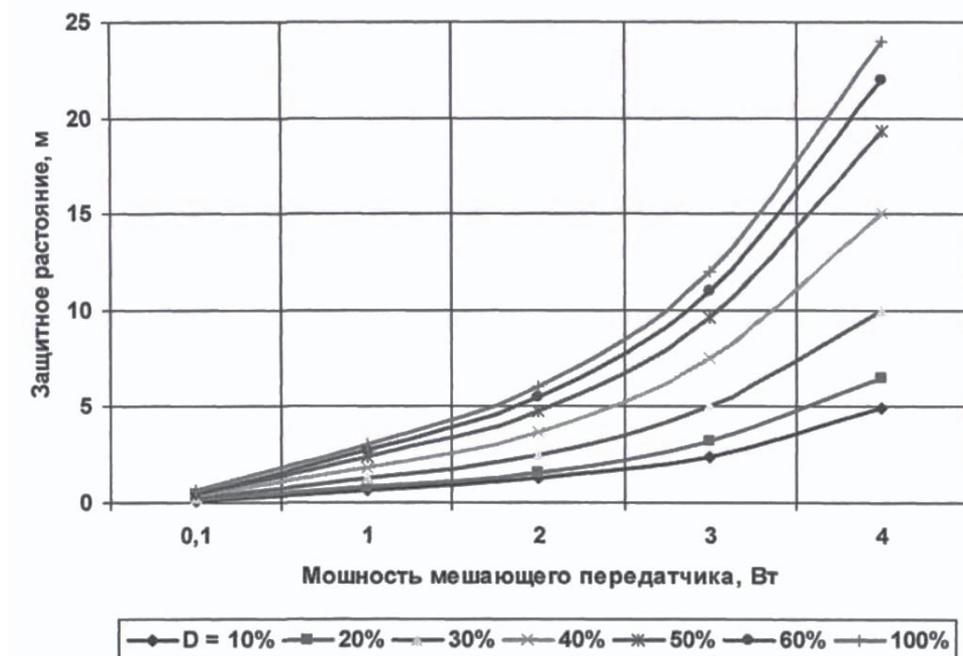


Рисунок 5 – Зависимость ЗР от величины мощности РЭС

Учет диаграммы направленности мешающих радиоэлектронных устройств

При наличии препятствий внутри помещения (стен, потолка и пола), нужно рассматривать диаграмму направленности устройств, вызывающих помехи. При этом необходимо рассматривать как главные направления, так и направления боковых лепестков. На рисунке 6 представлена диаграмма направленности.

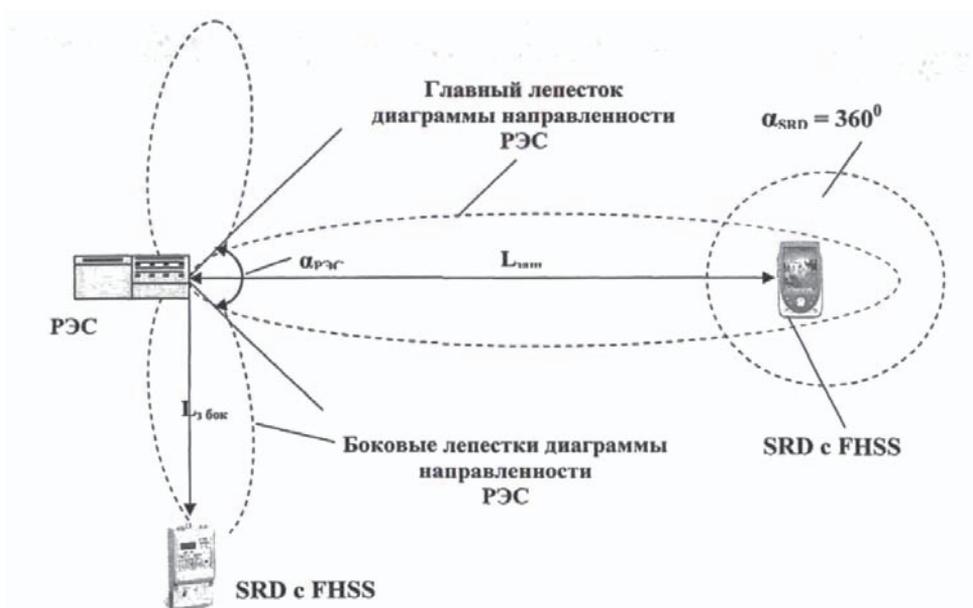
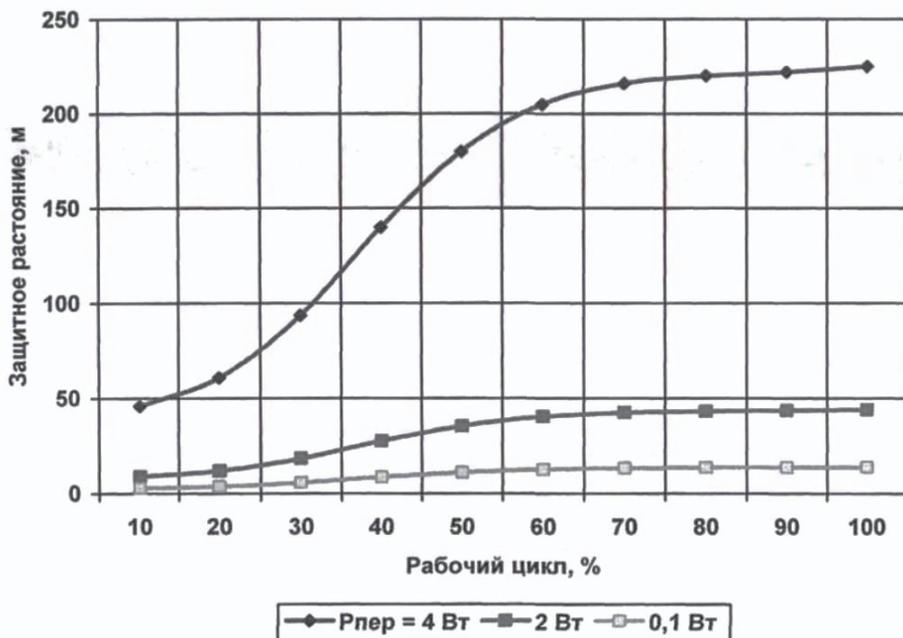


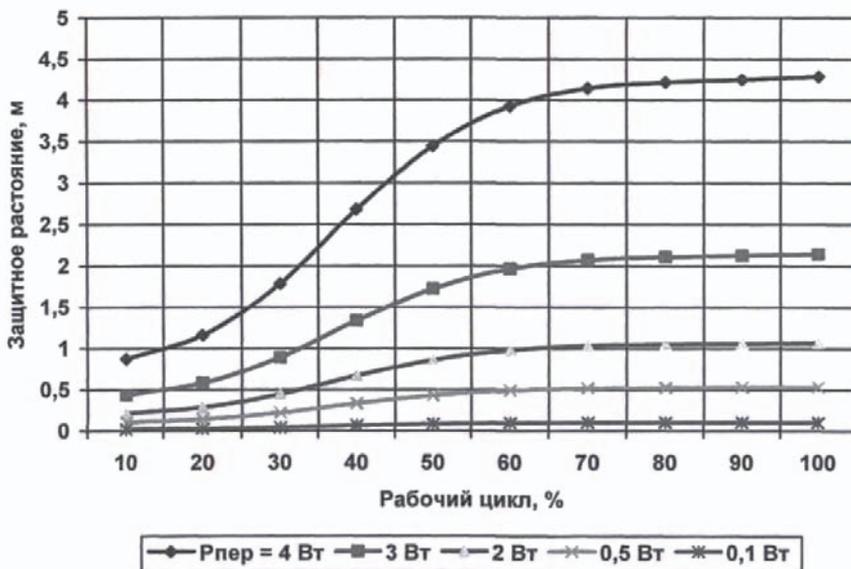
Рисунок 6 – Схема диаграммы направленности при совместном размещении РЭС и УМРД с ППРЧ [42]

Как показывают экспериментальные исследования [42], если рабочий цикл мешающего устройства составляет 100%, то защитное расстояние меньше, если воздействовать не через основной лепесток диаграммы направленности (ДН), а через боковые.

На рисунке 7 показаны оценки математического моделирования для расчета ЗР от величины РЦ, когда возникает блокирование УМРД. Показано воздействие через боковые лепестки ДН. На рисунке дается зависимость мощности РЭС от РЦ.



а)



б)

Рисунок 7 – Защитное расстояние в зависимости от РЦ мешающего устройства:
 а) – Возникновение вертикальных помех от воздействия на боковой лепесток;
 б) – Блокирования от воздействия на боковой лепесток

Из рассмотренных рисунков видно, что, снижение значений защитного расстояния обусловлено воздействием устройства, создающего помехи через боковые лепестки диаграммы направленности, когда мешающее устройство воздействует через боковые лепестки диаграммы направленности [7].

Интермодуляционная составляющая помехи в сети беспроводных УМРД с ППРЧ

Оценим вероятность интермодуляционной составляющей помех в пико-сети УМРД с ППРЧ, которая может возникнуть при определенной разности частот, поскольку в оборудовании радиоэлектронных устройств одушевляется метод ППРЧ скачкообразной перестройка частот. В качестве примера рассмотрим Bluetooth-устройства. Согласно стандарту протокола Bluetooth, [2], для помехи порядка 39дБ два УМРД могут генерировать помехи такого же уровня для каждого из передатчиков. Для модели потери уровня сигнала защитной расстояние должно быть примерно 35 м, а защитная область 3848 м². Для частот, которые лежат ниже и выше полосы пропуская УМРД можно рассчитать вероятность появления помех по формуле:

$$P_{B2} = 2N_k^{-1} = 2/79 = 2,53 \times 10^{-2}$$

где N_k – число частотных каналов.

На рисунке 8 показана зависимость вероятности того, что совпадут направления главного луча помехи и диаграммы направленности помех для устройства малого радиуса действия с ППРЧ. Оценка значения вероятности может быть получена по формуле:

$$P_{PЭС} = \alpha_{PЭС} / \alpha_{SRD}$$

здесь: $\alpha_{PЭС}$ и α_{SRD} – угол диаграммы направленности между приемником и источником помех, равный 360°.

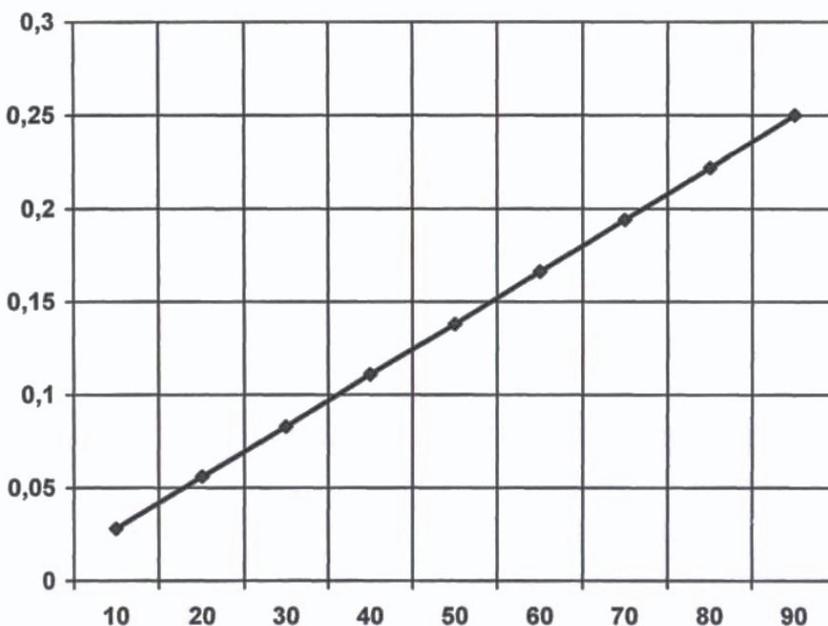


Рисунок 8 – Вероятность совпадения главного луча в от угла диаграммы направленности источника и приемника

Как видно, при возрастании величины угла диаграммы направленности антенны источника вероятность совпадения главного луча возрастает. Вероятность возникновения помех 3-го порядка определяется из выражения:

$$P_{ВЗ} = 1 - (1 - P_{В2}P_{РЭС}P_{Т.РЭС})^{M_{РЭС}}$$

где $P_{Т.РЭС}$ – вероятность совпадения времени действия приемника и источника; $M_{РЭС}$ – число РЭС, лежащих на расстоянии меньшем защитного интервала.

На рисунке 9 представлена зависимость вероятности помех от количества РЭС, вызывающих эти помехи.

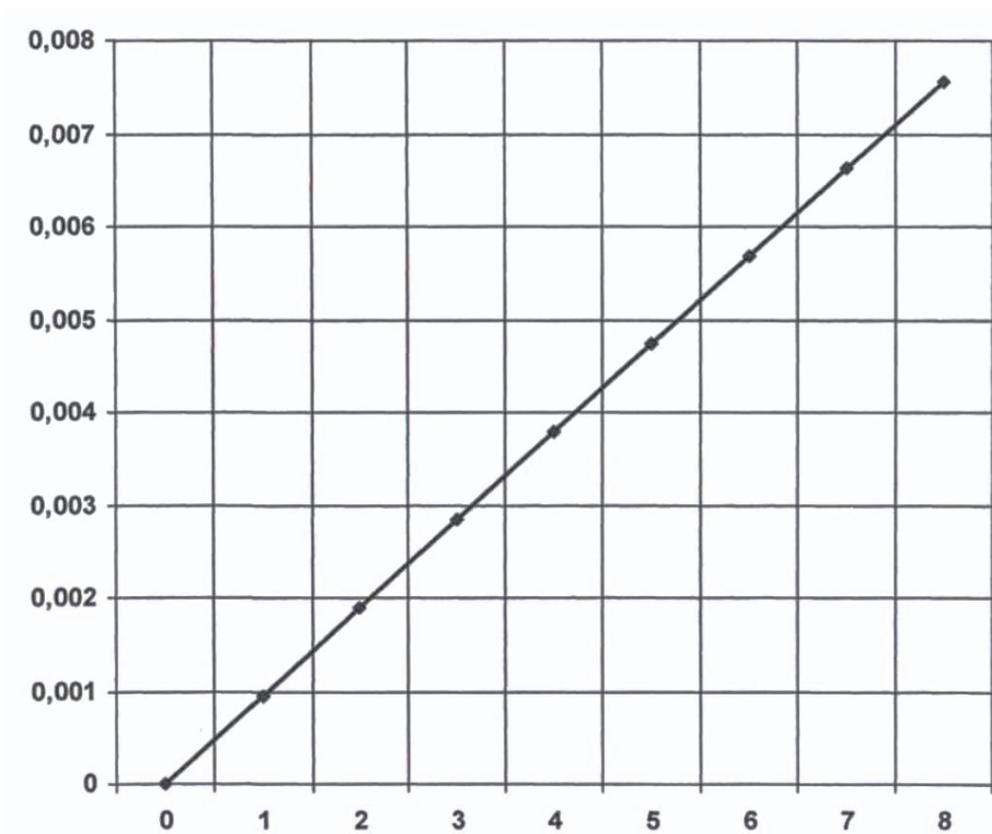


Рисунок 9 – Зависимость вероятности помех от числа РЭС

Как видно, вероятность растет с увеличением числа РЭС, вызывающих помехи в пикосети УМРД.

Для случая «горячей точки», когда на единице площади располагается большое число РЭС, вызывающих помехи в сети УМРД, можно оценить вероятность по формуле [9]:

$$M_{РЭС} = S_{защ} \times K_3 = 3848 \times 2 \times 10^{-3} = 7,7.$$

где: $K_3 = 2 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ – коэффициент плотности в «горячей точке», максимум вероятности помех 3-го для $P_{Т.РЭС} = 0,15$ ($D = 0,15$) и $\alpha_{РЭС} = 90^\circ$, будет определяться выражением:

$$P_{ВЗ} = 1 - (1 - 2,53 \times 10^{-2} \times 0,25 \times 0,15)^{7,7} = 7,28 \times 10^{-3}$$

В первом приближении вероятности помех более высокого порядка значительно меньше, поэтому ими можно пренебречь в первом приближении. Таким образом зависимость общей вероятности помех от числа РЭС, вызывающих эти помехи, можно рассчитать по формуле:

$$P(m_{РЭС}) = M_{РЭС}! [m_{РЭС}! (M_{РЭС} - m_{РЭС})!]^{-1} (P_{РЭС} P_{Т.РЭС})^{m_{РЭС}} \times (1 - P_{РЭС} P_{Т.РЭС})^{M_{РЭС} - m_{РЭС}}$$

На рисунке 10 показаны кривые зависимости вероятности $P(m_{РЭС})$ от числа мешающих радиоустройств, которые начинают работать одновременно в пикосети УМРД с ППРЧ на расстоянии, не превышающим величину защитного интервала.

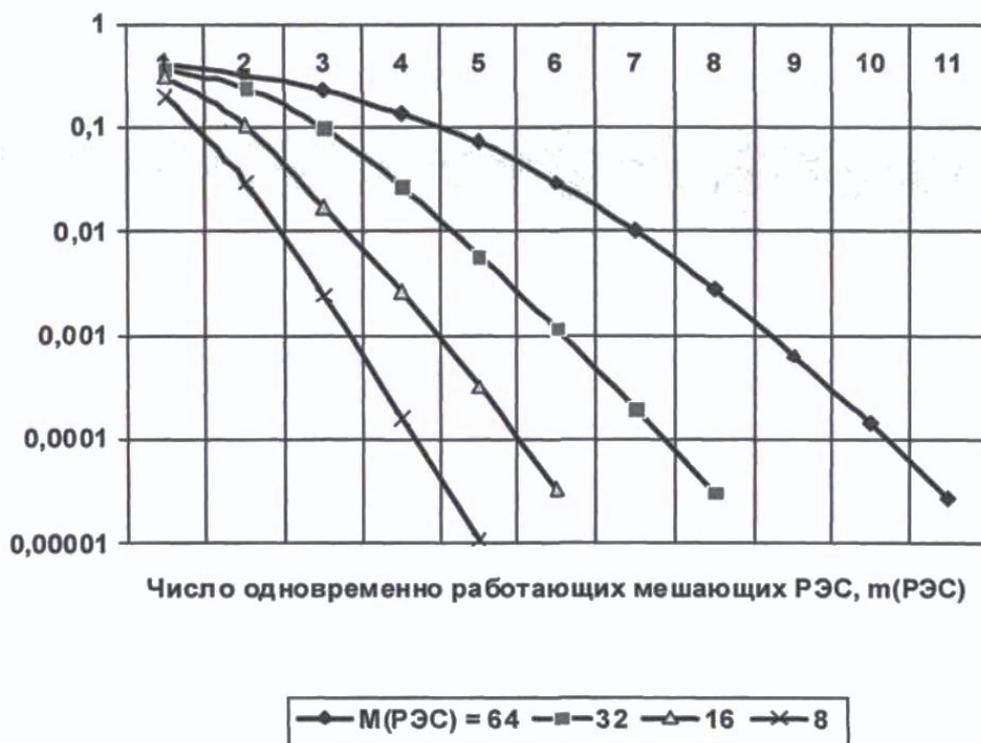
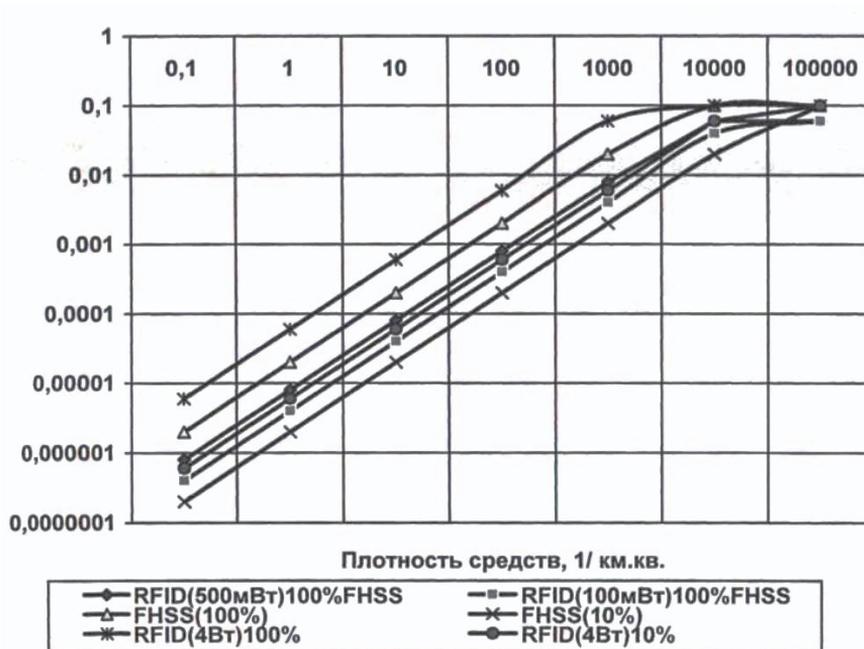
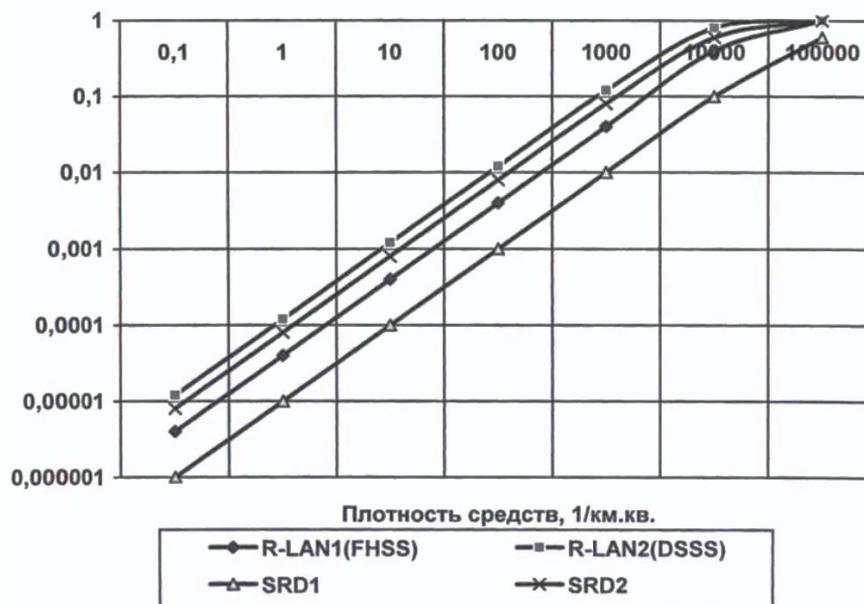


Рисунок 10 – Зависимость вероятности помех от числа РЭС m

На рисунках 11 и 12 представлены результаты компьютерного моделирования.

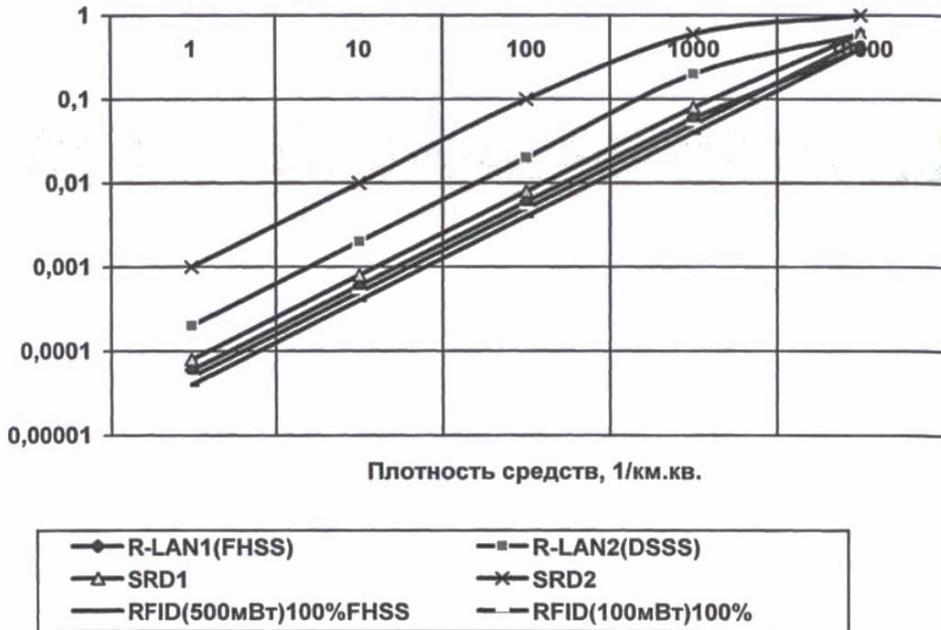


а)

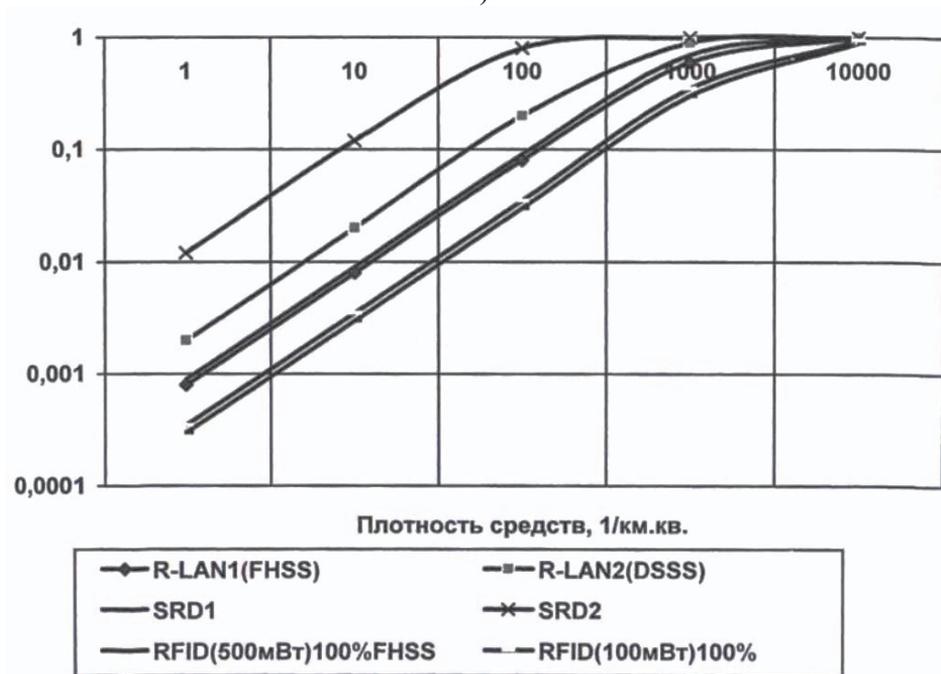


б)

Рисунок 11 – Вероятность помех в зависимости от плотности РЭС:
а) – ППРЧ; б) – УМРД



а)



б)

Рисунок 12 – Вероятность помех в зависимости от плотности РЭС:
а) – 1 мВт; б) – 100 мВт

Таким образом, вероятность помех растет с ростом числа устройств, вызывающих помехи на единицу площади. Диапазон работы устройств 2,45 Гц.

При этом растет и вероятность суммарной помехи. Чем больше мощность устройств, вызывающих помехи, тем больше вероятность помех. И чем меньше мощность УМРД устройств, тем вероятность помех тоже больше. Рабочий цикл также оказывает влияние на вероятность помех. Полученные зависимости согласуются с результатами, рассмотренными в работах [3; 9].

Выводы

1. Получены оценки вероятности многоканальной помехи, показан рост вероятности с увеличением числа радиоэлектронных устройств и рабочего цикла мешающих радиоустройств.

2. Предложена методика расчета защитного расстояния для пикосети УМРД с ППРЧ, которая приводит к блокированию приемников. Чтобы не возникло блокировки приемных УМРД с ППРЧ при увеличении рабочего цикла требуется увеличение значений отношения сигнал/шум и защитные расстояния.

3. Показано, что защитный интервал может быть уменьшен в 3 раза в случае бокового лепестка и в 5 раз при блокировке для мешающих устройств, работающих с 100% рабочим циклом.

4. Получены оценки вероятности помех в рабочем диапазоне частот УМРД, которые зависят от мощностей источника и приемника.

5. Показана зависимость суммарных помех от рабочего цикла РЭС, вызывающих помехи и устройств-приемников. Вероятность помех растет с увеличением рабочего цикла РЭС.

Литература

1. Артющенко В.М., Корчагин В.А. Оценка влияния электромагнитных помех радиоэлектронных средств на беспроводные устройства малого радиуса действия // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т. 6. № 2. С. 14-20.
2. Артющенко В.М., М. Med Tayeb Laskri, Григорьян И.В. Организация связи и технические характеристики технологии Bluetooth / Информационные технологии в XXI веке. Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. М., 2013. С. 109-113. 10.
3. Васехо Н.В., Дудуки С.Н., Тихвинский В.О. Особенности использования и проблемы обеспечения ЭМС технологии BLUETOOTH // Мобильные системы. 2012. № 4. 28.
4. Зяблов Д.С., Григорьян И.В. Электротехнический расчет защитного расстояния от блокирования приемных устройств малого радиуса действия / Научные исследования в области информационных технологий: Сборник докладов на международных конференциях МГУС в 2003 году. М., 2003. С. 8-11. 42.
5. Коняев А.К. Обеспечение радиопокрытия в DECT-системах // Мобильные системы. 1999. № 9. С. 34-39.
6. Корчагин В.А. Электромагнитная совместимость беспроводных устройств малого радиуса действия // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т 6. № 1. С. 12-18.

7. Корчагин В.А. Электромагнитная совместимость беспроводных устройств малого радиуса действия // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т. 7. № 1. С. 12-18. 47.
8. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1995. 264 с.
9. Compatibility of Bluetooth with other existing and proposed Radio communication Systems in the 2.45 GHz frequency band. – ERC Report 109, October 2001. 85.
10. ERC Decision of 12 March 2001 on harmonized frequencies, technical characteristics and exemption from individual licensing of Non-specific Short Range Devices operating in the frequency band 2400-2483.5 MHz (ERG/DEC/(01)05). 89.

УДК 621.396

**Анализ воздействия ошибок связи на качество потокового видео
в сетях беспроводного доступа**

Е.К. Самаров, доктор технических наук,
Проректор по стратегическому развитию и цифровой трансформации,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Влияние ошибок связи особенно сильно сказывается на работе протоколов верхнего уровня модели OSI. Данное утверждение применимо к беспроводным сетям, в которых имеет место корреляция ошибок и их объединение в пакеты. Проанализируем воздействие специфических свойств канала связи на качество передаваемого потокового видео. Рассмотрим протоколы H.264/AVC применительно к сети UMTS. Сравним результаты моделирования воздействия взвешенных ошибок на качество потокового видео для каналов с памятью и без памяти. Полученные результаты свидетельствуют о том, что корреляция ошибок, присутствующих на канальном и сетевом уровне модели OSI не оказывает влияния на качество потокового видео. При использовании протокола IP вероятность ошибки в пакете остается неизменной.

Протокол верхнего уровня модели OSI, канал связи, качество потокового видео, беспроводный доступ.

**Analysis of the impact of communication errors on the quality of streaming
video in wireless access networks**

E.K. Samarov, Doctor of Technical Sciences, Vice-Rector for Strategic Development and Digital Transformation,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The impact of communication errors has a particularly strong effect on the operation of the OSI model's top-level protocols. This statement applies to wireless networks in which there is a correlation of errors and their integration into packets. Let's analyze the impact of the specific properties of the communication channel on the quality of the transmitted streaming video. Consider the H.264/AVC protocols as applied to the UMTS network. Let's compare the results of modeling the impact of weighted errors on the quality of streaming video for channels with and without memory. The results obtained indicate that the correlation of errors present at the channel and network level of the OSI model does not affect the quality of streaming video. When using the IP protocol, the probability of an error in the packet remains unchanged. yandex translator.

OSI model top-level protocol, communication channel, video streaming quality, wireless access.

Введение. Большинство каналов связи работают при маленькой вероятности появления ошибок. Ошибки возникают из-за эффектов переизлучения, межсимвольной интерференции, также сказываются корреляционные свойства сигналов. В 1960 году Гильберт провел ряд исследований, направленных на построение моделей каналов с ошибками. Им была предложена модель Маркова с двумя состояниями, одно из которых приводило к ошибке, а другое было безошибочным. Вероятность возникновения ошибки в «плохом» состоянии всегда больше 0. Указанная модель была несколько улучшена в работе, предложенной Эллиотом. Теперь к ошибкам приводили и «хорошие» состояния. Модель Фричмана позволяет использовать больше одного «безошибочного» состояния. Существуют и другие модели, построенные на основе цепей Маркова, позволяющие учитывать при моделировании специфические свойства радиолиний.

Специфические ошибки, возникающие в радиолиниях, существенно влияют на работу различных методов и алгоритмов передачи данных. Особенно сильно корреляция ошибок сказывается на работе высокоуровневых протоколов.

Рассмотрим воздействие ошибок на качество потокового видео, передаваемого в беспроводных сетях. Сосредоточим своё внимание на протоколе H.264/AVC.

В различной литературе описано множество возможных моделей каналов связи с ошибками. Например, модели каналов с памятью использовались для оценки передачи видеосигналов по сети UMTS DCH. Результаты моделирования показали, что в этой сети присутствуют некоррелированные пакеты с ошибками. Однако, это предположение противоречит ранее полученным результатам. Так, например, в [1] приведена модель Гильберта, представляющая собой цепь Маркова с двумя состояниями. Эта модель обладает такими параметрами, как средняя длина пакета с ошибками и средняя вероятность потери пакета.

Для исследования воздействия ошибок связи на качество потокового видео, специально вводятся в пакеты сетевого уровня различного рода ошибки. При этом для моделирования канала с памятью будем использовать особый вариант моделей Гилберта и Маркова с распределением Вейбулла. Сравним результаты моделирования, полученные с использованием этих моделей с результатами для случая взвешенных ошибок.

Результаты анализа статистических данных однозначно показывают, что влияние ошибок на протоколы верхнего уровня более значительно сказывается на качестве потокового видео. При этом воздействие корреляции ошибок на такие показатели как среднее качество видео и средняя вероятность ошибок в пакете минимально. Это связано со спецификой кодирования видеоряда.

Особенности используемых моделей. Как уже было сказано, для моделирования ошибок в канале связи с памятью использовали модификацию модели Гильберта, а также модель Маркова, обладающую двумя состояниями и использующую распределение Вейбулла. Моделирование проводилось в сети UMTS. Хотя обе модели выдают одну и ту же вероятность ошибки (около 0,266%), они имеют свою специфику, связанную с анализом ошибок. Данное заключение проиллюстрировано на рисунках 1 и 2.

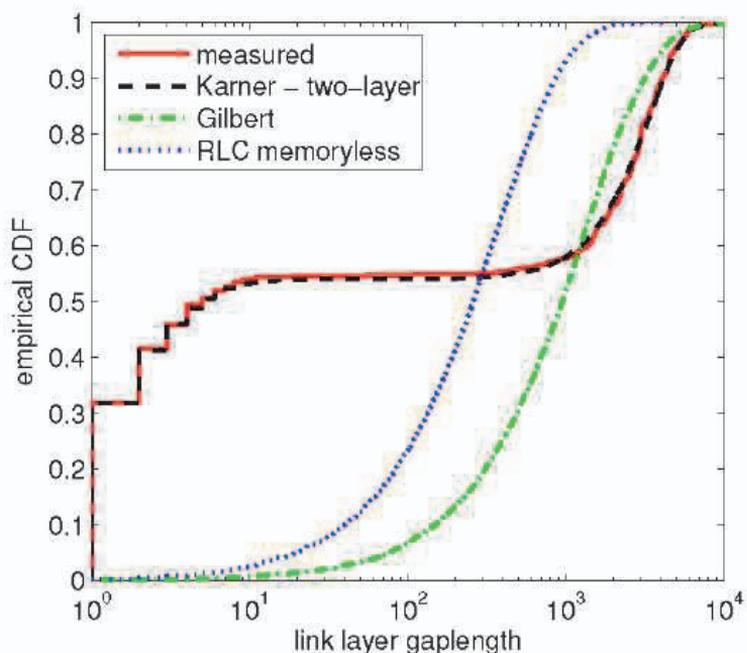


Рисунок 1 – Сравнение промежутков между ошибками для канального уровня

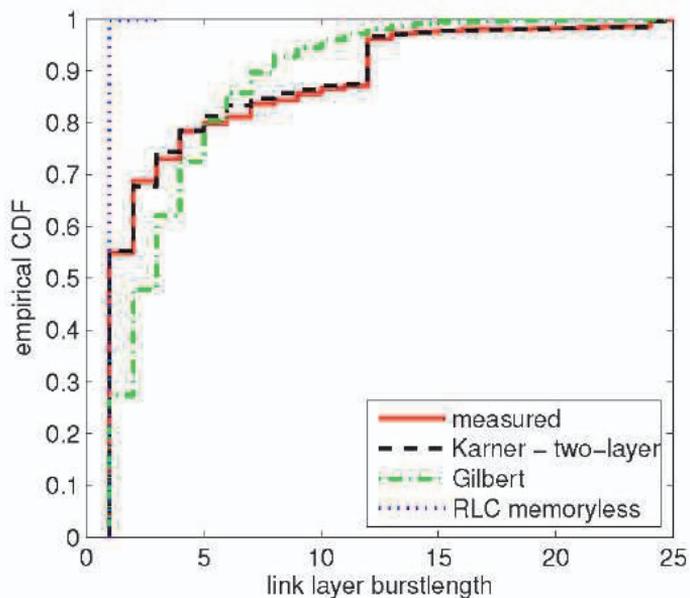


Рисунок 2 – Сравнение пачек ошибок для канального уровня

Здесь CDF – это число пакетов канального уровня, свободных от ошибок, и расположенных между двумя ошибками (этот параметр называется длиной промежутка). Также через CDF обозначено количество принятых ошибок (длина

пачки ошибок).

Подготовка к моделированию.

1. Стек протоколов. Для передачи потокового видео в сети UMTS необходимо выполнить пакетирование исходных данных (см. рисунок 3).

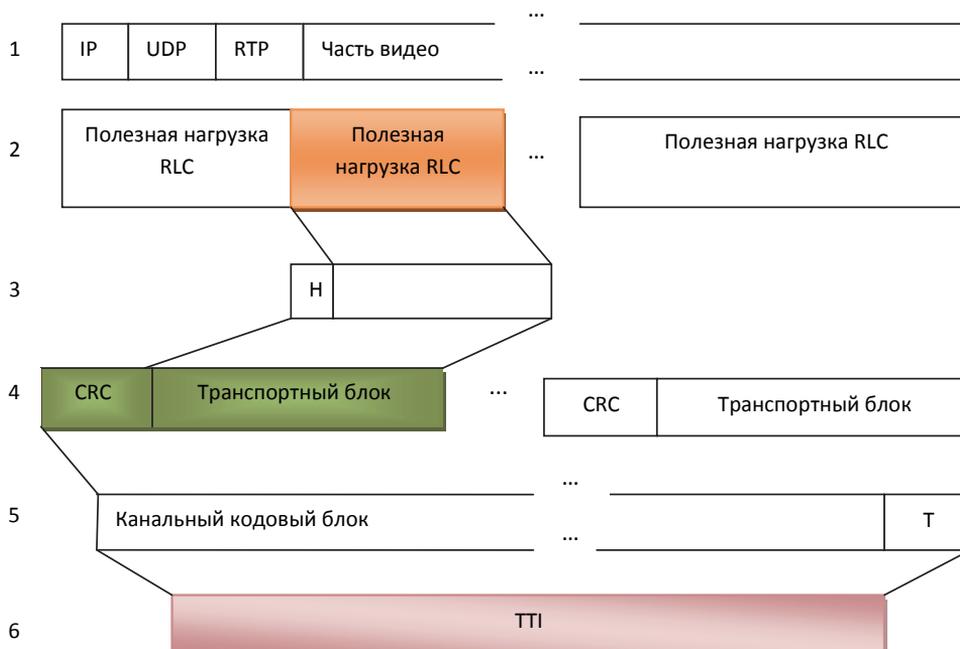


Рисунок 3 – Пример упаковки кадров видео для передачи в сети UMTS, где: 1 – IP пакет, 2 – сегментация пакетов протоком RLC, 3 – добавление заголовка MAC, 4 – добавление кода CRC, 5 – дополнение кодового блока до требуемого размера, 6 – соответствие длительности передаваемого пакета параметру TTI

Для обнаружения ошибок используются коды CRC, которые применяются к каждому транспортному блоку. Биты CRC объединяются в кодовые группы. Алгоритм кодирования определяет скорость передачи данных. Поскольку данные строго ориентированы под определенные приложения, используется турбо кодирование с коэффициентом сжатия 1/3. Этот коэффициент может изменяться, что позволяет наиболее эффективно использовать физический канал связи. Затем создаются кодовые таблицы для физических каналов передачи, данные проходят первый этап перемежения бит, затем осуществляется сегментация кадров, мультиплексирование каналов, физическая сегментация каналов и, наконец, повторное перемежение бит. При моделировании канала UMTS DCH мы использовали битовую скорость передачи данных 384 кб/с. Работа проводилась с протоколом IPv4, при этом по каналу связи передавался пакет с полезной нагрузкой 320 бит, а 16 дополнительных бит использовались для кода CRC. Параметр TTI был равен 10 мс, за это время было передано 12 блоков данных (TB). Перед сегментацией IP пакетов допускается также использование сжатия заголовков с помощью протокола PDCP.

2. Моделирование потокового видео, кодированного с применением протокола H.264. На рисунке 4 показана структурная схема экспериментальной установки.

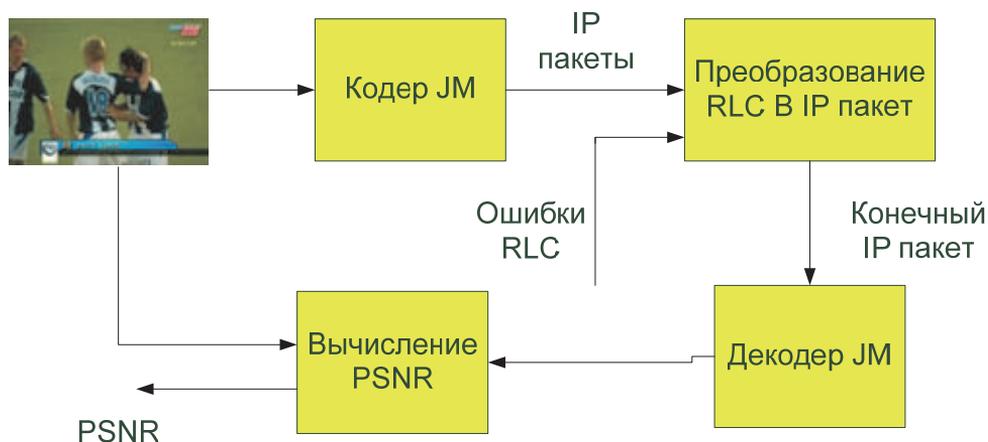


Рисунок 4 – Схема макета для проведения исследований

Мы несколько модифицировали стандартную модель JM H.264/AVC, добавив блок для обнаружения и схему для коррекции ошибок. Коррекция ошибок в I кадрах осуществляется усреднением пикселей, для P кадров применяется копирование и замена искаженных пикселей, пикселями из предшествующих кадров. Схема кодера была изменена таким образом, чтобы осуществлялось выравнивание длин всех IP пакетов.

Для проведения экспериментов был использован видеоролик «футбольный матч», кодированный с разрешением SIF (320 x 240 точек) и имеющий частоту следования 10 кадров в секунду. Видеоряд содержит только кодированные P и I кадры, причем каждый 40 кадр является опорным I фреймом. Использовалось разбиение кадра на два слайса, для кодирования одной части отводилось 750 байт. Для кодирования информации использовалось 26 уровней квантования, алгоритм квантования адаптивный. Для достижения достоверных результатов передача потокового видео осуществлялась в течение 10 часов.

Результаты. Для оценки качества принятого видео используется пиковое отношение сигнал-шум для сигнала яркости.

$$Y - PSNR(n) = 10 * \log_{10} \frac{255^2}{MSE(n)} \quad (1)$$

Здесь $MSE(n)$ – среднеквадратическая ошибка для n-го отсчета яркости.

$$MSE(n) = \frac{1}{N * M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [Y_n(i, j) - F_n(i, j)]^2 \quad (2)$$

Отсчеты сигнала яркости Y_n используют в качестве опорных отсчеты яркости F_n , принадлежащие несжатому сигналу. Параметры N и M характеризуют разрешение кадра. Индексы I и j определяют отсчеты яркости данной точки в

пределах текущего фрейма.

Гистограмма, показанная на рисунке 5, характеризует производительность описанных моделей.

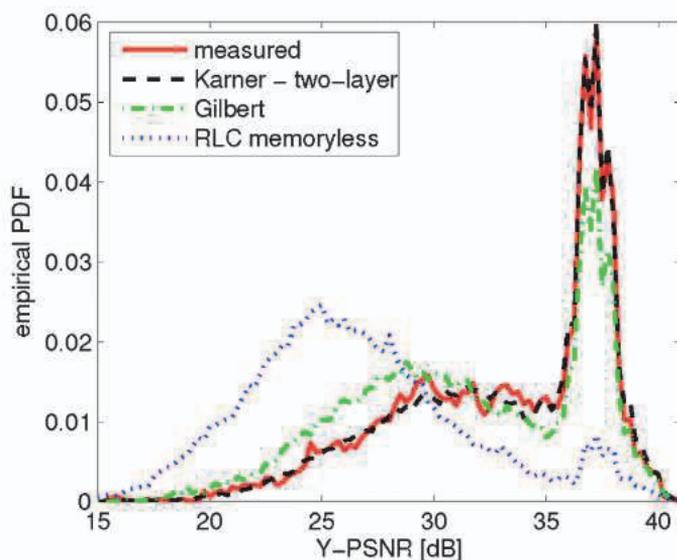


Рисунок 5 – Отношение Y-PSNR для различных канальных моделей

Несмотря на то, что коэффициент ошибок по блокам одинаков для разных моделей, только модель Карнера – модель с двумя слоями, отвечает требуемому качеству передаваемого видео. Поведение модели Карнера соответствует поведению взвешенных ошибок. Все остальные модели имеют различное распределение промежутков между ошибками и пакетов ошибок. Что в свою очередь, приводит к приему различного числа искаженных пакетов данных канального уровня, принадлежащих одному IP пакету. Это дает более высокий коэффициент ошибок по блокам для текущего IP пакета. Все результаты измерений показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Модель	Коэффициент ошибок по блокам канального уровня [%]	Коэффициент ошибок по блокам для IP пакетов [%]
Взвешенная модель	0.266	0.888
Модель Карнера с двумя слоями	0.262	0.892
Модель Гильберта	0.266	1.009
Модель RLC для канала с памятью	0.266	4.501

Полученные результаты говорят о том, что при моделировании необхо-

димо правильно подбирать распределение ошибок в канале связи.

На рисунке 6 представлено среднее число ошибочных ТВ, содержащихся в одном IP пакете.

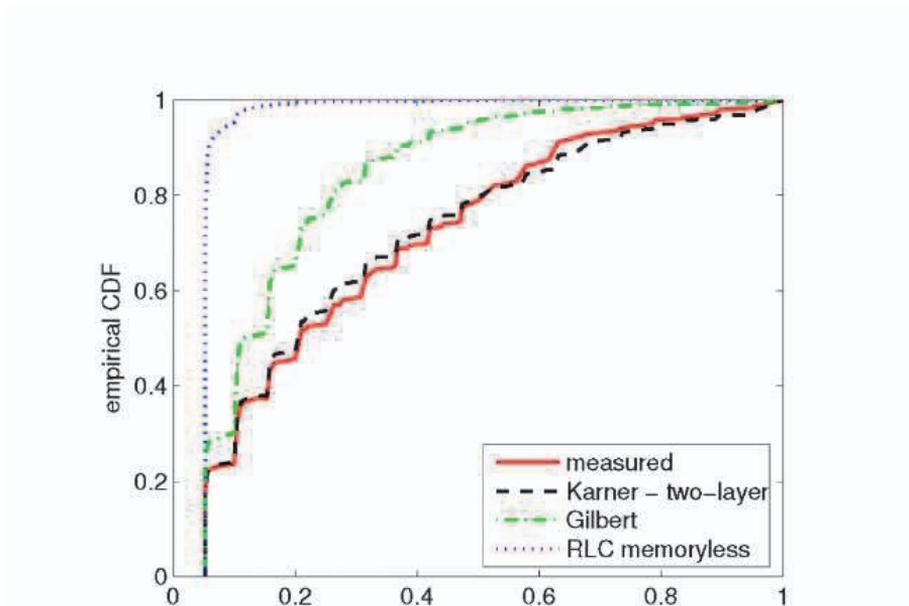


Рисунок 6 – Среднее число ошибочных ТВ, содержащихся в одном IP пакете

Показанные ниже графики моделируют распределение ошибок на канальном уровне. Нам же нужно рассмотреть также сетевой уровень и оценить качество потокового видео с учетом ошибок, возникающих на этом уровне.

Из рисунка 7 видно, что применение модели канала с памятью с коэффициентом IP BLER = 0.888% обеспечивает такое же качество потокового видео, что и взвешенная модель, при условии, что обе модели имеют совершенно разный характер распределения ошибок.

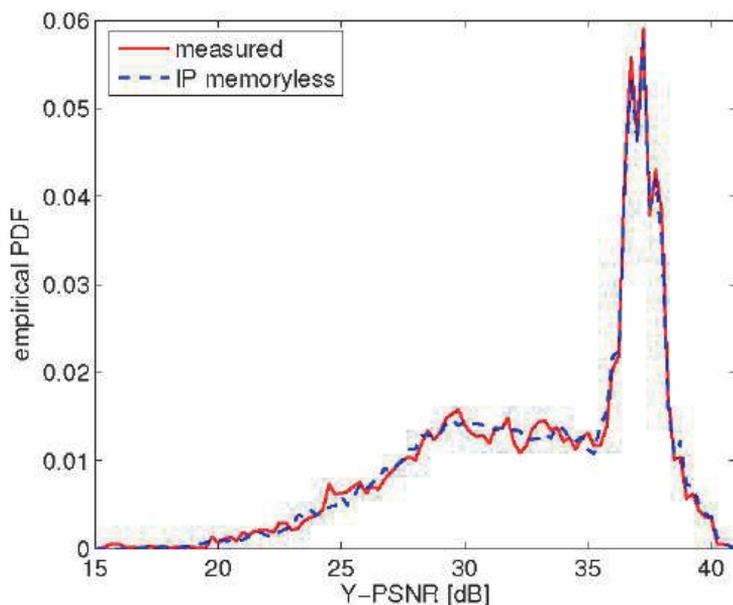


Рисунок 7 – Отношение Y-PSNR для модели канала с памятью

Это касается только отсчетов сигнала яркости Y-PSNR. Указанные различия распределений показаны на рисунках 8 и 9.

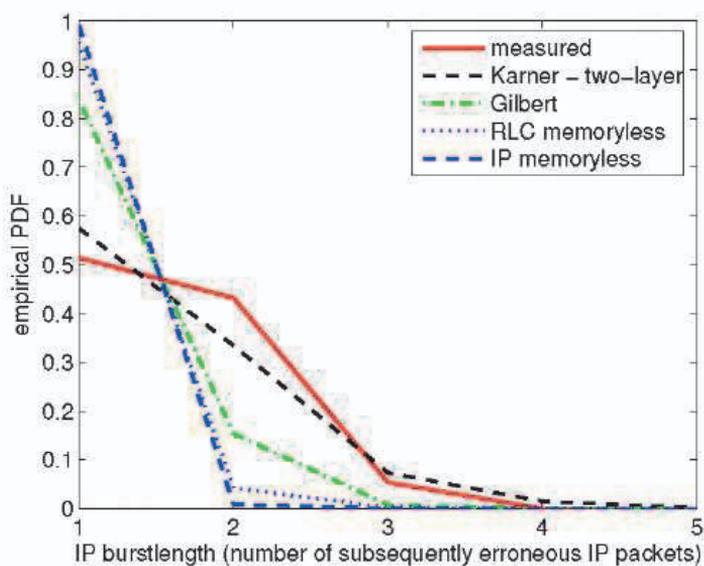


Рисунок 8 – Сравнение пачек ошибок для различных канальных моделей

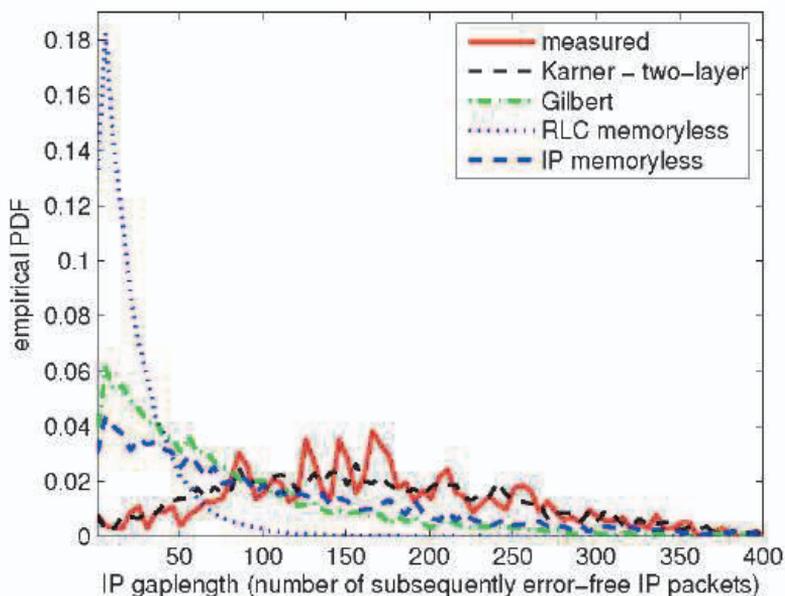


Рисунок 9 – Сравнение промежутков между ошибками для различных канальных моделей

Различная статистика распределений промежутков и пачек ошибок все равно приводит к одинаковому качеству видеосигналов. Полученные результаты полностью противоречат данным, где более длинные пачки ошибок приводят к снижению качества видеосигналов.

На рисунке 10 представлено среднее число IP пакетов с ошибками, содержащих данные одного кадра.

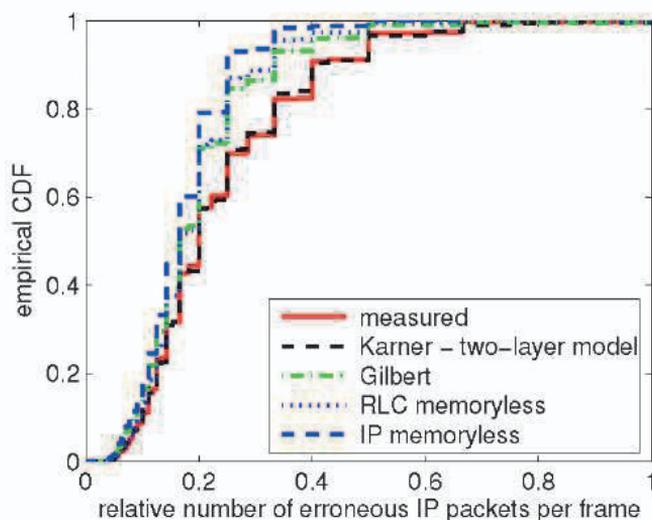
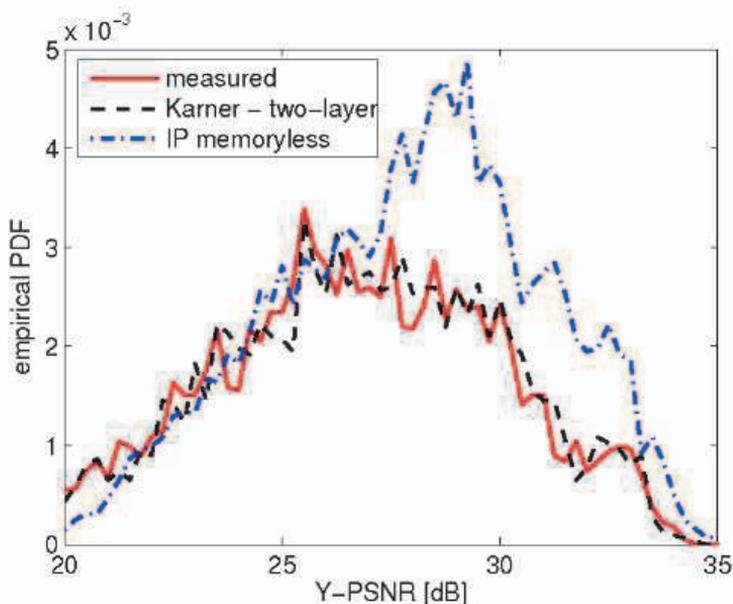


Рисунок 10 – Среднее число IP пакетов с ошибками, содержащих данные одного кадра

Как было сказано в главе II, при кодировании видео в стандарте H.264, на выходе кодера будет присутствовать последовательность P и B кадров. Между опорными I кадрами следует 39 P кадров, кодируемых с применением предикативного предсказания. Это предсказание P кадров приводит к распространению возникшей ошибки в пределах группы кадров GOP. Тем не менее, качество потокового видео сохраняется на заданном уровне и соответствует другим моделям с различным распределением ошибок внутри IP пакетов.

Благодаря применению указанного алгоритма кодирования по расшифрованной последовательности I кадров ошибки распространяться не будут. В результате может наблюдаться различия в значениях Y-PSNR для модели канала с памятью и для «взвешенной» модели (рисунок 11). На этом графике показаны не все значения PDF, а только их часть, принадлежащая данному кадру. На самом деле, эта зависимость имеет максимум PDF, лежащий за пределами рассматриваемого кадра.



**Рисунок 11 – Отношение Y-PSNR для I кадра
(ошибка не распространяется по всей видеопоследовательности)**

Таким образом, можно сделать заключение, что модель канала с памятью, работающая на основе стека протоколов IP-UDP-RTP и использующая для передачи видеосигналов по сети UMTS надстройку RLC, несмотря на наличие различной статистики распределения ошибок в пакетах сетевого уровня, обеспечивает тоже самое качество потокового видео, что и для каналов с сильными корреляционными связями между ошибками.

По этому, при моделировании канального уровня особое внимание должно быть уделено самым простым моделям стека протоколов IP-UDP-RTP, содержащих сильные корреляционные связи. Это позволит гарантировать, что протоколы сетевого уровня всегда обеспечивают минимальную вероятность ошибки в пакете данных.

Конечно, важно упомянуть, что анализ базируется на независимой статистике распределений отсчетов яркости Y-PSNR. Это не гарантирует, что качество одно и того же изображения будет восприниматься разными людьми одинаково.

Заключение. Известно, что статистика распределения ошибок для протоколов верхнего уровня сильно влияет на методы и алгоритмы, используемые в вышележащих уровнях модели OSI. В целях оценки эффективности новых алгоритмов можно использовать разнообразные модели канального уровня, которые характеризуют различные вероятности ошибок. В данной работе рассматривалось воздействие параметров канального уровня на качество потокового видео. При этом для передачи видеoinформации используется протокол H.264 и стек протоколов IP-UDP-RTP. Для сравнения различных параметров и оценки качест-

ва принятой картинки использовалось отношение PSNR для отсчетов сигнала яркости. Наилучшие показатели этого параметра дает модель канала с памятью. Были сравнены результаты моделирования, при этом измерения проводились в сети UMTS. В результате пришли к выводу, что очень важно учитывать корреляционные взаимосвязи сигналов при построении «взвешенной» модели. В тоже время, необходимо помнить, что модель канала с памятью обеспечивает такое же качество видеoinформации, что и модель с сильно коррелированными ошибками. Было доказано, что это происходит из-за особенностей распространения ошибок в кодированном видео. В частности, это связано с тем, что используется кодирование с предсказанием. Если бы передавались бы только I кадры, то ошибка бы не распространялась, и влияние корреляционных свойств ошибок оказывается несущественным.

Литература

1. Артющенко В.М., Шелухин О.И., Афонин М.Ю. Цифровое сжатие видеoinформации и звука: Учебное пособие / Под ред. В.М. Артющенко. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2003. 426 с.

УДК 004.051

Обзор программного обеспечения разработки web-сайтов

Л.В. Меньшикова, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Д.А. Яковлев, студент 5 курса группы Информационные системы
и технологии Заочного отделения,

Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

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

Д.М. Найденова, студентка 1-го курса

Факультета вычислительной математики и кибернетики,

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Предложена иерархическая структура типов веб-ресурсов, веб-сайтов и веб-порталов, и проведен анализ вложенности этих понятий. Приведен обзор программного обеспечения разработки вебсайтов и конструкторов веб-сайтов, сделан их сравнительный анализ в части функциональности, используемой операционной системы или систем, преимуществ и недостатков. На основе рекомендаций по выбору средства проектирования веб-сайта приведены примеры обоснованного выбора средства проектирования для разработки веб-сайтов, зависящего от информационно-аналитического наполнения веб-сайта.

Проекты информатизации, проектирование централизованных информационно-аналитических систем, веб-ресурс, веб-сайт, веб-портал.

Website development software review

L. Menshikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department of Information
Technologies and Control Systems,

D. Iakovlev, 5st year student of the Information systems and technologies of Distance
learning Department,

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

D. Naydenova, 1st year student of the Department of Applied Mathematics
and Cybernetics of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow

The hierarchical structure of types of web-resources, websites and web-portals is proposed and the analysis nesting of these concepts is carried out. An overview of website development software and website builders is given, their comparative analysis

is made in terms of functionality, the operating system or systems, used by them, advantages and disadvantages. Based on the recommendations for choosing a website design tool, examples of a reasonable choice of a design tool for developing websites, depending on the information and analytical content of the website, are given.

IT-projects, design of centralized information and analytical systems, web-resource, website, web-portal.

Введение. Веб-ресурс, веб-сайт или веб-портал?

В последнее время в Российской Федерации все чаще используются иностранные термины, такие как, например, веб-ресурс, веб-сайт или веб-портал, у которых есть русские аналоги, точно определяющие их назначение [2, С.3]. В Википедии не удалось найти информации, которая бы, точно определив эти понятия, не оставила сомнений, какое из понятий более общее.

Википедия утверждает [1], не давая определения веб-ресурса вообще, что:

- веб-портал – сайт в компьютерной сети, который предоставляет пользователю различные интерактивные интернет-сервисы, которые работают в рамках этого сайта;
- сайт, или веб-сайт (от англ. website: web – «паутина, сеть» и site – «место», буквально – «место, сегмент, часть в сети»), или веб-узел – одна или несколько логически связанных между собой веб-страниц; место расположения контента сервера.

Попробуем разобраться, что является подмножеством чего, исходя из того, что:

- веб-ресурс – это некоторое количество веб-страниц, которые расположены на одном адресном пространстве (домене), определяющем его уникальный адрес, и имеющие определенную функциональность в части форматов данных, правил их размещения и преобразования;
- веб-сайт – это связанные между собой гиперссылками по гиперметкам (или иным способом) html-файлы с текстовой и графической информацией и/или мультимедийными компонентами, объединенные единой общей тематикой, дизайном, стилем изложения информации, единым уровнем сложности размещаемых материалов, графического дизайна и иллюстраций;
- веб-портал – это веб-сайт, предоставляющий веб-сервисы различных веб-сайтов для использования их информационно-аналитических инструментов в целях получения некоторой информации, размещаемой на нем в едином дизайне.

Веб-ресурс.

На самом деле, более широким является понятие веб-ресурса, который представляет собой узел или точку с постоянным адресом (URL) во всемирной сети, который при необходимости можно найти в Интернет, расположенный на одном домене. Иногда на одном домене находятся несколько веб-ресурсов, или же один веб-ресурс использует несколько доменов.

Существует различная классификация веб-ресурсов:

➤ по доступности сервисов:

- открытые – любой пользователь интернет может смотреть всю информацию ресурса и использовать все его сервисы;

- полуоткрытые – пользователям требуется регистрация для подключения к ресурсу;
- закрытые – частные сайты организаций и компаний и личные приватные сайты, у которых пользователь интернет, как правило, видит только основную веб-страницу;
- локальные – доступные пользователям определенной локальной сети (большие компании, как правило, имеют два сайта с разным дизайном для локальных пользователей и для внешних пользователей);
 - по типу информации, размещенной на веб-ресурсе:
 - информационные ресурсы, представляющие собой узкотематические сайты и тематические порталы;
 - расчетные автоматизированные системы, одинаковые для общей сферы деятельности, например, «калькулятор окон» или «калькулятор налоговых вычетов»;
 - информационно-аналитические системы анализа в какой-либо сфере деятельности, например, банковской или строительной;
 - интернет-представительства фирм;
 - по назначению:
 - блог – это записки, которые пишет автор, а читатели оценивают или комментируют эти записки;
 - цифровой журнал – это ресурс, похожий на блог, но участвуют в его деятельности несколько соавторов, поэтому в отличие от блога он более формально структурирован и профессионально ориентирован;
 - сообщество – это цифровая платформа единомышленников, которые общаются через форумы, чаты, личные сообщения;
 - электронная коммерция – это интернет-магазин, через который люди могут приобретать или заказывать различные виды продуктов и услуг с помощью программного обеспечения, которое может автоматически обеспечить сервисы «формирования» заказа, включающее проверку наличия товара на складе, выставления счетов и последующей их оплаты;
 - управление – это компьютерные платформы, предназначенные для управления различными типами данных [5, С.15];
 - веб-сервисы или веб-услуги, перечислим некоторые из них:
 - облачные сервисы – онлайн программы, которые помогают организовать удаленную работу и решать те или иные бизнес-задачи;
 - доски объявлений;
 - почтовые ресурсы;
 - поисковые системы – веб-сайты, позволяющие осуществлять поиск веб-страниц по какому-либо их описанию (Google, Bing или Yahoo и т.п.);
 - социальные сети;
 - фото-, видео- и аудиохостинги;
 - файлообменники;
 - агрегаторы или маркетплейсы – веб-сайты, которые агрегируют (собирают) и классифицируют информацию и предложения разных компаний на одном ресурсе;

- **веб-сайты**, состоящие из нескольких связанных единым дизайном и стилем подачи информации веб-страниц, которые можно разделить на:
 - персональный или личный (приватный) сайт:
 - портфолио – это веб-сайт, цель которого показать работы в какой-либо творческой сфере, выполненные автором (общая информация об авторе: образование, место работы, опыт работы; результаты профессиональной деятельности, презентации работ и описание сделанных проектов; загруженные и прикрепленные важные файлы и документы к портфолио, включая резюме, планы и т.п.);
 - сайт-визитка – это веб-сайт, который представляет владельца и дает общую информацию о нем: образование, опыт работы, публикации и т.д.;
 - корпоративный сайт – набор веб-страниц, который представляет историю и услуги, предоставляемые какой-либо компанией;
 - рекламный сайт (называемый также промо-сайтом);
 - бизнес – сайт или сайт для ведения бизнеса – это веб-сайт, который, не предоставляя сами услуги, описывает их и предоставляет контакты, по которым с вами заключат контракт;
 - одностраничный лендинг;
 - игровые веб-сайты;
 - сайты электронной коммерции, которые мы хотим выделить в отдельную категорию из-за их «игровой», «неделовой» направленности;
 - **и, наконец, веб-порталы** – это многофункциональные сайты, которые включают в себя разнородные услуги посредством не переадресации или ссылок на них, а при помощи корректно организованных сервисов, которые традиционно принято делить на:
 - **горизонтальные веб-порталы**, предоставляющие на постоянной основе контент и услуги для различных аудиторий;
 - **вертикальные веб-порталы**, сосредоточенные на конкретных видах деятельности и предоставляющие, например, один вид услуг в полном объеме, либо относящиеся к какой-либо более общей сфере: региональные, государственные, веб-портал госуслуг или веб-порталы образовательных учреждений средней или высшей школы, порталы Министерств и ведомств и т.п.

Горизонтальные веб-порталы называют универсальными за большое количество и разнообразие инструментов, которые предоставляют услуги максимальному количеству пользователей за счет разнообразия сервисов; а вертикальные веб-порталы называют «нишевые», так как они специализируются в определенной сфере деятельности и не стремятся предоставить максимальное разнообразие инструментов, реализующих максимум возможных сервисов. Например, Автомобильный портал, Образовательный портал, Игровой портал, Веб-портал с фильмами, Портал медицинских услуг, порталы флагманских предприятий каждого вида промышленности и т.п.

Таким образом, **веб-ресурс** представляет собой информационно-аналитическую систему, которая использует веб-технологии для предоставления и передачи информации в сети Интернет по каким-либо сетям передачи данных с протоколом ТСР/ІР и протоколом НТТР на прикладном уровне, и организует некоторый спектр информационных услуг.

Веб-сайт

Веб-сайт состоит из связанных каким-либо способом *веб-страниц*, являющихся [1] документом или информационным ресурсом Всемирной паутины, доступ к которому осуществляется с помощью веб-браузера. Каждая веб-страница веб-сайта предоставляет гиперссылки для перехода внутри страницы или со страницы на страницу внутри веб-сайта или на другие ресурсы Интернет в соответствии с каким-либо рубрикаторм или просто по гиперметке.

Веб-страница состоит из:

➤ пассивных элементов:

- текста, написанного в одном стиле;
- таблиц, предоставляющих обобщение текста страницы;
- рисунков, которые способствуют пониманию текста;
- медиа-изображений, музыки и видео, дополняющих восприятие информации, как единого целого;

➤ активных элементов:

- полей ввода;
- ссылок;
- списков;
- кнопок;
- фреймов;
- флагов (или, как их еще называют, переключателей);
- скриптов (небольших программ, которые автоматизируют некий рутинный процесс при отображении информации и делают страницу более динамичной и удобной для пользователей);
- веб-сервисов (в части обращений к программам или системам для выполнения определенного ряда задач в сети Интернет, которые тематически делятся на блог-гоый, видеохостинг, поисковые сервисы и др.);
- встраиваемых элементов рекламы любых фирм, вообще не имеющих отношения ни к данной странице, ни к сайту. например, реклама в виде сайта одностраничного лендинга.

Для ускорения доступа к данным своего сайта крупные фирмы делают зеркальную версию сайта – «зеркала» своих сайтов, которые располагаются, как минимум, на каждом континенте, где они предоставляют информационно-аналитические или любые другие услуги. А в Евразии таких зеркальных сайтов бывает как минимум три – по количеству зон сетей передачи данных. И хотя информация на них синхронизирована, но некоторые разделы носят региональный характер, особенно в части стоимости услуг.

Веб-сайт, так же как веб-ресурс, может быть расположен на одном или нескольких доменах. Кроме того, несколько сайтов могут храниться на одном домене в рамках виртуального хостинга (услуги, которая одновременно с предоставлением места на сервере, достаточного для хранения и использования вашего веб-сайта, позволяет еще и использовать услуги, необходимые для размещения информации, то есть хостинг подразумевает, что все страницы и прикрепленные к ним файлы содержатся на данном компьютере и веб-сервер будет от-правлять любую страницу с сайта по запросу любого пользователя). В этом слу-

чае не нужно ничего делать для хранения данных своего веб-сайта, а можно использовать наработанные владельцем веб-сервера технологии хранения, предоставления и резервного копирования веб-сайта и его данных [3, С.14].

Таким образом, чтобы создать, хранить и использовать веб-сайт требуются:

- те или иные средства создания и редактирования веб-страниц;
- средства загрузки html-файлов на **веб-сервер** [1] – сервер, принимающий HTTP-запросы от клиентов, обычно веб-браузеров, и выдающий им HTTP-ответы, как правило, вместе с html-страницей, изображением, файлом, медиа-поток или другими данными (роль которого в случае частного сайта может выполнять домашний компьютер);
- **веб-браузер** (или веб-обозреватель) [1] – прикладное программное обеспечение для просмотра страниц, содержания веб-документов, компьютерных файлов и их каталогов; управления веб-приложениями.

Веб-браузер дает возможность просматривать созданный веб-сайт. Не следует путать его с поисковой системой – специальным веб-сайтом, который предоставляет пользователям сервис [7, С.98] поиска нужных страниц других сайтов, и страница которой отображается первой при запуске браузера, пока вы не перенастроите это; а так же с самим веб-сайтом, так как если веб-страница веб-сайта не визуализируется, то это значит, что это веб-сервер не отвечает на запрос, а поэтому недоступен сайт.

Все эти средства могут быть платными или бесплатными, выбранными в соответствии с одной из операционных систем – с той, которая установлена на вашем компьютере, ноутбуке, телефоне и т.д. Еще одним критерием выбора является язык, на котором вы хотите писать вашу систему, а так же формат хранения файлов и данных системы.

Веб-портал

В рамках вышесказанного веб-портал – это многофункциональный веб-сайт, который включает в себя разнообразие различного инструмента (средств предоставления данных и управления знаниями), сервисов (услуг) и однотипной стилистически тематической информации. При этом веб-портал может использовать не только собственные средства обработки, анализа и визуализации данных, а в том числе и средства задействованных (привлеченных) веб-ресурсов внутри своего информационного пространства. Кроме того, веб-портал имеет в своем информационном пространстве множество ссылок на разнообразные ресурсы, которые могут заинтересовать пользователей веб-портала, и является полноценным прототипом или макетом централизованной информационно-аналитической системы.

Для пользователя веб-портал выглядит обычным сайтом, но задачи и условия его администрирования намного сложнее и специфичнее, чем у веб-сайта, поэтому в случае создания веб-портала стоит особенно внимательно относиться к выбору средств администрирования, идентификации и аутентификации пользователей, если портал не является открытым веб-ресурсом.

Обзор средств разработки веб-сайтов с минимальными требованиями

Минимальные требования к программному обеспечению для создания веб-сайта или его прототипа:

- средство создания и редактирования веб-страниц (можно для начала в текстовом редакторе сохранить как html-проект несколько страниц вордовского файла, связанные гиперссылками и гиперметками между собой);
- средство загрузки файлов на веб-сервер, которое обычно можно пролучить в рамках хостинга (кроме случая, когда вы будете использовать в качестве веб-сервера для своего веб-сайта ваш персональный компьютер, присоединенный к сети Интернет);
- средство просмотра веб-сайта (любой веб-браузер).

Почти все операционные системы имеют свой текстовый редактор и средство просмотра веб-сайтов (браузер). Встроенные редакторы не имеют специальных инструментов, но есть текстовые редакторы сторонних фирм для всех операционных систем, которые представлены в таблице 1, реализующие эти функции.

Таблица 1 – Редакторы сторонних ОС фирм, сохраняющие html-проекты

Операционная система	Встроенный редактор	Сторонний редактор
Windows	Notepad	Notepad++, Visual Studio, Code, WebStorm, Brackets
Mac OS	TextEdit	TextWrangler, Visual Studio, Code, Brackets
Linux	Vi (AllUNIX), GEdit(Gnome), Kate(KDE), LeafPad (Xfce)	Emacs, Vim, Visual Studio, Code, Brackets

После того, как вы создали свой html-проект и сохранили его в одном из текстовых редакторов с возможностью это делать, требуется загрузить свои веб-страницы на веб-сервер. После того, как вы определитесь с провайдером (табл. 2), он направит вам информацию о доступе к протоколу FTP (протокол передачи файлов).

Таблица 2 – Бесплатные FTP-клиенты загрузки html-проектов на веб-сервер

Операционная система	Программное обеспечение FTP	
Windows	WinSCP, Moba Xterm	FileZilla (все ОС)
Mac OS	Cyberduck	
Linux	Nautilus (Gnome), Dolphin (KDE)	

После этого нужно посмотреть результат своей работы в веб-браузере (табл. 3). Лучше выбрать веб-браузер, который работает больше, чем с одной операционной системой, чтобы вашим вебсайтом в Интернете был доступен большому числу пользователей. В этом случае при разработке веб-сайта вы

должны протестировать его со следующими основными браузерами: Microsoft Internet Edge, Mozilla Firefox, Google Chrome, Apple Safari, и дополнительными – Opera, Konqueror, или UC Browser. Кроме того, стоит воспользоваться такими сервисами, как Browsershots или Browserstack. Browsershots предоставляет скриншоты вашего сайта, давая возможность увидеть, как ваш сайт будет выглядеть в различных браузерах. Browserstack фактически предоставляет вам полный удалённый доступ к виртуальным машинам для тестирования веб-сайта под наиболее распространёнными ОС. Симуляция мобильных устройств – это новая технология, пока еще менее надёжная, чем симуляция настольных устройств. Это можно сделать, например, на Open Device Lab initiative.

Таблица 3 – Браузеры просмотра html-проектов

Операционная система	Веб-браузеры	Сервисы проверки кроссбраузерности – отображения информации для разных ОС
Windows	Microsoft Internet Explorer (до 10 октября 2023 года) Microsoft Internet Edge Mozilla Firefox Google Chrome	1. Browsershots или Browserstack 2. Open Device Lab initiative – (имитирует работу мобильных устройств)
Mac OS	Microsoft Internet Edge Mozilla Firefox Google Chrome Apple Safari	
Linux	Microsoft Internet Edge Mozilla Firefox Google Chrome Apple Safari	
Android	Microsoft Internet Edge Mozilla Firefox Google Chrome	
iOS	Microsoft Internet Edge Mozilla Firefox Google Chrome Apple Safari	
iPadOS	Mozilla Firefox	

Ваш сайт готов: не выключайте домашний компьютер, если вы разместили ваш сайт только на нем, и создайте как можно больше ссылок на него с сайтов сходной тематики, чтобы вас заметили в Интернет. И следите за трафиком, который проходит через ваш компьютер, теперь он может значительно возрасти, так как кто-то присоединяет к этим ссылкам передачу своей информации.

Но если требуется более профессионально оформленный веб-сайт, который содержит медиа-файлы, расчеты на каком-нибудь он-лайн калькуляторе, или

более серьезную аналитику и дашборды, либо сайт какого-то специального назначения, то следует выбрать либо пакет программного обеспечения для разработки сайтов. Вы установите это программное обеспечение на ваш персональный компьютер и будете использовать для создания сайта и его отладки до размещения веб-сайта на веб-сервере, либо можно остановиться на одном из он-лайн конструкторов веб-сайтов, которые мы тоже рассмотрим в своем обзоре, как и программное обеспечение создания сайтов.

Обзор средств разработки полноценных веб-сайтов

Программ для разработки веб-сайтов гораздо меньше, чем конструкторов веб-сайтов, которые представляют собой иногда те же программы, только установленные на сервере, к которому подключается разработчик веб-сайта.

Рассмотрим сначала возможности, которые дают программы разработки веб-сайтов (табл. 4), работающие как самостоятельные продукты без подключения к Интернет. По всей видимости, освоив в совершенстве такую программу, разработчик уже никогда не вернется к конструкторам веб-сайтов, так как полностью осознает преимущества собственного средства разработки, которое можно настраивать на характеристики, удобные разработчику. Кроме того, в этом случае не будет навязчивой рекламы, от которой невозможно сохранить веб-сайт, сделанный в конструкторе, равно как и количество встроенного кода неизвестного назначения будет намного меньше. Делая этот обзор, мы с удивлением обнаружили, как сократился жизненный цикл программного обеспечения такого класса – с 22 лет до 7. То есть многие программы разработчики прекращают поддерживать уже через 7 лет, когда реализованная ими технология [4, С.12], уже став популярной, достигает своей зрелости и может приносить 8-12 лет максимальную прибыль! Это может быть связано с тем, что разработчики программного обеспечения для создания сайтов часто в ходе своей деятельности понимают, что создание самих веб-сайтов может приносить гораздо большую прибыль, чем разработка программного обеспечения. Это действительно так, потому что бизнес-проекты, под которые берут кредиты в банках всего мира, в наше время почти всегда начинаются с создания веб-сайта.

Таблица 4 – Программы разработки веб-сайтов

Название	Описание	Основные функции и/или особенности ПО	Поддерживаемые языки	Компания/сайт/ год первого релиза/год последнего релиза (если поддержка завершилась)/ОС	Преимущества	Недостатки
Adobe Dreamweaver	Визуальный HTML-редактор	Автодополнение кода	HTML, JavaScript, CSS	Adobe/ https://adobe.com/1997/	Для разработки сайтов любой сложности	Для профессиональных разработчи-

Название	Описание	Основные функции и/или особенности ПО	Поддерживаемые языки	Компания/сайт/ год первого релиза/год последнего релиза (если поддержка завершилась)/ОС	Преимущества	Недостатки
	компания Adobe			н.вр. (обновляется до настоящего времени, далее – «н.вр.») /Microsoft Windows, Apple MacOS		ков, требует знания HTML/CSS
FrontPage	WYSIWYG-редактор HTML, входящий в состав пакета приложений Microsoft Office	Автоматическая отправка изменений исходных текстов в режиме реального времени	HTML	Microsoft/ https://frontpages.ru/1997/2003/ Microsoft Windows, Apple MacOS	Есть все режимы разработки, после сохранения сразу получается файл в формате HTML, который можно открыть в браузере	Так как последняя версия выпущена в 2003 году, то генерирует код с ошибками
Notepad++	Бесплатный Текстовый редактор с открытым исходным кодом для Windows	Поддерживает множеств-во плагинов, подсветку синтаксиса разметки, языки описания аппаратуры VHDL и Verilog	HTML, PHP, XML, CSS, JavaScript ASP и т.д.	Notepad++ репозиторий/ https://notepad-plus-plus.org/2003/ н.вр./ Linux, Apple MacOS, Microsoft Windows	Используется для внесения каких-то быстрых изменений в файлы, замен одинаковых фрагментов кода, путей и т.п.	Сложный интерфейс
Brackets	Бесплатный текстовый редактор для	Система контроля версий	HTML, CSS, и JavaScript	Adobe/ https://brackets.io/	Inline-редактирование свя-	Функцию обновления страницы в

Название	Описание	Основные функции и/или особенности ПО	Поддерживаемые языки	Компания/сайт/ год первого релиза/год последнего релиза (если поддержка завершилась)/ОС	Преимущества	Недостатки
	веб-разработчиков.	Git, просмотр HTML-кода в браузере в реальном времени (Live Preview), синхронизация с FTP (Git-FTP)		2014/н.вр./ GNU/Linux, Apple Mac OS, Microsoft Windows	занных участков кода – возможность править CSS и JS прямо из HTML-документа, не переключаясь между файлами; синхронизация страницы с редактируемым кодом	браузере в режиме реального времени можно использовать только в браузере Google Chrome; некоторые разделы программы не переведены на русский.
Комодо Edit	Бесплатный текстовый редактор для динамических языков программирования	Подсветка синтаксиса, синтаксис «на лету», автозавершение скобок, кавычек и зарезервированных слов; быстрый запуск; удалённая работа с файлами	HTML, PHP, JavaScript, XML, CSS, Ruby, Perl, Tcl и т.д.	ActiveState, www.activesate.com, 2007/ н.вр./ GNU/Linux, Apple Mac OS, Microsoft Windows	Есть встроенный дебаггер – компьютерная программа для автоматизации процесса отладки кода	Лучше всего справляется с обработкой XML-файлов
Adobe Muse	Графический редактор для создания сайтов, небольших	Сборщик ресурсов	HTML; собственный язык, не конвертируемый даже	Adobe Systems/ muse.adobe.com/ 2012/2020/ Mac OS,	Более пригоден для редактирования HTML-файлов;	Сложный интерфейс

Название	Описание	Основные функции и/или особенности ПО	Поддерживаемые языки	Компания/сайт/ год первого релиза/год последнего релиза (если поддержка завершилась)/ОС	Преимущества	Недостатки
	интернет-магазинов и посадочных страниц без необходимости написания кода		из HTML	Microsoft Windows	сложно создать страницу «с нуля»	
Atom	Бесплатный текстовый редактор с открытым исходным кодом	Общее название двух связанных веб-технологий: формата для описания ресурсов на веб-сайтах и протокола их публикации	HTML, PHP, JavaScript, XML, SQL, CSS, Ruby, Perl, и т.д.	GitHub/ ietf.org/rfc/rfc42872015/2022 /Linux, Apple Mac OS, Microsoft Windows, FreeBSD	Возможность импорта правил и тем из TextMate	Возможность запуска веб-сервера прямо из редактора
Visual Studio Code	Текстовый редактор кода для кросс-платформенной разработки веб- и облачных приложений	Инструменты для работы с Git; подсветка синтаксиса, средства рефакторинга и кастомизации; файлы конфигурации	HTML, PHP, JavaScript, XML, CSS, Ruby, Perl, SQL и т.д.	Microsoft/ code.visualstudio.com/2015/ н.вр./ Linux, Apple Mac OS, Microsoft Windows	Имеется встроенный отладчик, инструменты для работы с Git и средства рефакторинга, навигации по коду, автодополнения типовых	Большое число неофициальных пакетов, которые не всегда хорошо «сформированы»

Название	Описание	Основные функции и/или особенности ПО	Поддерживаемые языки	Компания/сайт/ год первого релиза/год последнего релиза (если поддержка завершилась)/ОС	Преимущества	Недостатки
					конструкций и контекстной подсказки	
Vim	Бесплатный текстовый редактор с широким спектром расширений и надстроек	Применение двух режимов ввода: командного (после запуска редактор находится в нём) и текстового	HTML, PHP, JavaScript, XML, CSS, Ruby, Perl, SQL и т.д.	Брам Моленар/ vim.org/ 1991/ н.вр./ Amiga, Linux, Apple Mac OS, Microsoft Windows, OS/2, Unix	Vim может работать только в режиме консоли	Отсутствие удобного инструмента слияния.

Как уже было сказано выше, конструкторы сайтов – это программы разработки, установленные на веб-сервере, предоставляющем доступ к этому конструктору посредством сервисов, в которых можно собрать сайт без знаний верстки и дизайна. При этом можно реализовать все возможности, которыми тот или иной конструктор обладает (табл. 5) и использовать все функции веб-страниц в части пассивных и активных элементов.

Таблица 5 – Конструкторы веб-сайтов (веб-сервисы)

Название	Описание [1]	Основные функции	Отличие от других конструкторов	Сайт/ год выпуска	Преимущества	Недостатки
Mobirise	Программное обеспечение для веб-дизайна при создании и публикации без знаний	Раскрывающиеся меню; формы обратной связи; анимация; темы и расширения сторонних разработчиков	Формы обратной связи	http://mobirise.com/2015/ Apple Mac OS, Microsoft Windows, OS/2	Оффлайн альтернатива известным онлайн конструкторам сайтов	Запутанный интерфейс

Название	Описание [1]	Основные функции	Отличие от других конструкторов	Сайт/ год выпуска	Преимущества	Недостатки
	программирования					
uCoz	Конструктор сайтов, которым требуется большой объем графика: онлайн-гипермаркеты, крупные интернет-магазины	Бесплатная система управления сайтом и хостинг сайтов, созданных с её использованием	Возможно создать собственный дизайн (шаблон), либо переделать любой стандартный	https://www.ucoz.ru/ 2005	Закрытый исходный код, невозможность подгрузки серверных скриптов и подключения баз данных	Перенос сайта с uCoz на другую платформу
uKit	Российский конструктор сайтов для создания сайтов-визиток, одностраничных лендингов и небольших интернет-магазинов; CMS-система специально для малого и среднего бизнеса от uCoz	Оптимизация ключевых страниц поиска	Возможность публикации в Интернете на собственном домене	https://ukit.com/ru/ 2015	Сайты на uKit не имеют отдельной мобильной версии, а автоматически переадресовываются под экраны мобильных версий	Часть блоков в шаблоне сайта закреплена и не поддается кастомизации
Wix	Международная облачная платформа для создания интернет-проектов;	Конструирование сайтов и их мобильных версий	Максимальное количество шаблонов (более 500)	https://ru.wix.com/ 2007	Есть возможность добавления синемаграфов – фотографий, на которых часть изо-	В начале марта 2022 года компания без предупреждения заблоки-

Название	Описание [1]	Основные функции	Отличие от других конструкторов	Сайт/ год выпуска	Преимущества	Недостатки
	CMS-система				бражений динамичны	рвала своим клиентам из России возможность приёма платежей предоплаченных услуг
Tilda	Блочный конструктор сайтов, не требующий навыков программирования; CMS-система	Сайты собираются из готовых блоков, которые и выделены в смысловые категории	Бесплатный план для создания сайтов	https://tilda.cc/ ru/ 2014	Автоматическая адаптация под мобильные устройства	Свой собственный блок проектируется с исполнением встроенного редактора Zero Block
Nethouse	Программное обеспечение для создания сайтов, управления доменами, онлайн-обучения и продажи электронных билетов	Функции систем управления веб-содержимым	Синхронизация с 1С, системой «Мой склад» и другими отчетными сервисами	https://www.nethouse.ru/ 2012	Регистратор доменов	Выгрузка товаров на Яндекс.Маркет и в файл CSV
Flexbe	Конструктор сайтов, не требующий специальных навыков	Регистрация доменного имени непосредственно в конструкторе, домен будет настроен авто-	Позволяет создавать сайты с многошаговыми интерактивными формами с	https://flexbe.ru/ 2015	После регистрации можно подключить корпоративную почту	Ограниченный спектр шаблонов и т.д.

Название	Описание [1]	Основные функции	Отличие от других конструкторов	Сайт/ год выпуска	Преимущества	Недостатки
		матически	возможностью ветвления и кастомизации результатов			
Jimdo	Программный комплекс, предоставляющий функции создания, редактирования, контроля и организации веб-страниц	Все работает через браузер	Полностью редактируемые дизайнерские шаблоны	https://www.jimdo.com/ 2007	Это облачный сервис, с помощью которого создавать сайты и управлять ими можно прямо в браузере	Русская версия конструктора Jimdo была официально закрыта в декабре 2016 года, вместе с интерфейсом и технической поддержкой
Ecwid	Облачная платформа для создания интернет-магазинов	AJAX-приложение, позволяющее добавить интернет-магазин на существующий сайт или страницу в социальной сети	Добавление каталога на уже разработанный сайт на другой платформе; создание магазина внутри соцсетей	https://ecwid.ru/ 2009	Интеграция с маркетплейсами и другими конструкторами	После смены владельца принадлежит канадской компании

Выбор средства разработки.

Кроме описанных выше «офлайн» программ разработки и онлайн-конструкторов веб-страниц на рынке представлены коробочные и/или облачные решения (табл. 6) для систем управления контентом (англ. CMS – Content Management Systems, система управления контентом), предназначенные для типизированных сайтов, шаблоны которых предоставляются этими средствами разработки.

Система управления содержимым (CMS) [1] – информационная система или компьютерная программа, используемая для обеспечения и организации совместного процесса создания, редактирования и управления содержимым, иначе – контентом.

В CMS-системах веб-страницы хранятся не в виде файлов, а оформляются в момент обращения к странице сайта посредством занесения информации (фрагментов текста из баз данных) в шаблон графического оформления веб-сайта.

Таблица 6 – Системы управления контентом – «движки» вебсайтов

Название	Описание	Функции	Отличие от других CMS-систем	Сайт/год появления	Преимущества	Недостатки
WordPress	Свободно распространяемая система управления контентом с открытым исходным кодом для сайтов любой сложности: блоги, интернет-магазины, корпоративные веб-сайты	Большой выбор шаблонов и плагинов: как платные, так и бесплатные	Подходит для разработки любого сайта	https://ru.wordpress.org/ 2003	Простота установки	Открытый код; медленная загрузка; оптимизация при масштабировании недостаточна для комфортной работы
Joomla	Система управления содержимым (CMS), для блогов и сайтов-визиток	На основе базы данных СУБД MySQL или других стандартных промышленных реляционных СУБД	Плагины и шаблоны для кастомизации сайтов	https://www.joomla.org/ 2005	Бесплатное ПО; легко устанавливается на любой хостинг, не требует больших ресурсов хостинга	Открытый код; медленная загрузка; плохая оптимизация
OpenCart	Платформа	Возмож-	Синхрони	https://www	Встро-	Открытый

Название	Описание	Функции	Отличие от других CMS-систем	Сайт/год появления	Преимущества	Недостатки
	электронной коммерции, ориентированная на создание интернет-магазинов	ность подключения CRM и аналитики	защита с торговыми и складскими программами (1С, Класс 365, Мой склад).	.opencart.com /2012	енная система аналитики, легко расширяемая за счет подключения инструментов Яндекс и Google	код; кастомизация осуществляется путем правки кода; сложная установка
Drupal	Система управления контентом с открытым исходным кодом	На основе реляционной базы данных (MySQL, PostgreSQL и другие)	Раздельные конфигурации сайта для различных виртуальных хостов (мульти-сайтинг)	https://www.drupal.org /2001	Удобство и универсальность	Открытый код; минимальное количество готовых решений
1С-Битрикс. Управление сайтом	Система управления контентом веб-проекта	Доступная в режиме он-лайн из любой точки мира amoCRM	Включает набор инструментов для продвижения веб-проектов	https://www.bitrix24.ru /2008	Кросс-платформенность	В 2022 году обнаружена уязвимость, позволяющая исполнить произвольный код на сервере без какой-либо аутентификации

В таблице 7 представлены рекомендации по выбору программ разработки, конструкторов и CMS-решений для разработки веб-сайтов [11].

Таблица 7 – Рекомендации по программам, конструкторам и «движкам» разработки веб-сайтов

Характеристики сайта	Рекомендуемое программное обеспечение
Многостраничный сайт	uKIT, Wix, Flexbe, Ucraft, Tilda, Bloxy, Mottor, Битрикс 24. Сайты
Портфолио или личный сайт	Tilda, Wix
Лендинг	uKIT, Wix, Mottor, Tilda, Unbounce, Flexbe, Ucraft, Bloxy, Битрикс 24. Сайты, Google site
Блог	Ucraft, Wix
Мультиязычный сайт	Ucraft
Сайт на основе шаблона	uKIT, Tilda, Wix, Unbounce
Собрать сайт из готовых блоков	uKIT, Tilda, Wix, Bloxy, Ucraft, Битрикс 24. Сайты, Flexbe, Mottor
Запустить сайт максимально быстро	uKIT, Wix
Собрать сайт бесплатно	Wix, Ucraft, Tilda, Битрикс 24. Сайты, Google site
Запустить А/Б тесты	Flexbe, Mottor, Unbounce, Bloxy
Настроить автоворонки продаж	Mottor
Повысить конверсию сайта	Flexbe, Mottor, Unbounce, Bloxy

В заключение нашего обзора, приведем ряд примеров выбора средств разработки для того или иного веб-сайта.

Например, в крупной организации планируют на сайте (внутреннем и внешнем) создать раздел «Библиотека» и поручают специалисту, не имеющему отношения к библиотечной деятельности, сделать файл, удобный для использования сотрудниками одного управления. В этом файле будет храниться описание всех книг, которые были куплены на деньги организации в ходе всех проектов, а также их библиографические данные. Тогда сотруднику, которому поручили эти работы, для начала есть смысл ограничиться одним файлом редактора Word фирмы Микрософт, программное обеспечение которой стоит на всех компьютерах в этом управлении. В этом файле он сможет организовать информационное пространство при помощи обычных гиперссылок и гиперметок, сделав на странице сначала алфавитные перечни русских и английских букв. В этот файл в соответствии с рубрикацией – алфавитным порядком двух алфавитов – заносятся все библиографические вышеуказанных книг. Затем добавляется третий раздел в этом файле, в котором, так же в алфавитном порядке, переписаны аннотации на русском языке всех книг, которые внесены в алфавитные перечни. Далее все зависит от того, какого размера будет итоговый файл, доступ к которому будет открыт сотрудникам отдела. Если количество книг в управлении 20-300 штук, то такой файл можно использовать в вышеописанном варианте до тех пор, пока его объем не станет критическим. Файл, конечно, используется всеми сотрудниками только для просмотра, изменения они в него вносить не будут. Из этого файла

простой операцией сохранения его как html-проекта получается ресурс, который легко интегрируется в любой портал (внешний и внутренний) крупной организации. Этот ресурс оптимизируется, одобренный за удобство использования пользователями, разработчиками внешнего и внутреннего Портала, интегрируется в Порталы, а затем оптимизируется под реальные данные – количество пользователей и существующие в организации сети передачи данных, и используется в двух проектах: «Общая библиотека организации» и «Научно-исследовательские отчеты и отчеты по технорабочим проектам» – ресурсы, уже доступные всем сотрудникам организации.

Приведем еще один пример выбора средства разработки веб-сайта. Пусть группа энтузиастов, узнав [6, С.11], что в октябре 2025 года запланирован запуск первого космического аппарата «Экспресс-РВ» проекта «Сфера» в рамках развертывания орбитальной группировки, которая предоставит услуги связи, включая широкополосный доступ в интернет, на всей территории России и акватории Северного Ледовитого океана, решила предложить серию экспериментов в космосе с использованием этой новой возможности [10, С.58]. А именно, может быть организована передача сигнала в Ku-диапазоне со спутника на высокоэллиптической орбите на геостационарный спутник и назад, чтобы, исключив атмосферу, провести уточнение мировых констант и характеристик радиолиний в этом диапазоне [12, С.38]. Согласно официальным данным в группировку космических аппаратов «Экспресс-РВ» войдут четыре одноименных космических аппарата, которые будут работать на высокоэллиптической орбите в C-, Ku- и L-диапазонах. Особый интерес, помимо уточнения помех [8, С.18], которые вносит в радиолинии атмосфера, представляет исследование эффекта Доплера, джиттера (фазового дрожания) и вращения плоскости поляризации, которые теперь можно будет исследовать при передаче сигнала с геостационарного спутника на высокоэллиптический и назад. Ранее такие эксперименты для расстояний, сравнимых с высотой геостационарной орбиты, провести не было возможности. Проведение этих экспериментов позволит проводить более точную априорную оценку количества каналов связи, которые можно использовать в данном диапазоне в современных спутниках связи. Кроме того, эти исследования дадут возможность более эффективно использовать энергетический ресурс геостационарных спутников, находящихся в эксплуатации. Это позволит сделать их эксплуатацию более экономически выгодной, а в перспективе, при проведении перераспределения частотно-энергетического ресурса емкостей российских спутников, возможно, отказаться от аренды иностранных космических аппаратов, так как после приватизации ряда международных компаний, достоверная техническая информация по используемым спутникам не всегда доступна России. Таким образом, в отличие от библиотечного раздела сайта, здесь потребуется блог для обсуждения планов экспериментов с другими энтузиастами. Должна быть представлена на сайте и максимально полная информация о спутниках, которая будет содержать карты земли в космических координатах, зоны видимости, прочие технические подробности. Конечно, будут включены в этот сайт и элементы мультимедийной информации – движение высокоэллиптических спутников вокруг Земли; часы, наиболее удобные для проведения экспериментов, когда информацию с «Экспресс-РВ» можно передавать на тот или другой геостационарный спутник, который

тоже можно попробовать включить в эксперимент. В этом сайте не так много информации, но вся она мультимедийная, табличная, потребностей в базе данных по ходу эксперимента [9, С.16] нет, но таблицы будут давать возможность разработчикам держать ориентир и на использование баз данных, где можно будет хранить информацию по экспериментам в дальнейшем. Так как сайт будет содержать блог, то таблица 7 рекомендует нам 2 средства: Ucraft или Wix. Рассмотрев другие возможности, нужно рекомендовать остановиться на Wix, так как Ucraft не позволяет собирать сайты из готовых блоков, что потребуется для того, чтобы участники блога могли реализовать свои идеи с мультимедиа самостоятельно, а потом легко интегрировать свои разработки в общий сайт, который они могут создать и попытаться продемонстрировать заинтересованным в таких экспериментах корпорациям.

Выводы

Таким образом, в статье на основе определений веб-ресурса, веб-сайта и веб-портала, хранимых на веб-серверах и предоставляющих в большинстве случаев веб-сервисы (веб-услуги), показано их единообразие и подмена русских понятий: централизованно хранимая информация, централизованная информационно-аналитическая система и взаимосвязанные в рамках единого централизованного информационного пространства элементы нескольких информационных и информационно-аналитических систем, которые целесообразно использовать при разработке таких информационных пространств.

В статье так же приведен обзор средств разработки веб-сайтов и рассмотрены два примера выбора программного обеспечения для разработки сайтов в соответствии с их целями и решаемыми задачами.

Литература

1. <http://ru.wikipedia.org> [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Веб-портал> (дата обращения: 17.01.2023).
2. Меньшикова Л.В. Некоторые подходы к разработке архитектуры информационно-аналитических системы // Двойные технологии. 2012. № 1(58). С. 2-6.
3. Меньшикова Л.В. Внедрение новых информационных технологий на крупномасштабном предприятии // Технологии и средства связи. 2011. № 5. С. 14-15.
4. Меньшикова Л.В. Риски внедрения новых технологий в проектах информатизации на крупномасштабном предприятии // Двойные технологии. 2012. 3. С. 10-17.
5. Меньшикова Л.В. Методы интеграции информации на основе различных подходов к управлению метаданными // Двойные технологии. 2012. № 3. С. 10-17.
6. Меньшикова Л.В., Найденов М.Ю. Подходы к разработке информационно-аналитической системы МАКСМ / Формирование современного информационного общества – проблемы, перспективы, инновационные подходы: Материалы Международного форума, Санкт-Петербург, 30 мая-3 июня 2011 г. / СПб.: ГУАП, СПб. 2011. С. 139-144.
7. Артюшенко В.М. Сервис информационных систем в электротехнических комплексах. Монография / Москва. 2010. 142 с.
8. Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Эффективность защиты от внешних помех электропроводных каналов структурированных кабельных систем для переда-

- чи высокоскоростных информационных приложений // Информационные технологии. 2014. С. 13-24.
9. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С.14-20.
- 10.Меньшикова Л.В., Меньшиков В.А., Найденов М.Ю. Вычислительные методы математики: Учебное пособие / Королевский институт управления, экономики и социологии. Королев МО: 2011. 142 с.
- 11.Елена Иващук «10 лучших конструкторов для создания сайта: подробный обзор», 2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unisender.com/ru/blog/idei/konstruktory-sajtov/> (дата обращения: 17.12.2023).
- 12.Меньшикова Л.В. Геостационарные сети спутниковой связи. Учебное пособие. М.: МИРЭА, 2005 г. 208 с.

УДК 004.05

Математическое и программное обеспечение вычислительных компьютерных сетей, повышение их эффективности путём внедрения принципов и компонентов программно-определяемой сети (часть 3)

Ю.В. Стреналюк, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,
И.Н. Леандров, магистрант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В части 3 показаны результаты тестирования, на основе которых сделаны выводы, как повысилась эффективность локально-вычислительной сети с внедренными компонентами ПКС и какова перспектива использования технологии ПКС на основе этих результатов. Технико-экономическое обоснование варианта реализации проекта будет представлено в виде результата расчета суммы затрат на реализацию прототипа, состав которого определен в экспериментальном стенде.

Вычислительные сети, компьютерные сети, программно-определяемые сети.

Mathematical and software support of computing computer networks, improving their efficiency by implementing the principles and components of a software-defined network (part 3)

Yu.V. Strenalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department «Information Technologies and Control Systems»,
I.N. Leandrov, Master's student of the Department «Information Technologies and Control Systems»,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Part 3 shows the results of testing, on the basis of which conclusions are drawn, how the efficiency of a local area network with embedded PC components has increased and what is the prospect of using PC technology based on these results. Feasibility study of the ABM implementation option.

Computer networks, computer networks, software-defined networks.

Часть 3. Выбор варианта реализации и технико-экономическое обоснование варианта реализации проекта

1. Вариант реализации предложенной модернизированной модели ЛВС

Способ реализации зависит от выбора коммутатора/контроллера ПКС, который будет интегрироваться в сетевую инфраструктуру.

Существуют несколько видов ПКС-коммутаторов:

- 1) Гибридные (с поддержкой протокола *Openflow*)
- 2) Программный: обычный сервер с различными конфигурациями
- 3) Аппаратный: на основе сетевых процессоров

Гибридные решения представляют собой обычный коммутатор, который может переключаться на режим *openflow* и с помощью таблицы правил задавать режим работы. Основным недостатком такого решения является недостаточная гибкость, так как таблица правил будет ограничена в размерах. Однако такие решения могут подойти для предприятий средних размеров, но никак не для крупных или магистральных участков сети.

Программные коммутаторы представляют собой надежный сервер с установленными сетевыми картами интерфейса 10 Gbit/s. Такая система является довольно гибкой и многогранной. Такое решение довольно универсальное и позволяет реализовать различные режимы работы, правила, политики безопасности.

Аппаратные коммутаторы представляют собой готовые ПКС-коммутаторы, которые работают исключительно в программно-конфигурируемом режиме. Это дорогостоящее решение, но позволяет реализовать абсолютно все задумки, так как может полностью программироваться с нуля, т.е. переписать логику работы коммутатора (Рис. 1).

В корпоративных сетях целесообразно использовать программные коммутаторы, так как могут масштабироваться в различных конфигурациях и для различного числа сетевых устройств предприятия.

Для реализации рекомендуется внедрить программный коммутатор для осуществления максимума функций ПКС без дополнительных изменений в сетевой инфраструктуре.

Исходя из рекомендации контроллера *OpenDayLight* для средней по масштабам локально-вычислительной сети от 100 до 500 устройств, каналов и хостов, рекомендуются следующие технические характеристики оборудования:

- 2,2-ГГц x86-64 8-ядерный процессор или аналогичный
- 32 ГБ ОЗУ
- 500 ГБ доступного дискового пространства
- Сетевые карты до 8 портов до 10 Gbps (Таблица 1).



Рисунок 1 – Пример реализации программного коммутатора ПКС

Таблица 1 – Характеристика программного коммутатора ПКС

Характеристики сервера	
Форм-фактор	1U
Процессор	Single Intel® Xeon® D-1527, Quad Cores, 2.20GHz (x2)
RAM	Kingston DDR4-2600 32gb
HDD	Seagate Enterprise Capacity 1tb, 7200 RPM, 128mb кэш-память
Сет. интерфейсы	SNR-E1G44ET2 10/100/1000Base-T (x3)
ПКС-контроллер	OpenDayLight, open vSwitch, mininet

Стоимость данного проекта составляет от 180 тыс. руб.

2. Оценка экономической эффективности варианта реализации предложенного варианта ПКС-сети

Экономический эффект направленный на снижение операционных затрат будет происходить за счет оптимизации процессов управления и автоматизации повседневной деятельности сотрудников ИТ. Экономия капитальных затрат реализуется за счет программной реализации сетевых сервисов и возможности использовать сетевое оборудование. В результате появляется возможность создать унифицированную инфраструктуру, где каждый элемент можно заменить любым другим, а расширение не требует закупок продуктов определенного производителя. При этом все функциональные сетевые сервисы, реализуются на программном уровне. В совокупности это позволяет строить интеллектуальные сети корпоративного класса с меньшими затратами.

Аналитики *Infonetics Research* считают, что внедрение ПКС может снизить операционные расходы телекоммуникационной инфраструктуры на 48% в год, капитальные – на 52%. Непосредственно в компании *VMware* отмечают, что решение *VMware NSX* позволяет сэкономить примерно 70% капитальных затрат, если говорить о стратегии информационной безопасности. При этом трудозатраты на выполнение типовых задач администрирования сети могут быть снижены

до 87%. В частности, сервис-провайдер *NTT Communications*, внедривший *VMware NSX*, сообщает об уменьшении трудозатрат в результате переноса приложений клиентов в облачную среду на 70%.

Для любой реализации технологии, системы или комплекса вначале необходимо оценить экономический эффект, который будет достигнут в результате.

Оценка экономической эффективности проекта проводится с использованием методики *TCO* (*total cost of ownership* – Совокупная стоимость владения). Под показателем *TCO* понимается сумма прямых и косвенных затрат на реализацию проекта, т.е. совокупные затраты на нее в течение одного года.

TCO является ключевым количественным показателем эффективности процессов автоматизации компании, так как позволяет оценить совокупные затраты на информационные технологии (оборудование, инструментальные средства (ПО), процессы сопровождения информационных систем, а также действия конечных пользователей), анализировать их и соответственно управлять ИТ-затратами (бюджетом) для достижения наилучшей отдачи от ИТ в организации. *TCO* представляет собой не просто отдельный интегральный показатель, но целую систему показателей, соответствующих различным статьям расходов.

TCO по текущему, эталонному и целевому проекту выраженный в денежном эквиваленте, и сравнительная характеристика между ними выраженных в процентах будет являться исходящей информацией.

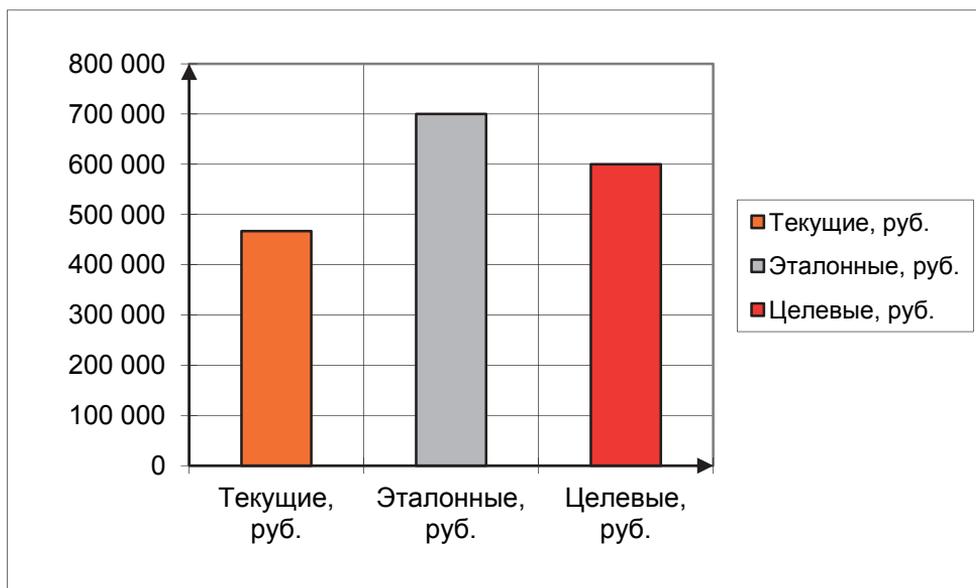


Рисунок 2 – Сравнение полученных затрат

Расчет совокупной стоимости владения заключается в определении прямых и косвенных затрат. Расчет стоимости обслуживания ведется за промежуток равный 1 году. Показатели расчета экономической оценки представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Экономическая оценка эффективности методом *TCO* (цены 2021)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Категории затрат	Текущие, руб.	Эталонные, руб.	Целевые, руб.	Разница между эталонными и текущими, руб.	Разница в %	Разница между целевыми и эталонными, руб.	Разница в %	Разница между целевыми и текущими, руб.	Разница в %
Прямые затраты									
Затраты на программное обеспечение и оборудование	181818	250000	210000	68 182	27	-40000	-19	28 182	13
Операционные затраты (управление)	140000	200000	180000	60 000	30	-20 000	-11	40 000	22
Административные затраты (поддержка)	40 000	65 000	55 000	25 000	38	-10 000	-18	15 000	27
Общие прямые	361818	515000	445000	153182	30	-70 000	-16	83 182	19
Косвенные затраты									
Поддержка конечных пользователей	25000	55000	45 000	30 000	55	-10 000	-22	20 000	44
Простой	80000	130000	110000	50 000	38	-20 000	-18	30 000	27

Общие косвенные	105000	185000	155000	80 000	43	-30 000	-19	50 000	32
Ежегодный ТСО	466818	700 000	600 000	233 182	33	-100000	-17	133 182	22

Исходя из приведенных результатов таблицы можно подытожить, что общая сумма затрат будет равна:

1. Текущие затраты – 466818 руб.;
2. Эталонные затраты – 700000 руб.;
3. Целевые затраты – 600000 руб.

Соотношение текущего, эталонного и целевого вариантов можно отобразить графически (Рис. 2).

Из рисунка видно, что несмотря на то что, что целевые затраты больше текущих на 22%, они ниже эталонных на 17%, это говорит о том, что проект экономически выгоден, а высокая стоимость обуславливается новыми компонентами, используемыми в подсистеме компьютерной безопасности базового предприятия.

Таким образом выводом данного параграфа можно считать, то, что проведенные мероприятия по модернизации локально-вычислительной сети требуют наименьших затрат чем эталонные затраты, что является большим плюсом для рассматриваемого проекта. Итоговая стоимость предложенного проекта 600000 руб.

Выводы по части 3

1. Был определен способ реализации предложенного проекта по модернизации локально-вычислительной сети, где был выбран вариант создания программного коммутатора ПКС на основе серверного решения с требуемыми характеристиками.

2. Затраты на реализацию предложенного проекта соответствуют целевым затратам, определенной методикой ТСО и равны 600000 рублей. Целевые затраты на предложенный проект дороже на 133 тыс. руб., чем затраты на текущий проект – это на 22% превышает нынешние затраты. Но затраты на целевой проект дешевле эталонного на 100 тыс. руб. – это 17%. Высокая стоимость обусловлена обуславливается новыми компонентами.

Литература

1. TCPDUMP DOCUMENTATION [Электронный ресурс]. Сайт TCPDUMP and LIBPCAP. 2010. Режим доступа: <http://www.tcpdump.org/#documentation>.
2. OpenFlow Tutorial [Электронный ресурс]. Сайт OpenFlow. 2012. Режим доступа: http://www.openflow.org/wk/index.php/ /OpenFlow_Tutorial#Controller_Choice:_NOX_w.2FPython.

3. Rob Sherwood Cbench: an OpenFlow Controller Benchmark [Электронный ресурс]. S. Rob // Сайт OpenFlow. 2015. Режим доступа: <http://www.openflow.org/wk/index.php/Oflops>.
4. Ушакова М.В. Измерение производительности программно-конфигурируемых сетей в центрах обработки данных // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. № 2. С. 86-89.
5. Башилов Г.В. Программно-аппаратная идиоллия, или OpenFlow // Журнал сетевых решений / LAN. 2011. № 9. С. 54-58.
6. Программно-конфигурируемые сети – как это работает? [Электронный ресурс]. Сайт habrahabr. 2012. Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/149126>.
7. OpenFlow Switch Specication [Электронный ресурс]. Сайт OpenFlow. 2011. Режим доступа: <http://www.openflow.org/documents/openflow-спес-v1.0.pdf>.
8. Смелянский Р. Программно-конфигурируемые сети // Журнал сетевых решений / LAN. 2012. № 9. С. 15-26.
9. Малахов С.В. Экспериментальные исследования производительности сегмента программно-конфигурируемой сети / В.Н. Тарасов, С.В. Малахов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2013. № 2. С. 81-85.
10. ПКС-контроллеры с открытым кодом [Электронный ресурс]. Сайт Habrahabr. 2015.
11. Iperf [Электронный ресурс]. Сайт iperf. 2008. Режим доступа: <http://iperf.sourceforge.net>.

УДК 621.391

Оценка влияния помех радиоэлектронных устройств на беспроводные устройства малого радиуса действия

С.М. Строганова, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

Н.Н. Теодорович, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

М.П. Шумилин, студент направления 09.04.03 «Прикладная информатика» (магистр),

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

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

В работе приводятся оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на беспроводные устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией и частотной модуляцией; зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал-шум и отношения сигнал-помеха.

Беспроводные устройства малого радиуса действия, отношение сигнал-шум, отношение сигнал-помеха, плотность вероятности, вероятность ошибки.

Evaluation of the influence of interference from radio electronic devices on short-range wireless devices

S.M. Stroganova, senior teacher of information technology and management systems department,

N.N. Teodorovich, assistant professor of information technology and management systems department,

M.P. Shumulín, student of the direction 09.04.03 «Applied Informatics» (master), State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article presents an assessment of the impact of noise interference of various types (Gaussian noise, harmonic signal and combined interference) on short-range wireless devices with pseudo-random tuning of the operating frequency and double frequency modulation and frequency modulation; dependence of the error probability on the signal-to-noise ratio and the signal-to-noise ratio.

Short-range wireless devices, signal-to-noise ratio, signal-to-noise ratio, probability density, error probability.

Шумовые помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией

Рассмотрим шумовые помехи, которые представляют собой белый шум, распределенный по нормальному закону. В системе беспроводных устройств малого радиуса действия (УМРД) реализованы методы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) и двойной частотной манипуляции (МЧ). В работе [3] приводится оценка для величины средней вероятности ошибки, рассчитанной на один информационный канал (ИК), когда шумовые помехи от РЭУ приходится на интервал перескока частот в беспроводных устройствах малого радиуса действия:

$$P_B = K_{\text{пер}} P_{B1} [E_c (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})] + (1 - K_{\text{пер}}) P_{B0} [E_c / G_{\text{ш}}] \quad (1)$$

где: P_B – это усредненное значение вероятности ошибки, рассчитанной на объем информации, равный одному биту, в случае воздействия помех на УМРД; P_{B0} – это усредненное значение вероятности ошибки, рассчитанной на объем информации, равный одному биту, в случае нет воздействия помех на УМРД; $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, лежащий в диапазоне от нуля до единицы, характеризующий величину частоты перекрытия помехи.

Пусть $K_{\text{пер}}=1$. Тогда выражение (1) запишем в виде:

$$P_B = P_{B1} [E_c (G_{\text{ш}} + G_{\text{п}})]$$

Среднюю вероятность ошибки на основной информационный канал можно, рассчитать по следующей формуле (предполагаем, что помеха представляет собой белый шум):

$$P_{B,\text{осн}} = (2 + \beta)^{-1} \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\} \quad (2)$$

Среднюю вероятность ошибки на дополнительный информационный канал можно, рассчитать по следующей формуле (предполагаем, что помеха представляет собой белый шум):

$$P_{B,\text{доп}} = [(1 + \beta)/(2 + \beta)] \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\} \quad (3)$$

Суммарная средняя вероятность ошибки на основной информационный канал и на дополнительный информационный канал определяется следующим выражением:

$$P_{B,\text{осн+доп}} = 0,5 \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\}$$

Из формул (2) и (3) определим усредненную вероятность, которая приходится на прием информации в 1 бит:

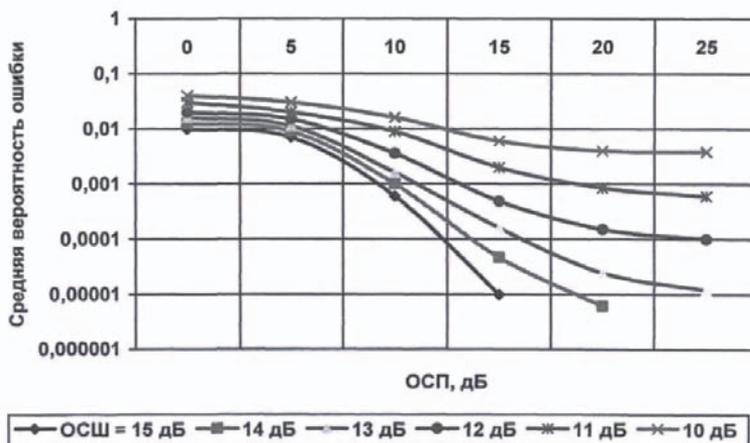
$$P_B = 0,5(P_{B,\text{осн}} + P_{B,\text{доп}}) = 0,5 \exp\{-[2G_{\text{ш}}/E_c + P_{\text{п}}/P_c]^{-1}\}.$$

Обозначим отношения сигнал – шум и сигнал – помеха как:

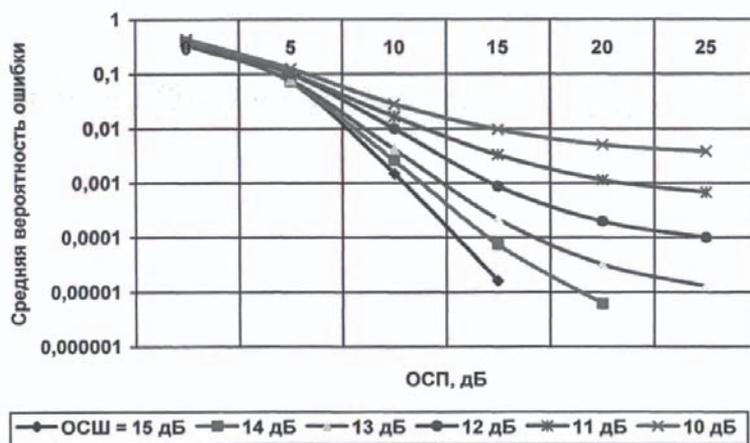
$$\rho_{\text{ш}} = E_c / G_{\text{ш}} \quad \text{и} \quad \rho_{\text{п}} = E_c / G_{\text{п}} \quad \text{Тогда (1) можно переписать в виде:}$$

$$P_B = 0,5 \exp\{-[2\rho_{\text{ш}}^{-1} + \rho_{\text{п}}^{-1}]^{-1}\} \quad (4)$$

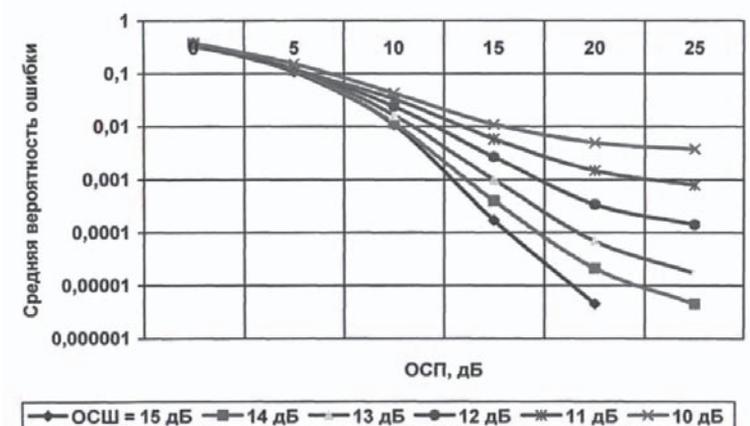
Зависимости средней вероятности ошибки показаны от ОСП для разных отношений сигнал/шум показаны на рисунке 1. Шумовая помеха воздействует на основной, дополнительный и оба канала одновременно, соответственно. Из рисунка видно, что оба показателя (отношение сигнал-шум и отношение сигнал-помеха) будут оказывать влияние на величину средней вероятности ошибки. С увеличением отношения сигнал-шум, величина отношения сигнал-помеха оказывает меньшее влияние на значение средней вероятности.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Зависимость СВО от ОСП для различных типах воздействия:
а) – на основной канал; б) – на дополнительный канал; в) – на основной и дополни-
тельный каналы

Также из графиков видно, на дополнительном канале отрицательное воздействие помех сказывается сильнее. Так как максимум средней вероятности стремится к $\frac{1}{2}$, то можно заключить, что наиболее помехозащищенными оказываются устройства, для которых постоянно меняется разность частот между каналами. На рисунке 2 изображена модель приемника УМРД с двойной частотной манипуляцией [2]. В соответствии с рисунком 43 изображены основные компоненты такой системы: ГПСК – генератор последовательности псевдослучайных чисел; ДО – демодулятор огибающей исходного сигнала; РУ – решающее устройство; СЧ – синтезатор частот; ПФ – фильтр, пропускающий в определенной полосе частот.

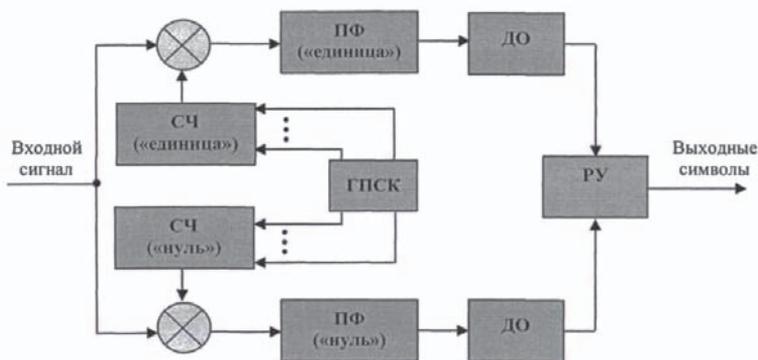


Рисунок 2 – Схема приемника УМРД с двойной ЧМ

Максимум средней вероятности ошибки $\rightarrow \frac{1}{2}$ при отношении СП $\rightarrow 0$ по формуле (4) для случая, когда воздействие помехи оказывается на основной и дополнительный каналы приемника.

Решая $\frac{dP_B}{dP_n} = 0$ в (4), можно для случая, когда помеха оказывает воздействие на основной канал, найти оценку максимума средней вероятности:

$$P_{B, \max. \text{осн}} \approx \begin{cases} \rho_{\text{ш}}^{-1} E^{-1}, & P_n = P_c - 2\sigma_{\text{ш}}^2 > 0; \\ 0,5 \exp\{-0,5\rho_{\text{ш}}\}, & P_n = P_c - 2\sigma_{\text{ш}}^2 \leq 0; \end{cases}$$

где $\sigma_{\text{ш}}^2$ – мощность собственных шумов приемника.

Таким образом, нельзя пренебрегать шумовыми помехами от приемника, если даже устройство по мощности значительно меньше, чем устройство, создающее помеху.

Шумовые помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией

На рисунке 3 приводится схема передачи сигнала на устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией со схемой выбора максимума частоты (СВМ) и широкополосным фильтром (ШПФ).

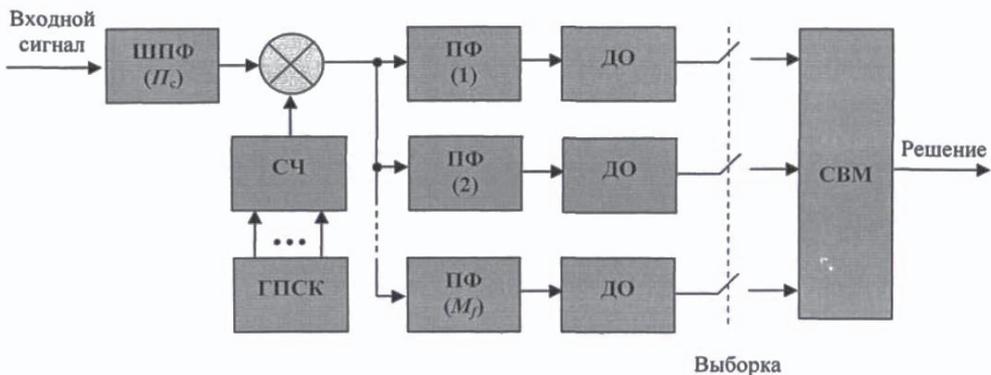


Рисунок 3 – Устройство малого радиуса действия с М-ичной частотной модуляцией

Согласно работе [30] для случая, когда используется М-ичная ЧМ можно определить среднюю вероятность ошибки приема сигнала, приходящего на 1 бит информации по следующей формуле:

$$P_B = M[2(M - 1)]^{-1}(1 - P_K)$$

Здесь P_K представляет собой вероятность напряжения превышения выходного напряжения (М-1) каналов детектора над напряжением на выходе канала; М – весь алфавитный набор сигнала.

Вероятность напряжения находится по формуле:

$$P_B = M[2(M - 1)]^{-1}(1 - P_K)$$

Функция плотности вероятности согласно работе [2]:

$$f_c(z_c) = \frac{z_c}{\sigma_n^2 + \sigma_m^2} \exp \left[-\frac{z_c^2 + P_c}{2(\sigma_n^2 + \sigma_m^2)} \right] I_0 \left(\frac{\sqrt{P_c}}{\sigma_n^2 + \sigma_m^2} z_c \right)$$

Функция плотности вероятности для случая, когда присутствуют только собственные шумы определяется формулой:

$$f_0(z_n) = \left[\frac{z_n}{\sigma_m^2} \right] \exp \left\{ -\frac{z_n}{2\sigma_m^2} \right\}$$

Для определения вероятности ошибки, которая приходится на объем информации величиной в 1 бит, в случае шумового воздействия на устройства малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и М-ичной частотной модуляцией:

$$P_{\text{Б,осн}} = \frac{M}{2(M-1)} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} \frac{1}{1 + \frac{m}{m+1} \beta} \exp \left\{ -k \rho_n^{-1} + \frac{m+1}{m} \rho_n^{-1} \right\}^{-1} \quad (5)$$

где:

$$M = 2^k, k = 1, 2, 3, \dots, k = \log_2 M; m \in [1, M]; \beta = \rho_{\text{ш}} / \rho_{\text{п}}$$

На рисунке 4 показана зависимость этой величины от ОСШ для разных значений ОСШ и разных М.

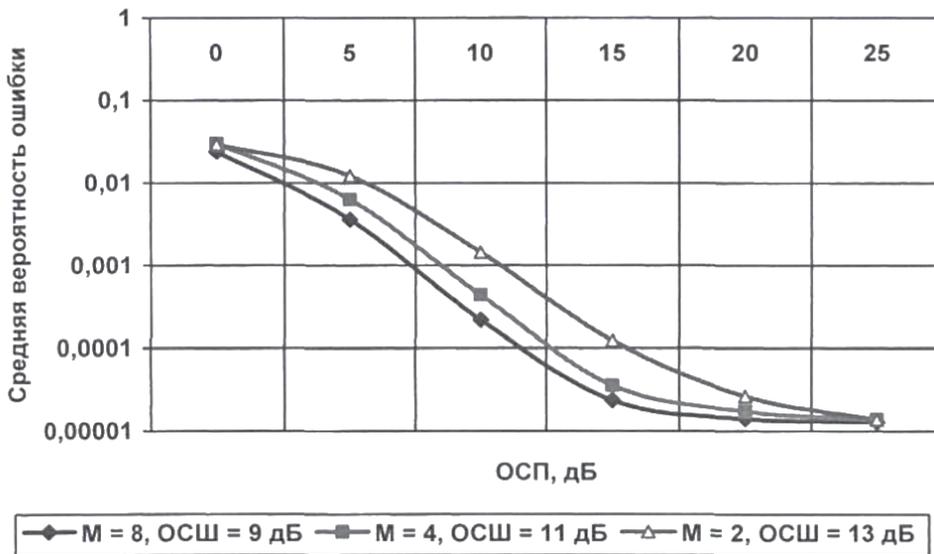


Рисунок 4 – Зависимость СВО от ОСП

Как видно, вероятность ошибки $\rightarrow 10^{-5}$ когда растет ОСШ.

Таким образом, при наличии шумовой помехи максимум средней вероятности ошибки можно определить, решив уравнение $\frac{dP_{Б.осн}}{d\rho_{п}} = 0$ применительно к (5):

$$\rho_{п} = (m/(m+1))\rho_{ш} / \left[\frac{m}{m+1\rho_{ш}k} - 1 \right] \quad (6)$$

Поскольку $m/(m+1)\rho_{ш}k \gg 1$, то в первом приближении, считаем, что соотношение (5) примет вид $\rho_{п} \approx k^{-1}$, а подставив в (6), получим:

$$P_{Б.тахосн} = \frac{M}{2^{(M-1)}} \sum_{m=1}^{M-1} (-1)^{m+1} \binom{M-1}{m} \frac{e^{-1}}{mk\rho_{ш}}$$

На рисунке 5 показаны зависимости $P_{Б.тахосн}$ от ОСШ для разных M и ОСШ. Видно, что при наибольшем значении отношения сигнал/шум для приемника УМРД достигается наименьшее влияние шумового сигнала УМРД с ППРЧ и M -ичной ЧМ. Также помехоустойчивость возрастает при увеличении размера алфавита сигнала M .

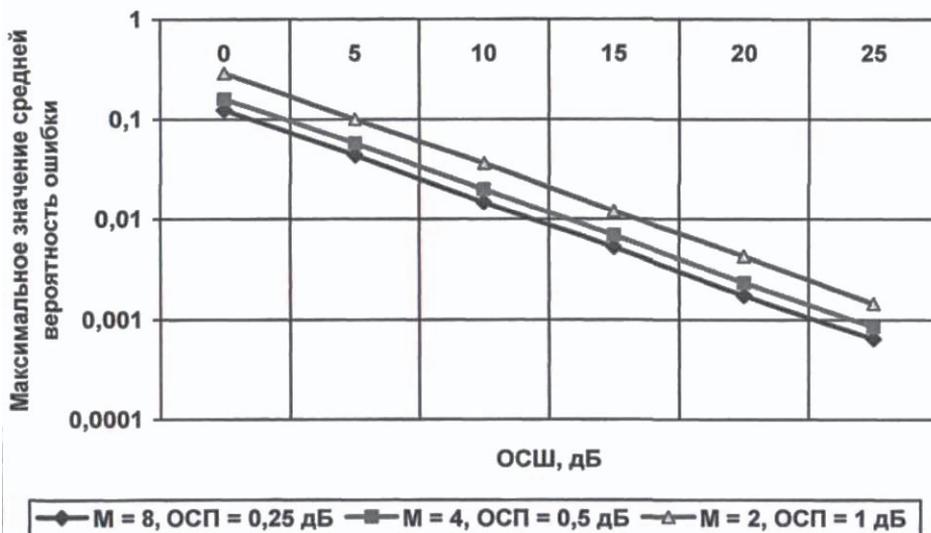


Рисунок 5 – Зависимость максимального значения средней вероятности от отношения сигнал – шум

Сравнивая последние два выражения, можно заключить, что более помехоустойчивым является УМРД с ППРЧ и M -ичной ЧМ. Если M возрастет до 4, то воздействие шумовых помех станет меньше на 2дБ. Рост до 8 приводит к уменьшению на 3 дБ.

Шумовые гармонические помехи на устройствах малого радиуса действия с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты и двойной частотной модуляцией

Рассмотрим шумовые сигналы, имеющие равномерное распределение по фазе, частота сигнала совпадает с частотой помех.

Вероятность ошибки, когда $K_{пер} = 1$, согласно работе [2], можно рассчитать из следующего выражения:

$$P_{Б.осн} = \frac{1}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\{-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1} + 2\sqrt{\rho_c^{-1}} \cos \theta)\} d\theta \quad (7)$$

где θ – разность фаз помеха-сигнал, $\theta \in [-\pi; \pi]$.

Взяв среднее интегральное представление по фазе функции Бесселя нулевого порядка первого рода к формуле (7), получим:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[x \cos(u + v)] du \quad (8)$$

$$P_{Б.осн} = \frac{1}{2} \exp\{-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1})\} I_0(\rho_{ш}\sqrt{\rho_c^{-1}})$$

На рисунке 6 представлена кривая изменения средней вероятности от отношения СП для величины отношения сигнал/шум равной 13дБ. Видно, что с ростом отношения СП средняя вероятность ошибки падает.

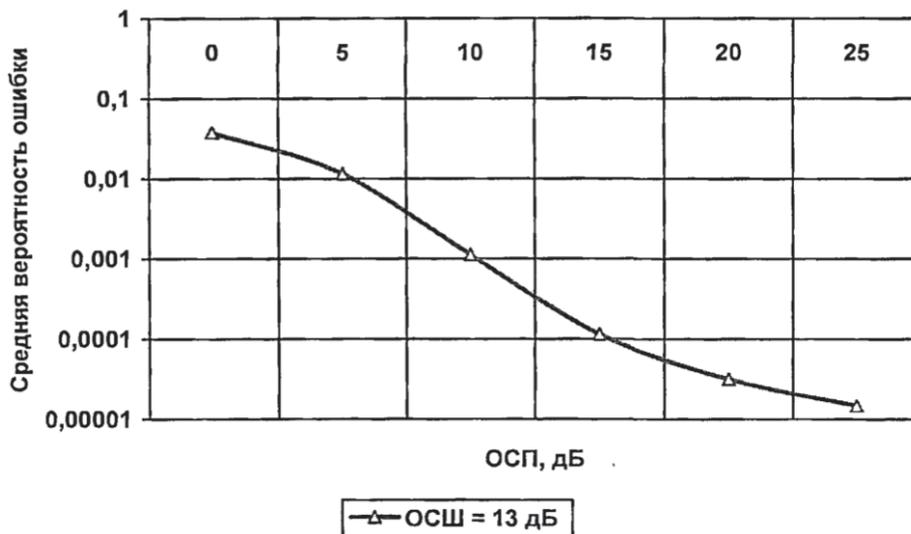


Рисунок 6 – Зависимость СВО от ОСП

Воспользовавшись асимптотикой Бесселя:

$$I_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x}} \exp(x), \quad x \gg 1 \quad (9)$$

запишем формулу (8) в виде:

$$P_{Б.осн} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{ш}^2}{2\pi\sqrt{P_c P_{ш}}} \right)^{0,5} \exp \left[-\frac{(P_c^{0,5} - P_{ш}^{0,5})^2}{2\sigma_{ш}^2} \right], \quad (P_c P_{ш})^{0,5} \geq \sigma_{ш}^2 \quad (10)$$

Решая уравнение $\frac{dP_{Б.осн}}{dP_{ш}} = 0$, к (8), получим, что в случае, когда $P_{ш} = P_c$ т.е. когда помеха воздействует на основной канал, мощность шумовой помехи эквивалентна мощности полезного сигнала, и максимум вероятности можно определить по формуле:

$$P_{Б.тахосн} \approx 0,5(1/2\pi\rho_{ш})^{0,5}, \quad P_{ш} \approx P_c \gg \sigma_{ш}^2$$

В случае воздействия на дополнительный канал, мощность помехи может быть определена, согласно данным работы [9], как:

$$P_{Б.доп} = Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш})^{0,5}] - 0,5 \exp[-0,5\rho_{ш}(1 + \rho_{п}^{-1})] I_0[\rho_{ш}(\rho_{п}^{-1})^{0,5}]$$

На рисунке 7 представлены зависимости средней вероятности от ОСП, для разных ОСШ. Видно, что при воздействии на дополнительный канал, если ОСП < 15 дБ, помеха сильнее оказывает влияние на значение средней вероятности по сравнению с воздействием на основной канал. Максимум средней вероятности $\rightarrow 1$, при $\rho_{п} \rightarrow 0$.

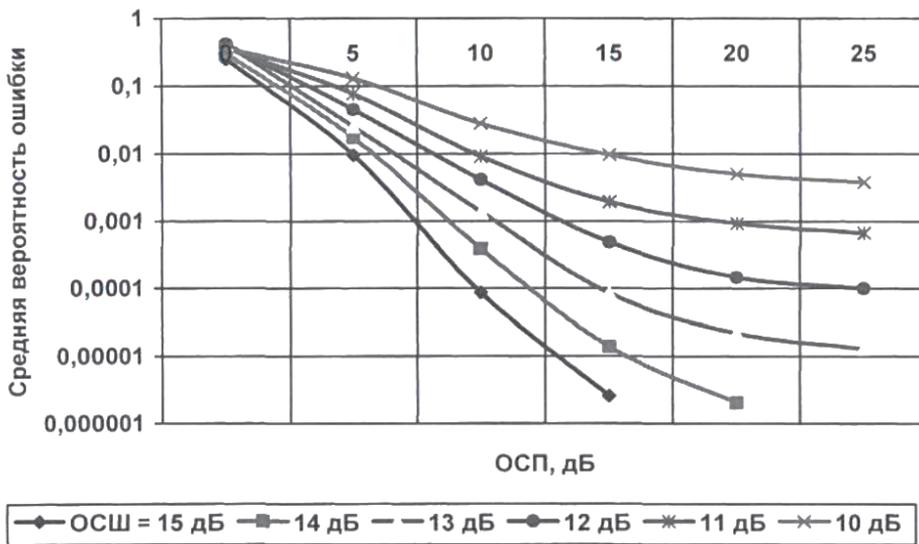


Рисунок 7 – Кривые зависимости средней вероятности ошибки от отношения сигнал – помеха

Таким образом при воздействии помехи гармонического типа на один из каналов можно определить среднюю вероятность ошибки как:

$$P_B = 0,5(P_{B,осн} + P_{B,доп}) = 0,5Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш})^{0,5}]$$

Когда гармоническая помеха воздействует как на основной, так и на дополнительный каналы, то средняя вероятность ошибки (согласно [2]) может быть рассчитана по формуле:

$$P_{B,осн+доп} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left\{ Q[(\rho_{ш}/\rho_{п})^{0,5}, (\rho_{ш}(1 + \rho_{п}^{-1} + 2\sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta))^{-0,5}] - 0,5 \exp[-\rho_{ш}(0,5 + \rho_{п}^{-1} + \sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta)] \times I_0[\rho_{ш}(\rho_{п}^{-1}(1 + \rho_{п}^{-1} + 2\sqrt{\rho_{п}^{-1}} \cos \theta))^{0,5}] \right\} d\theta$$

На рисунке 8 приводится зависимость средней вероятности ошибки, когда на основной канал воздействует две помехи гармонического типа. Мощность обеих помех равная. ОСШ= 13дБ. Если сравнить кривые зависимостей на рисунках 6 и 8, то можно заключить, что средняя вероятность ошибки больше, когда воздействуют две помехи гармонического типа на основной и дополнительный каналы, по сравнению с воздействием одиночной гармонической помехи.

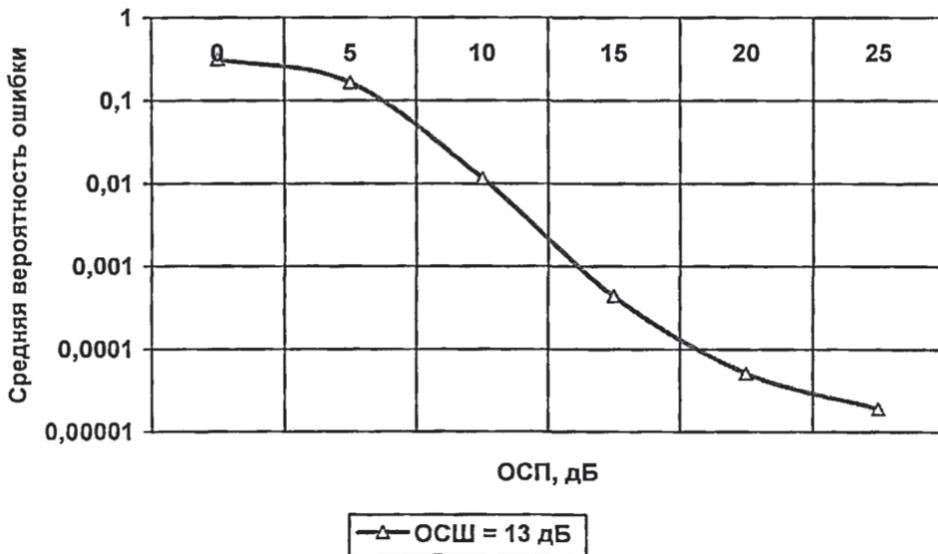


Рисунок 8 – Зависимость СВО от ОСП

Рассмотрим случай, когда между сигналом и помехой разность фаз меняется $-\pi$ до π . Это необходимо учитывать при оценке вероятности ошибки при наличии помех гармонического характера. Согласно работе [37] можно определить мощность суммарного сигнала между сигналом и помехой по следующей формуле:

$$P_{\Sigma} = P_c \left(1 + \left(\frac{2}{\rho_{\text{п.с}}} \right) \cos \theta + \rho_{\text{п}}^{-1} \right)$$

На рисунке 9 показаны кривые зависимостей, полученных по формулам (8) и (10) в зависимости от отношения сигнал-помеха. Из рисунка видно, что в случае, когда сигналы находятся в противофазе, то достигается максимум средней вероятности ошибки. Когда разность фаз равна нулю – средняя вероятность ошибки достигает минимального значения, отличающиеся на несколько порядков по значениям, если отношение сигнал/помеха стремится к единице.

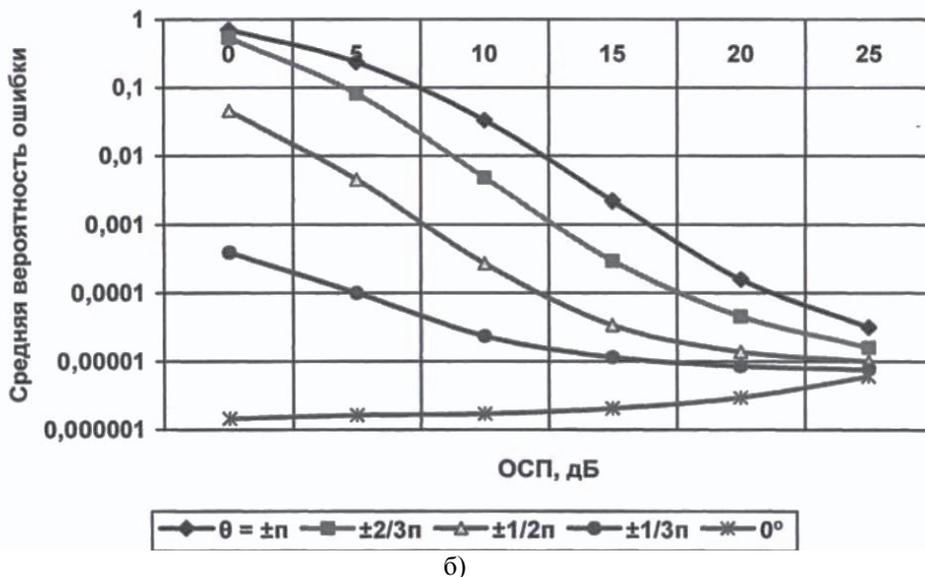
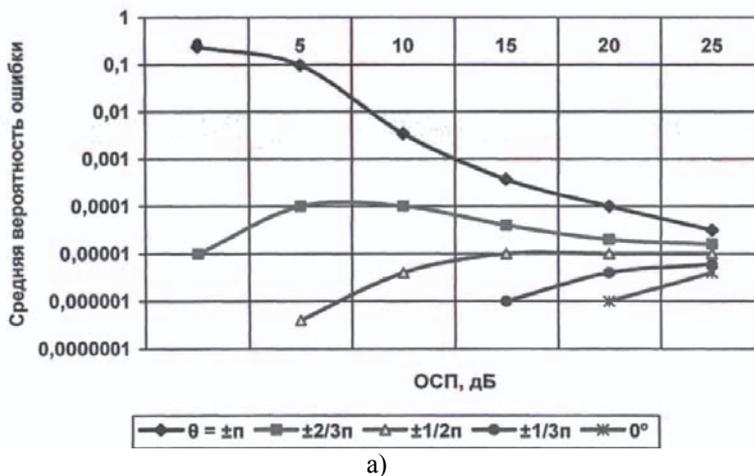


Рисунок 9 – Зависимость СВО от ОСП: а) – основной канал; б) – основной и дополнительный каналы

Гармонические помехи на УМРД с ППРЧ и М-ичной ЧМ

Рассмотрим воздействие гармонической помехи на УМРД с ППРЧ, когда используется М-ичная частотная манипуляция. Средняя вероятность ошибки (для основного канала) можно найти по формуле (7). Тогда величина функции плотности вероятности можно представить в виде следующего соотношения (по работе [2]):

$$f_c(z_c) = \frac{z_c}{\sigma_{\text{ш}}^2} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{\text{ш}}^2} (z_c^2 + P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0.5} \cos \theta) \right] I_0 \left[\frac{1}{\sigma_{\text{ш}}^2} (z_c^2 + P_c + P_n + 2(P_c P_n)^{0.5} \cos \theta) z_c \right]$$

Тогда согласно формулам, приводимым в работе [8], можно определить среднюю вероятность ошибки как:

$$P_{\text{Б.осн}} = \frac{M}{2^{(M-1)}} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} \exp \left\{ -k\rho_{\text{ш}} \left(1 + \rho_{\text{п}}^{-1} \frac{m}{m+1} \right)^{-1} I_0 \left(\frac{2m}{m+1} \right) k\rho_{\text{ш}} (\rho_{\text{п}}^{-1})^{0,5} \right\}$$

На рисунке 10 показаны зависимости СВО от ОСП для разных M и разных значений отношения сигнал-шум. Вероятность ошибки увеличивается до максимума при $\rho_{\text{п}} = 1$. Величина отношения сигнал-шум при этом уменьшается.

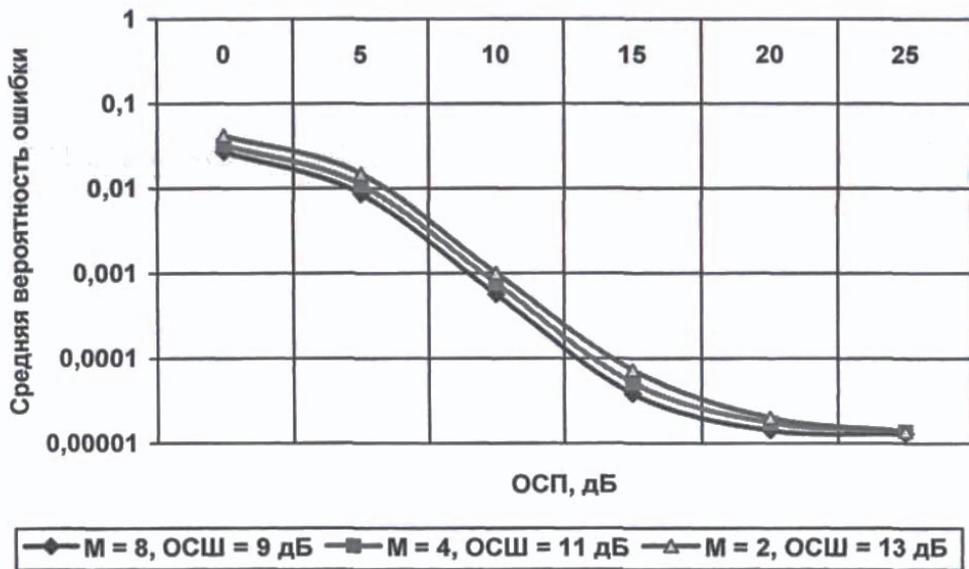


Рисунок 10 – Зависимость СВО от ОСП

Взяв среднее интегральное представление по фазе функции Бесселя нулевого порядка первого рода к формуле (9), получим:

$$P_{\text{Б.тахосн}} = \frac{M}{2^{(M-1)}} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{(-1)^{m+1}}{m+1} \binom{M-1}{m} 0,5 \left[\frac{m+1}{\pi m k \rho_{\text{ш}}} \right]^{0,5}, P_c = P_{\text{ш}}$$

На рисунке 11 представлены графики зависимостей максимального значения вероятности для приема информации величиной в 1 бит, когда помеха гармонического типа совпадает по мощности с основным сигналом. Кривые даются для разных M . Видно, что когда воздействует помеха гармонического типа на УМРД с ППРЧ и M -ичной частотной манипуляцией с увеличением M возрастет помехоустойчивость УМРД. При $M=4$ помехоустойчивость увеличивается на 2дБ, а при $M=8$ – на 3 дБ.

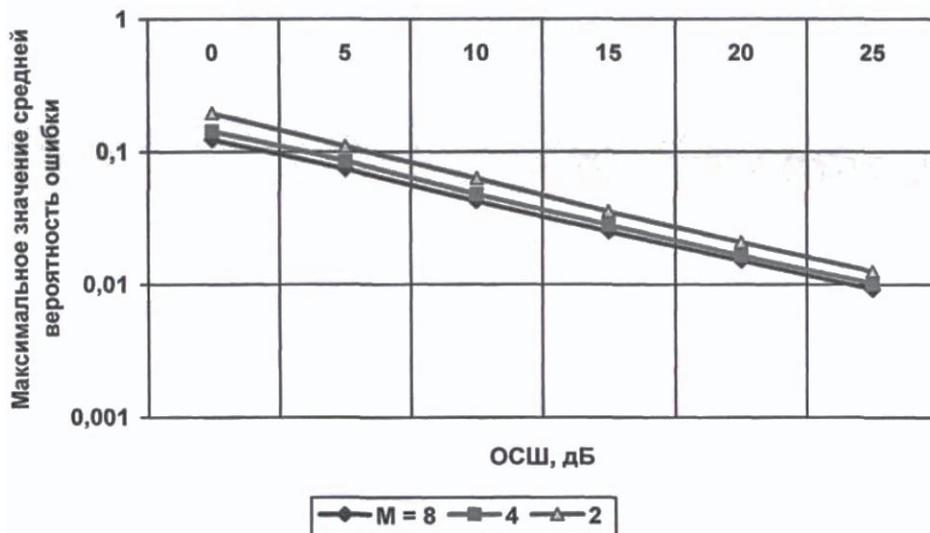


Рисунок 11 – Зависимость максимума СВО от ОСП

Таким образом, анализируя кривые зависимостей на рисунке 11, можно сделать вывод о том, что помехоустойчивость УМРД становится хуже, когда присутствуют помехи гармонического типа. Максимум средней вероятности ошибки уменьшается, когда увеличиваются значения отношения сигнал-помеха и сигнал-шум.

Комбинированные помехи на УМРД с ППРЧ и двойной ЧМ

Рассмотрим одновременное воздействие гармонической и шумовой помех на УМРД с ППРЧ и двойной частотной манипуляцией. В этом случае вероятность можно определить по формуле:

$$P_{\text{Б.осн}} = (2 + \rho_{\text{ш}}/\rho_{\text{п}})^{-1} \exp \left\{ -\frac{1 + \rho_{\text{п}}^{-1}}{\rho_{\text{п}}^{-1} + 2\rho_{\text{ш}}^{-1}} \right\} I_0 \left(\frac{\sqrt{\rho_{\text{п}}^{-1}}}{\rho_{\text{п}}^{-1} + 2\rho_{\text{ш}}^{-1}} \right) \quad (11)$$

На рисунке 12 представлены кривые зависимости вероятности от величины отношения сигнал/помеха, построенные согласно формуле (11). Величина отношения сигнал/шум составляет 13дБ. Приводятся кривые для трех видов помех: шумовой, гармонической комбинированной. Из графика видно, что при увеличении ОСШ помехи становятся практически неотличимы.

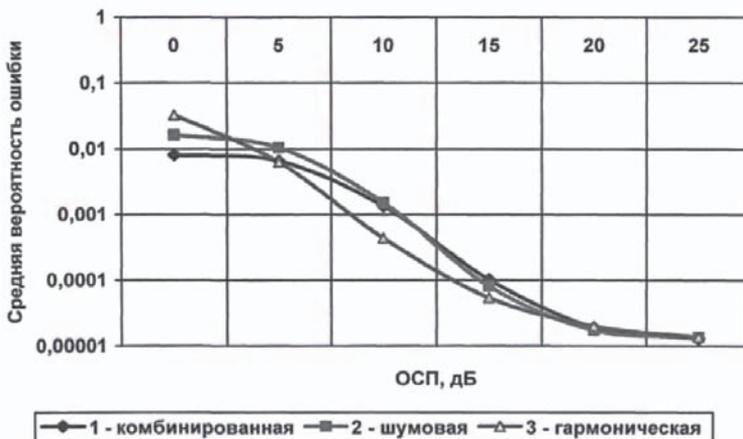


Рисунок 12 – Зависимость средней вероятности ошибки от отношения сигнал-помеха: а) – комбинированная помеха; б) – шум; в) – гармоническая помеха

Блоковое кодирование

Рассмотрим, как влияет воздействие разных помех на помехоустойчивость УМРД с ППРЧ, двоичной частотной модуляцией и блоковым кодированием. Когда используется блоковое кодирование, это означает, что можно менять параметры устройства малого радиуса действия и исправлять ошибки. На рисунке 13 приведена схема типового обнаружителя максимального правдоподобия [11]. На схеме отображены следующие компоненты, согласно работе [11].

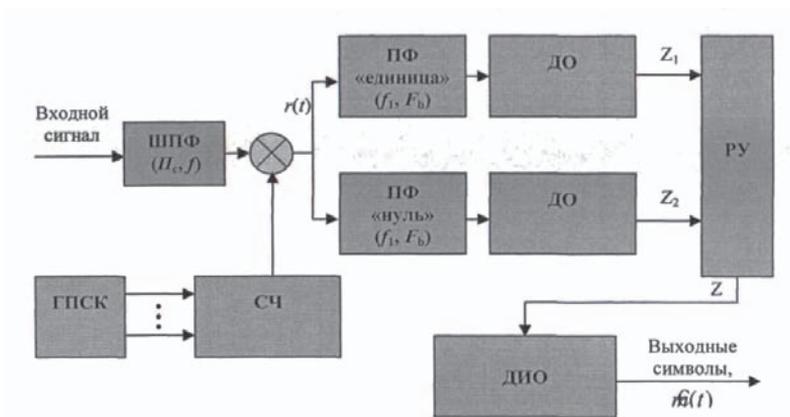


Рисунок 13 – Схема типового некогерентного обнаружителя максимального правдоподобия [11]

Средняя вероятность ошибки при использовании УМРД с ППРЧ и ЧМ двоичным блоковым кодированием может быть найдена по формуле (согласно [3, 10]):

$$P_{Б,к} \approx dn^{-1} \sum_{i=\alpha+1}^d \binom{n}{i} P_b^i(2) [1 - P_b(2)]^{n-i} + n^{-1} \sum_{i=d+1}^n \binom{n}{i} P_b^i(2) [1 - P_b(2)]^{n-i}$$

где: $P_b(2)$ – вероятность ошибки на один символ в канале. Энергия канального символа определяется выражением: $E_k = (k/n)E_c = V_k E_c$, где E_c – энергия сигнала. Тогда при воздействии шумовых помех можно записать:

$$P_{b,осн} = 0,5(1 + 0,5\rho_{ш}\rho_{п}^{-1})^{-1} \exp\{-V_k(2\rho_{ш}^{-1} + \rho_c^{-1})^{-1}\} \quad (12)$$

а при воздействии гармонических помех

$$P_{b,осн} = 0,5 \exp\{-V_k 0,5\rho_{ш}(1 + \rho_c^{-1})\} I_0[V_k\rho_{ш}(\rho_c^{-1})^{0,5}] \quad (13)$$

Как следует из выражений (12) и (13), когда $V_k=1$, то вероятность ошибки растет, что связано с применением кодирования.

Найдем максимум средней вероятности ошибки, когда на УМРД оказывают влияние помехи разного типа. Подставив выражение $\frac{dP_b}{d\rho_{п}} = 0$ в (12) и (13), получаем максимум средней вероятности ошибки:

– при воздействии шума:

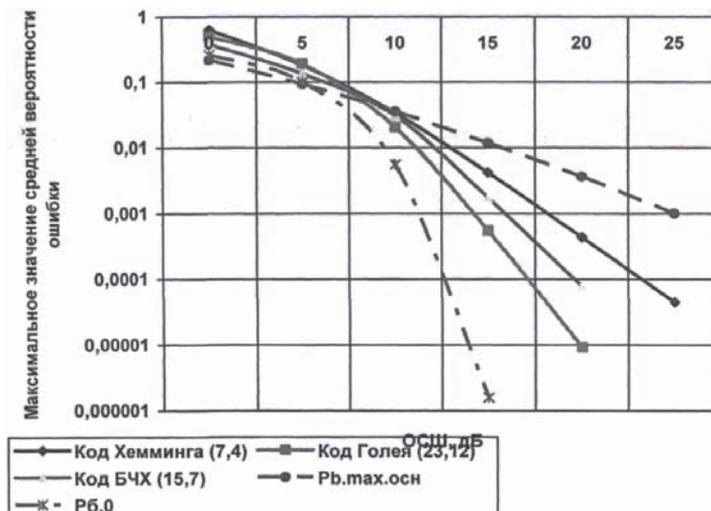
$$P_{b,махосн} \approx \rho_{ш}^{-1} V_k^{-1} e^{-1}, \rho_{п} = (V_k - 2\rho_{ш}^{-1})^{-1} \approx V_k^{-1} \text{ или } V_k \gg 2\rho_{ш}^{-1} \quad (14)$$

– при воздействии помехи гармонического типа:

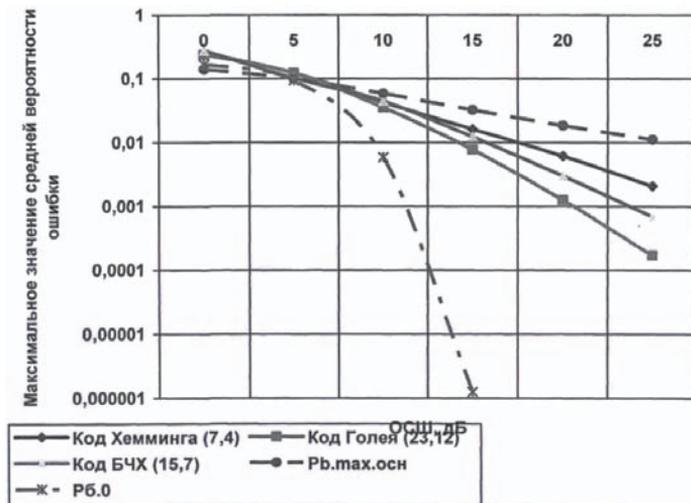
$$P_{b,махосн} \approx 0,5[(2\pi)^{-1}\rho_{ш}^{-1}V_k^{-1}]^{-1}, \rho_{п} \approx 1 \quad (15)$$

Из последних двух выражений следует, что максимум средней вероятности ошибки больше, когда воздействует шум и в (V_k^{-1}) больше, чем, когда воздействует помеха гармонического типа.

На рисунке 14 показаны кривые зависимости максимума СВО, когда шум и помеха представляют собой сигнал гармонического типа.



а)



б)

Рисунок 14 – Максимум СВО от ОСШ, когда на УМРД действует:
а) шум с $\rho_{\Pi} = V_k^{-1}$; б) – шум с $\rho_{\Pi} = 1$

Таким образом можно заключить, что, используя простые двоичные коды, можно повысить помехоустойчивость УМРД.

Выводы

1. Получена оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на УМРД с ППРЧ и ЧМ; зависимость вероятности ошибки от ОСШ и ОСП. Рост значения отношения сигнал/шум приводит к увеличению влияния на помехоустойчивость величины отношения сигнал/помеха, и наоборот. Наиболее помехозащищенными оказываются устройства, для которых частотный размах между каналами непрерывно меняется.

2. Получена оценка влияния шумовых помех разного типа (гауссовский шум, гармонический сигнал и комбинированная помеха) на УМРД с ППРЧ и M -ичной частотной манипуляцией. Показано, что вероятность ошибки стремится к значению 10^{-5} при увеличении значения величины отношения сигнал/помеха. Наиболее помехозащищенными оказываются устройства с наибольшим значением отношения сигнал/шум.

3. Получена оценка влияния помех гармонического типа на УМРД. Изменение средней вероятности ошибки связано с влиянием мощности мешающего сигнала и разность фаз между сигналом и приемников. Величина размаха между максимальным и минимальным значениями вероятности ошибки может отличаться на порядок, если отношение сигнал/помеха близко к единице.

4. Получена оценка влияния помех гармонического типа. Рост помехоустойчивости УМРД с увеличением размера алфавита сигнала M .

5. Получена оценка влияния комбинированной помехи на УМРД с ППРЧ и ЧМ, представляющей собой суперпозицию шумового и гармонического сигналов. Показано, что помехоустойчивость УМРД с при наличии комбинированной

помехи мало отличается от помехоустойчивости УМРД с ППРЧ и двоичной ЧМ при воздействии одной из помех.

6. Получена оценка влияния помех на с блоковым кодированием. Показано, что использование двоичных блоковых кодов повышает помехоустойчивость УМРД.

Литература

1. Артющенко В.М., Корчагин В.А. Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях беспроводных устройств малого радиуса действия // Промышленный сервис. № 4(31). 2009. С. 32-37.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: РадиоСофт, 2018. 512 с.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М., Мухини Н.П. др. Оценка воздействия ответных помех на системы радиосвязи с медленной ППРЧ // Теория и техника радиосвязи. 1994. Вып. 1. С. 3-19.
4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Николаев В.И. и др. Системы радиосвязи с расширением спектра сигналов (аналитический обзор) // Теория и техника радиосвязи. 1998. Вып. 1. С. 18-48.
5. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры. Пермь: изд-во Перм.гос.техн.ун-та, 2007. 312 с.
6. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1995. 264 с.
7. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2009. 520 с.
8. Blanchard J.E. A slow frequency-hopping technique that is robust to repeat jamming / IEEE Milconf 82, Conf.Boston, 1982. Vol. 1. P.14.1-14.19.
9. Torrieri D.J. Principles of Military Communication Systems. MA.: Artech House, Inc., 1981. 306 p.
10. Torrieri D.J. The Information – Bit Error for Block Codes // IEEE Trans. 1984. Vol. COM-32. № 4. P.474-476.
11. Torrieri DJ. Principles of Secure Communication Systems. MA.: Artech House Inc., 1985. 286 p.

УДК 004.05

Интерактивный мобильный помощник для космического экипажа

Т.С. Аббасова, кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Проанализированы возможности разработки элементов искусственного интеллекта в виде чат-ботов для космического экипажа. Показано практическое применение чат-ботов как помощников экипажа для предоставления справочной информации, видео инструктажа, поддержки морально-психологического состояния. Даны рекомендации по применению узкоспециализированных цифровых технологий для регистрации и активации чат-бота на основе подготовленных сценариев, написанию сценария для реализации определенных функций.

Мобильные устройства, устойчивость к радиации в космосе, онлайн-консультант, морально-психологическая поддержка.

Interactive mobile assistant for the space crew

T.S. Abbasova, Candidate of technical Sciences,
Associate Professor Department of Information technologies and control systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The possibilities of developing elements of artificial intelligence in the form of chat-bots for the space crew are analyzed. The practical application of chat-bots as crew assistants for providing background information, video briefing, and morale support is shown. Recommendations are given on the use of highly specialized digital technologies for registering and activating a chat-bot based on prepared scripts, writing a script to implement certain functions.

Mobile devices, radiation resistance in space, online consultant, moral and psychological support.

Введение

Интерактивный мобильный компаньон экипажа – это космический чат-бот. Чат-боты имеют огромный потенциал и в будущем способны заменить не только множество приложений и интернет-поисковиков [1, С.958]; но и помогать управлять несложными системами космического корабля. Поэтому разработка

чат-бота для космического экипажа актуальна, с учетом решения вопросов электромагнитной и радиационной устойчивости мобильных устройств на космическом корабле, для которых разрабатывается чат-бот.

Цель создания чат-бота: реализовать интерактивного мобильного компаньона для космического экипажа в виде чат-бота, который поддерживает морально-психологическое состояние [2], автоматизирует функции формирования ответов в переписке с членом экипажа, реагируя на ключевые слова по заданному сценарию [3], а также служит для автоматизации управления несложными системами космического корабля.

Результаты исследования

Электронные устройства в космосе прошли путь от беспроводных электроинструментов для комфортной работы на космическом корабле до интеграции искусственного интеллекта (ИИ) в космическую электронику. Направления применения ИИ на космических кораблях: обработка данных; использование обработанных данных для поиска планет, астероидов и т.д.; роботизация; взаимодействие с мобильными устройствами. Технологии ИИ на корабле сложно реализовать на процессорах, так как они не устойчивы к радиации.

Защита космической электроники к экстремальному радиационному фону осуществляется на уровне полупроводников в микросхемах и чипах. Целесообразно использовать чипы, реализованные с помощью технологий ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) или ASIC (от англ. application-specific integrated circuit – интегральная схема для конкретного применения») для обеспечения режима, устойчивого к радиации. Экспериментальные исследования воздействия на мобильный телефон внешнего излучения на Земле и электромагнитного излучения (ЭМИ) показали, что iPhone можно эксплуатировать только неделю на космическом корабле и несколько минут в открытом космосе. Поэтому для космоса разрабатываются мобильные устройства, устойчивые к радиации, ЭМИ, низким температурам, низкому давлению (0,6% от земного давления), пыльным бурям [5].

В настоящее время есть опыт использования космических помощников на международной космической станции (МКС) в составе космического корабля Союз МС-14 (Россия) и космического корабля Orion (NASA, США).

Российский космический помощник – это Робот Фёдор (Skybot F-850), его внешний вид приведен на рисунке 1.

Интерфейс космического помощника корабля «Орион» приведен на рисунке 2, это изображение в виде девушки на экране монитора.



Рисунок 1 – Российский робот-гуманоид для МКС



Рисунок 2 – Голосовой помощник Amazon Alexa в составе космического корабля Orion

Существуют и другие космические роботы, ИИ которых позволяет двигаться и действовать автономно, или он может работать в режиме «аватар» под контролем оператора, одетого в «полный костюм». Эти роботы выполняют также функции помощника и консультанта членов экипажа по различным вопросам.

Несмотря на огромный потенциал ИИ, в настоящее время проще и дешевле использовать чат-боты на основе подготовленных сценариев [3,7], в том числе при разработке помощников экипажа в виде чат-ботов. Такой помощник должен отвечать на вопросы, общаться в чате, приводить факты, предоставлять не только справочные сведения, но и проводить виртуальный инструктаж. Вот тут-то и проявится индивидуальность чат-бота. Личность чат-бота формируется с помощью языка в ответах, которые он дает. Способность распознавать эмоции и реагировать на них помогает сделать общение с чат-ботом более увлекательным и полезным. Технология, лежащая в основе такого эмоционального поведения чат-бота, развивается.

Таким образом, для поддержки морально-психологического состояния

челнов экипажа перед онлайн помощниками ставятся задачи не только отображать и объяснять информацию, чтобы помочь с экспериментами или справочными сведениями по различным системам корабля, но и воспроизводить музыку, парить вокруг, то есть, поднимать настроение. Для поднятия настроения обязательно использовать дорогие технологии, можно записать любимые мелодии членов экипажа, которые будут воспроизводиться после нажатия на определенную кнопку мобильного устройства. Бот должен быть способен проявлять хотя бы немного эмоций.

Для проявления эмоций есть анализ настроений. Анализ настроений находит индикаторы в текстовом общении, которые помогают определить положительные или отрицательные настроения. Затем они могут вызвать заранее написанные, чуткие ответы от чат-бота, или, еще лучше, эскалации до человеческого уровня.

Но иногда определение «положительного» и «отрицательного» настроения собеседника чат-ботом недостаточно точно, чтобы чат-бот мог правильно реагировать сам по себе. Что подводит нас к эмоциональному фактору. Это подмножество ИИ и связано с тем, чтобы позволить машинам (например, чат-ботам) распознавать эмоции и реагировать на них. Эмоциональные технологии еще молоды. И время от времени это может привести к неправильным результатам, что приведет к резкому эмоциональному сбою. С появлением личностей чат-ботов и эмоционального ИИ наши земные чат-боты вскоре могут столкнуться с личностным сбоем. И, учитывая сохраняющуюся потребность в эмпатии в популярных областях чат-ботов, таких как обслуживание клиентов, эмоциональные сбои – это тип промаха, который может стать более распространенным.

Подобно эмоциональному всплеску космического чат-бота, эмоциональный сбой может просто позабавить пользователей. Но это также напоминает им, что они разговаривают с ботом. Будь то в космосе или на земле, чат-боты приобретают индивидуальность. Именно эти личности – способность имитировать эмоции и сопереживание – делают их привлекательными.

Но точно так же, как машина может сломаться, или принтер может заклинить, иногда чат-бот может дать сбой. И с ростом способности чат-ботов проявлять эмоции эти сбои могут все чаще принимать форму личностного сбоя. Ни один чат-бот не является непогрешимым, даже самые современные боты в космосе. Итак, независимо от того, насколько хорошо бот умеет выглядеть человеком, он им не является. Всегда важно продолжать тестировать и настраивать своего чат-бота.

В данном исследовании проведено создание космического бота на основе подготовленных сценариев. Выбраны следующие узкоспециализированные цифровые технологии: бесплатное приложение для обмена мгновенными сообщениями Telegram; технология @BotFather, встроенная в Телеграмм; бесплатный сервис Manybot (кабинет с настройками в Телеграмм); бесплатный сервис Unisender с сайта для создания чат-ботов, подключения Email рассылок и т.п. [4,6].

В сценарии для чат-бота пишутся вопросы, которые чаще всего возникают у челнов экипажа при управлении несложными системами корабля, например, системами освещения. В соответствии с правилом Парето – 80% процентов

людей задают одни и те же 20% процентов вопросов, составляется сценарий [3]. В задачи космического бота также входит не только отвечать на вопросы, но и общаться в чате, приводить факты, делать фотографии оборудования или записывать видео. С экраном вместо лица он способен отображать информацию, чтобы помочь с ремонтом или экспериментами. Он должен воспроизводить музыку, и тут тоже можно организовать диалог, какую музыку предпочитает член космического экипажа. Также можно реализовать функцию воспроизведения голосового сообщения при нажатии на кнопку «Старт» для запуска чат-бота (например, «Поехали!» голосом Юрия Алексеевича Гагарина).

Структура запросов члена экипажа как пользователя чат-бота и ответов на эти запросы приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структура диалога с ботом-помощником космического экипажа

Прежде чем разрабатывать структуру запросов, необходимо провести авторизацию с помощью выбранного сервиса, как показано на рисунке 4.

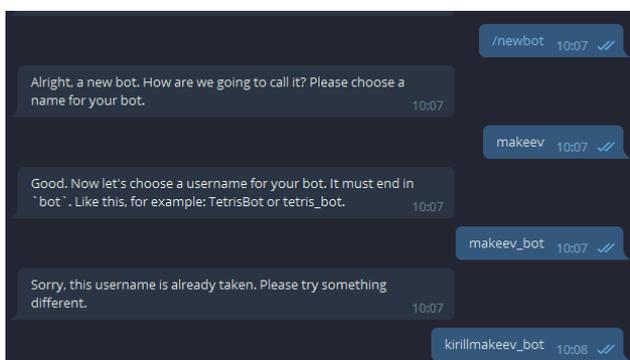


Рисунок 4 – Скриншот токена авторизации в сервисе @BotFather

Дизайн кнопок на платформе Телеграм показана на рисунке 5.

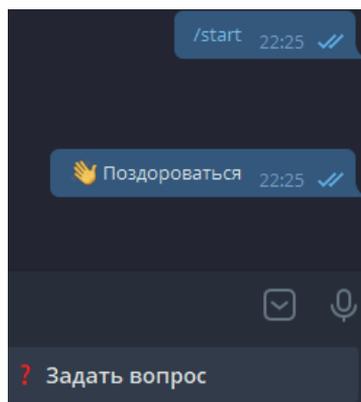


Рисунок 5 – Дизайн кнопок

Структурированные сценарии вопросов и ответов к ним обычно представляются в виде таблицы «Вопрос – ответ» [3]. Фрагмент сценария космического чат-бота и члена экипажа приведен в таблице 1. Онлайн помощник выполняет в данном случае функцию справочника по системам жизнеобеспечения корабля.

Таблица 1 – Фрагмент сценария чат-бота для космического экипажа

Вопрос	Ответ		
	минимум	максимум	оптимальная
Общее давление, кПа/мм рт. ст.	33,3/250	107/800	54...69/405...520
Парциальное давление кислорода, кПа/мм рт. ст.	16/120	40/300	20,6/155

Ниже приведен фрагмент кода чат-бота:

```
btn1 = types.KeyboardButton("☐ Поздороваться")
btn2 = types.KeyboardButton("☐ Задать вопрос")
bot.send_message(message.chat.id, text="Привет, {0.first_name}! Я онлайн помощник космического экипажа".format(message.from_user), reply_markup=markup)
```

Подключение автопостинга для тестирования чат-бота с помощью ютуб-канала университета приведено на рисунке 6.

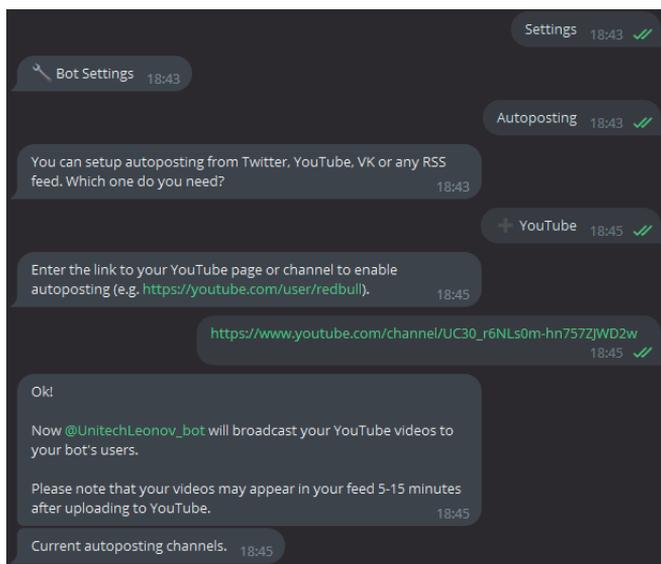


Рисунок 6 – Подключение автопостинга

В настоящее время разработаны критерии оценки чат-бота, в основном, для сфер продаж. Например, предлагается вычислять коэффициент конверсии (как отношение суммы стоимости трафика и стоимость подписки на чат-бот платформу) на число лидов, где лид – потенциальный клиент, который оставил свои контактные данные. Или оценивается конверсия трафика в лиды после введения чат-бота как процентное соотношение количества лидов к количеству трафика. Также для ботов в различных сферах деятельности актуальны общие показатели: увеличения скорости предоставления ответов и уменьшение доли нераспознанных вопросов.

Для оценки качества космического бота предлагается оценивать скорость предоставления ответов; умение поднять настроение члену экипажа, которое заключается в распознавание эмоций члена экипажа и реагировании на них, этот показатель также, как и скорость, можно выразить количественно.

В соответствии с предложенными критериями разработан сценарий онлайн помощника – интерактивного мобильного компаньона для космического экипажа.

Заключение

Реализован интерактивный мобильный компаньон для космического экипажа на основе подготовленных сценариев. Для реализации выбраны бесплатные узкоспециализированные цифровые технологии: приложение для обмена мгновенными сообщениями Telegram; технология @BotFather, встроенная в Телеграмм; сервис Manybot (кабинет с настройками в Телеграм); сервис Unisender с сайта для создания чат-ботов.

Разработка проводилась в рамках научно-исследовательской работы студентов третьего и четвертого курсов направления подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии».

Литература

1. Егоров Д.А., Арбузова А.А. Чат-бот: классификации, сферы применения, направления развития // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 957-959.
2. Иванов Д. Не сойти с ума на Марсе. Как ученые готовят психику человека к межпланетным перелетам [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nplus1.ru/material/2018/11/12/martian-psychology> (дата обращения 14.12.2022).
3. Как написать оscarоносный сценарий для чат-бота: инструкция в 17 шагах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vc.ru/marketing/280880-kak-napisat-oskaronosnyu-scenariy-dlya-chat-bota-instrukciya-v-17-shagah> (дата обращения: 02.12.2022).
4. Как создать и подключить Telegram чат-бота [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sendpulse.com/ru/knowledge-base/chatbot/create-telegram-chatbot> (дата обращения: 18.10.2022).
5. Маслов Н. Будет ли iPhone работать в космосе? Ответ может удивить [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www iPhones.ru/iNotes/budet-li-iphone-ili-lyuboy-drugoy-smartfon-rabotat-v-kosmose-06-10-2020> (дата обращения 09.12.2022).
6. Чат-бот для Телеграм [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jivo.ru/blog/tutorials-jivo/chat-bot-dlya-telegram.html/> (дата обращения: 18.10.2022).
7. Что такое чат-боты и какие они бывают [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.carrotquest.io/chatbot/chatbot-types/> (дата обращения: 18.10.2022).

УДК 681.52.8

**Применение робастного параметрического проектирования
для автоматизированной системы управления
прочностными испытаниями**

Т.Н. Антипова, доктор технических наук,
профессор кафедры управления качеством и стандартизации,
В.А. Тихонов, аспирант кафедры управления качеством и стандартизации,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Рассматривается возможность применения робастного параметрического проектирования с целью стабилизации процесса нагружения и минимизации вариаций воздействий неучтённых факторов в ходе статических и ресурсных испытаний на универсальном переналаживаемом стенде.

Статические и ресурсные испытания, технология испытаний, универсальный стенд, автоматизированная система, робастность, возмущающий фактор.

Application of robust parametric design for an automated strength test control system

T.N. Antipova, Doctor of Technical Sciences Professor of the Department of Quality Management and Standardization,
V.A. Tikhonov, postgraduate student, Department of Quality Management and Standardization,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The possibility of using robust parametric design in order to stabilize the loading process and minimize variations in the effects of unaccounted factors during static and resource tests on a universal changeable stand is considered.

Static tests, resource tests, universal stand, automated system, robustness, disturbing factor.

Одним из важных этапов в разработке и создании ракетно-космической, авиационной, корабельной и др. техники является проведение натуральных прочностных испытаний, обеспечивающих отработку воздействий различных физических факторов и (или) режимов функционирования элементов конструкций изделий (агрегаты, составные части и т.п.) в процессе их эксплуатации. Ряд испытательных (расчётных) случаев с механическим воздействием на конструкцию

проводится на специализированных или универсальных стендах, на которых реализуются воздействующие факторы (сила, момент, давление и т.д.) при помощи специальной оснастки и измерительного оборудования в определённых режимах нагружения (статические, ресурсные, вибрационные, криогенно-статические и другие). Основными целями прочностных испытаний являются проверка и подтверждение несущей способности и запаса прочности конструкции изделия.

Объект испытаний представляет собой макет (физическую модель) и в большинстве случаев повторяет геометрические формы и размеры реального изделия, исключением могут являться изменения длин составных частей с сохранением граничных условий в сборке макета (например, имитатор бака или крыла). В связи с этим, возникают потребности в проектировании специальных стендов для новых изделий с учётом их геометрических особенностей и необходимости реализации заданных воздействующих факторов нагружения. В данной статье рассматривается универсальный переналаживаемый стенд для проведения статических и ресурсных испытаний крупногабаритных изделий, на котором реализуются воздействующие факторы: осевой и поперечной сил, изгибающего и крутящего моментов – при помощи гидравлической системы нагружения, применяемой в качестве силовозбудителя.

Каждый монтаж стенда для новоизготовленных изделий или его перемонтаж для реализации нескольких расчётных случаев на одном объекте испытаний, требует проведения предварительных опрессовочных работ всех систем и элементов, включённых в состав экспериментальной установки. Помимо объекта испытаний в конструкцию экспериментальной установки входят опорные элементы оснастки (силовой пол и стены, силовые колонны, ложементы, силовые кольца и т.п.), гидравлическая система нагружения (маслонасосная станция, стабилизатор давления, устройство редуцирования давления, гидроцилиндры (силовозбудители), стационарные и переносные трубопроводы), силопередающая оснастка (тяги, тендеры, рычаги, стропы и т.п.), датчики контроля нагрузок, датчики контроля напряжённо-деформированного состояния, датчики преобразования перемещений, кабельные линии, внешние блоки питания. Учитывая, что процесс нагружения в основном проходит в автоматизированном режиме, то дополнительно проводится проверка алгоритма работы программы нагружения и измерительного оборудования, которое используется в рамках испытаний. Особенности в автоматизированном режиме нагружения могут выступать индивидуальные настройки для оператора, которые предоставляют различные инструменты контроля и управления за процессом испытаний. На рисунке 1 представлена модель экспериментальной установки для проведения статических и ресурсных испытаний.

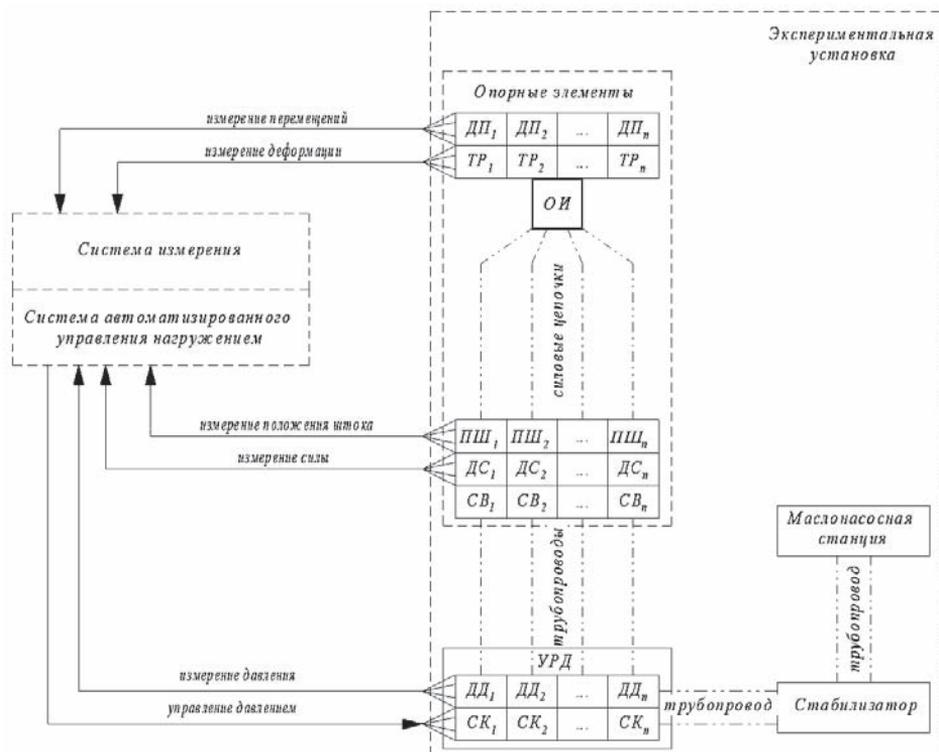


Рисунок 1 – Модель экспериментальной установки

Пояснение к рисунку 1: ДП – датчик перемещения, ТР – тензорезистор, ОИ – объект испытаний, ПШ – датчик измерения положения штока, ДС – датчик силы, СВ – силовозбудитель (гидроцилиндр), УРД – устройства редуцирования давления, ДД – датчик давления, СК – сервоклапан

Конструктивная сложность стендов, ввиду индивидуальных особенностей объектов испытаний, и персональная настройка программы испытаний (опрессовок) в автоматизированной системе нагружения формируют вариабельность результатов при реализации силовых факторов, в связи с этим количество опрессовок может отличаться от изделия к изделию. Цель проведения опрессовок – проверка конструкции испытательного стенда и элементов экспериментальной установки, а также достижение положительных результатов нагружения в рамках допустимых погрешностей по силе.

Стоит отметить, что существуют два вида опрессовок: первый, в котором проводится поканальная опрессовка каждого силовозбудителя в стенде (на уровне 1-5% от номинала силовозбудителя), тем самым выполняется проверка корректности работы гидравлической магистрали и измерительного канала; во втором проводится одновременная опрессовка всех силовозбуждающих органов, т.е. повторяется испытательный случай нагружения, при этом уровень опрессовочных нагрузок не превышает 10-40% от заданных испытательных значений. Такие нагрузки не идут в зачёт испытаний, однако, они оказывают незначительное

влияние на конструкцию испытательного объекта в целом.

В ходе опрессовок формируются коэффициенты регулятора для стабилизации работы силовозбуждающих органов в каждом измерительном канале. Однако после опрессовок происходят процессы, когда в ходе испытаний уровень нагрузок искажается от заданных значений по мере роста реализовываемой силы и (или) увеличения времени работы испытательного оборудования, силовозбуждающих органов и элементов силовой конструкции. Тем самым появляется потребность в корректировании подобранных коэффициентов в процессе нагружения (в основном при квазистатических нагрузках), либо в прекращении нагружения и проведении дополнительных опрессовок.

Зачастую основным фактором в отклонении от заданного уровня нагрузок является возможное взаимное влияние силовых цепочек друг на друга, а также индивидуальные особенности в работе силовозбудителей. Например, для одного типа и номинала силовозбудителей может потребоваться разное давление при реализации одного уровня нагрузок, в таком случае может быть вероятность износа внутренней полости одного из гидроцилиндров, что создаёт повышенное трение при движении поршня. Либо в случае износа манжетов (уплотнительных элементов) происходит потеря рабочей жидкости, в следствии чего снижается уровень давления (также возможна течь в трубопроводе), что приводит к просадке реализовываемой силы в силовой цепочке.

Природу взаимных влияний и индивидуальных особенностей работы силовозбудителей можно наблюдать непосредственно при реализации нагрузок. Так, например, на рисунке 2 представлен график нагружения при статических испытаниях двух силовозбудителей (точка 1 и 2) одного номинала, но с отличным уровнем заданной силы, состыкованных перпендикулярно к нагружаемому участку на объекте испытаний. В точке 2 прослеживается явная поэтапная просадка силы (зубцы на линии) из-за повышенной силы трения в связи с возможным изъёмом во внутренней полости гидроцилиндра (задиры, зазубрины, сколы и т.п.), что в свою очередь отражается на точке 1 и результирующей от двух точек (силовой фактор). На рисунках 3 и 4 представлена часть циклов гармонической формы, реализованных в ходе ресурсных испытаний с зафиксированным забросом и сдвигом по силе из-за разницы силы трения в силовозбудителях. Реализация поперечной силы и изгибающего момента (рисунок 3) обеспечивалась за счёт четырёх противоположно направленных силовозбудителей (конструктивная пара 2 на 2) одного номинала, состыкованных к объекту испытаний с консольным креплением.

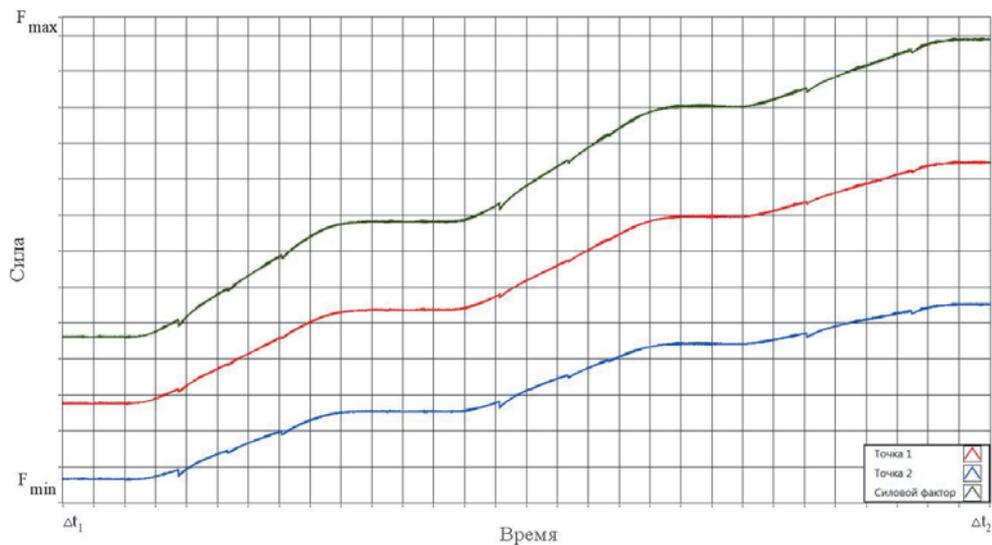


Рисунок 2 – График нагружения при статических испытаниях

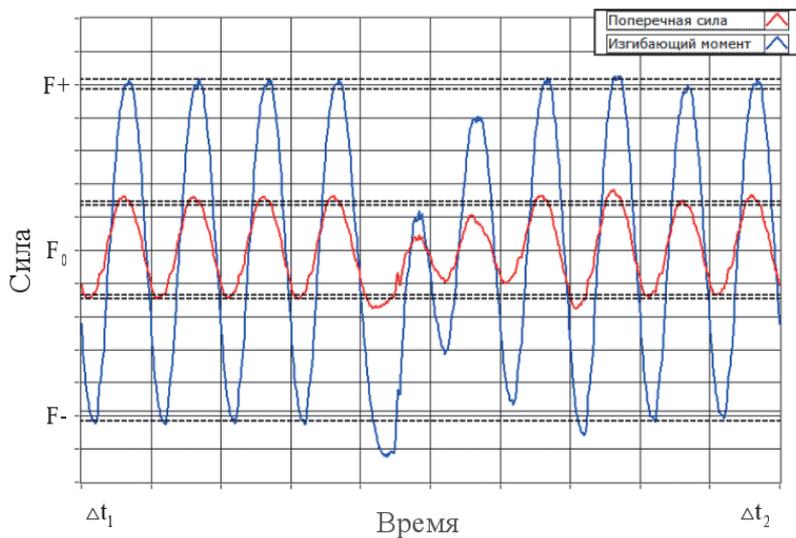


Рисунок 3 – График нагружения при ресурсных испытаниях (силовые факторы)

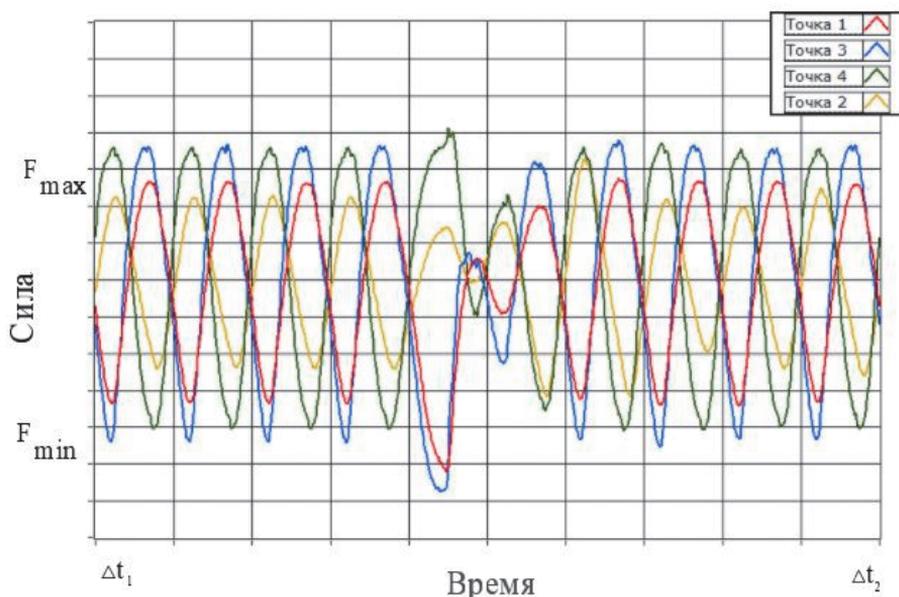


Рисунок 4 – График нагружения при ресурсных испытаниях (силовые точки)

В результате чего появляется потребность в стабилизации нагрузочного процесса и минимизации вариаций воздействий неучтенных факторов при проведении опрессовок на этапе подготовки к испытаниям, а также в ходе самих испытаний. Для этого рассматривается возможность применения робастного параметрического проектирования (РПП) (ГОСТ Р ИСО 16336–2020 Робастное параметрическое проектирование (RPD)) для автоматизированной системы управления прочностными испытаниями. Цель применения РПП заключается в предотвращении появления дефектов и отказов, формирующихся в ходе нагрузочного процесса. Особенностью РПП является проведение экспериментов с использованием ортогональных матриц и оценки робастности через отношение «сигнал/шум», для этого необходима информация о функции системы и условий возмущающих факторов. Примеры применения РПП также представлены в других работах [1, 2].

В рамках данной статьи ряд основных определений РПП рассматривается в следующем виде:

- робастность – свойство автоматизированной системы управления нагружением сохранять требуемое качество функционирования в пределах принятых погрешностей;
- функция – реализация заданного уровня нагрузок;

- сигнал – контролируемый входной фактор, выступающий в качестве управления в автоматизированной системы нагружения, обеспечивающий контроль и реализацию заданного уровня нагрузок;

- шум – неконтролируемый возмущающий фактор, воздействие которого нарушает корректную реализацию нагрузок в процессе испытаний;

- отношение «сигнал/шум» – количественная мера робастности: чем выше показатель отношения, тем устойчивей система к факторам шума.

Испытание на статическую или ресурсную прочность рассматривается как динамический процесс с входными-выходными параметрами. Задающие параметры устанавливаются оператором, которые на выходе в собранной экспериментальной установке механически воздействуют на объект испытаний через силовозбуждающие органы и элементы оснастки. В общем виде на рисунке 5 представлена параметрическая схема испытательного процесса для n -го количества силовых цепей.

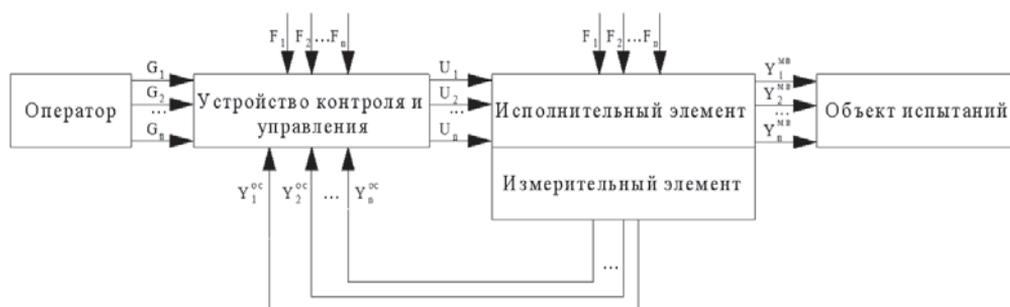


Рисунок 5 – Параметрическая схема испытательного процесса

Пояснение к рисунку 5: G – задающий параметр воздействия, U – управляемое воздействие, Y^{oc} – обратная связь от измерительных элементов, Y^{mb} – механическое воздействие на объект испытаний, F – возмущающий фактор (шум).

Процесс нагружения считается идеальным (идеальная функция), если система реагирует только на управляющий сигнал оператора и проявляет устойчивость к воздействию возмущающих факторов. Однако, в универсальной экспериментальной установке управляющий сигнал реализуется через цепь элементов, каждый из которых подвержен шуму, что в свою очередь отражается на формировании воздействующих сил на объект испытаний. На рисунке 6 представлена классификация возмущающих факторов, воздействующих на испытательный процесс.

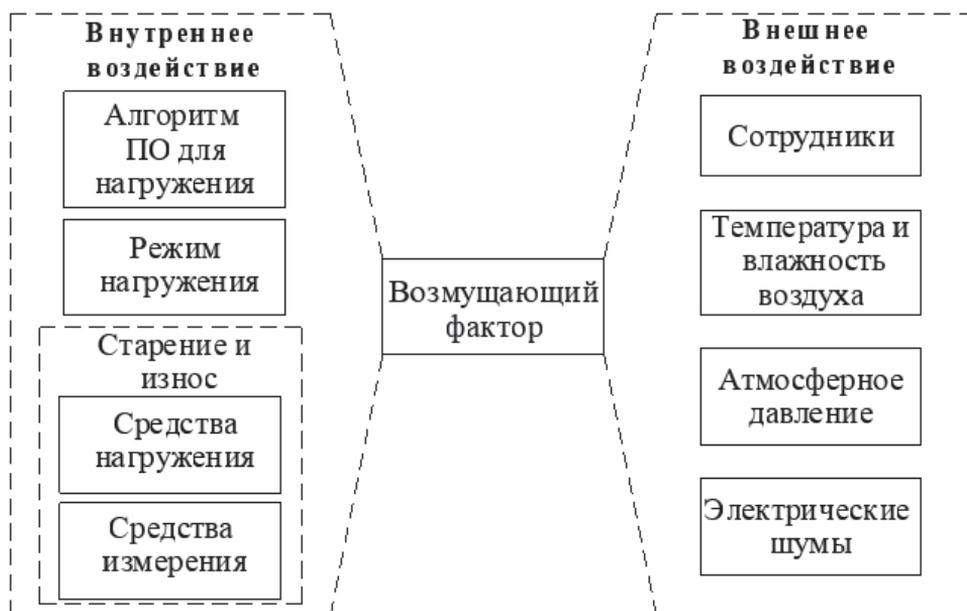


Рисунок 6 – Классификация возмущающих факторов

В результате проведенных исследований проанализированы существующие проблемы при реализации заданного уровня нагрузок на объекты испытаний. Выявлено, что экспериментальная установка (испытательный стенд) подвержена внешним и внутренним возмущающим факторам. Практический опыт работы на стенде для прочностных испытаний позволил разработать классификацию возмущающих факторов. Для определения чувствительных элементов в испытательном стенде опираясь на теоретические положения системного подхода построена её структурная модель.

С целью обоснования воздействия возмущающих факторов проведен комплекс испытаний, включающий режимы статического и ресурсного нагружения. При статических и ресурсных испытаниях получены графические модели зависимости силы от времени нагружения. При этом в ресурсных испытаниях помимо времени нагружения осуществляется циклическая гармоническая реализация нагрузок. Данные модели позволили выявить несоответствия заданного уровня нагрузок в процессе нагружения объекта испытаний.

Для оптимизации процесса нагружения предполагается проведение ряда экспериментов, в которых реализованная сила будет измеряться при различных комбинациях уровней сигнала и шума, включённых в ортогональную матрицу управляющих и возмущающих факторов. После сбора и обработки данных по результатам экспериментов последует построение диаграммы факторных эффектов, позволяющей определить уровень влияния шумов, воздействующих на силовые цепи. Далее применяется принцип двухшаговой оптимизации для достижения робастности. Результатом проведенных исследований является совершенствование качества испытательного процесса по максимизации значения отно-

шения «сигнал/шум».

Литература

1. Чернова Ю.К., Щипанова В.В. Первые шаги робастного проектирования в отечественном автомобилестроении // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 5. С. 193-197.
2. Пивоварова К.Г. Управление качеством метизной продукции на основе робастного параметрического проектирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. № 3. С. 84-89 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-84-89>.

УДК 681.2

Анализ свойств рядов допустимых частот опроса телеметрируемых параметров в системах программируемой телеметрии для контроля и испытаний сложных аэрокосмических изделий

А.П. Мороз, доктор технических наук, профессор МГОТУ,
Академик Российской академии космонавтики,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

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

А.И. Полехин, ведущий инженер,

Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной
техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область,

Г.Е. Полехина, кандидат педагогических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «АГПС МЧС России», г. Москва,
доцент ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва,

К.А. Полехина, студент,
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ФН11, г. Москва

Проанализированы характеристики рядов допустимых периодов \widetilde{T}_k (частот ω_k) опроса телеметрируемых параметров в программируемых системах телеизмерений. Исследовано влияние вида математического закона формирования членов ограниченного ряда \widetilde{T}_k на возможность синтеза и сложность алгоритмов формирования циклограмм опроса по заданной программе измерений. Показано, что линейный и степенной ряды периодов можно рассматривать как предельные случаи рядов общего вида при заданном количестве членов ряда l . Сформулировано понятие корректного ряда и приведен его граф. Сделан вывод о предпочтительности использования корректных степенных рядов с основанием 2 для практических применений.

Системы программируемой телеметрии, программы измерений, ряды частот опроса, линейный и степенной ряд, корректность ряда, граф корректного ряда.

Analysis of the properties of the ranges of admissible polling frequencies of telemetered parameters in programmable telemetry systems for control and testing of complex aerospace products

A.P. Moroz, Doctor of Technical Sciences, Professor of Moscow State Technical University, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

A.I. Polekhin, Leading Engineer,
Joint Stock Company «Scientific and Production Association

of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow Region,
G.E. Polekhina, Ph.D., Associate Professor,

FGBOU VO «AGPS EMERCOM of Russia», Moscow,
Associate Professor FGBOU VO MSTU im. N.E. Bauman, Moscow,

K.A. Polekhina, student,
Moscow State Technical University. N. E. Bauman, Department of FN11, Moscow

The characteristics of the series of admissible periods \widetilde{T}_k (frequencies ω_k) of interrogation of telemetered parameters in programmable telemetry systems are analyzed. The influence of the form of the mathematical law for the formation of members of a limited series \widetilde{T}_k on the possibility of synthesis and the complexity of the algorithms for the formation of interrogation cyclograms according to a given measurement program has been studied. It is shown that the linear and power series of periods can be considered as limiting cases of series of general form for a given number of terms of the series l . The concept of a correct series is formulated and its graph is given. It is concluded that it is preferable to use correct power series with base 2 for practical applications.

Programmable telemetry systems, measurement programs, polling frequency series, linear and power series, series correctness, correct series graph.

Информационно-измерительные системы (ИИС) с программно управляемым способом опроса телеметрируемых параметров (ТМП) бортового и наземного применения являются основным инструментом отечественных конструкторов при испытаниях и отработке сложных аэрокосмических летательных аппаратов (ЛА) [1].

Исследуемые при испытаниях ЛА процессы характеризуются большим количеством (до нескольких сотен, а иногда и тысяч) ТМП со сложными функциональными зависимостями, различных по спектральному составу (от долей до тысяч Гц) и распределенных по всему объему изделия. ИИС взаимодействует с контролируемым изделием через подсистему сбора данных (ПСД), представляющую собой сложную, распределенную в монтажном пространстве ЛА иерархическую структуру древовидной конфигурации на основе датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА) и многоканальных мультиплексоров с цифровым управлением, соединенных по индивидуальной для каждого изделия схеме. При традиционно используемом регулярном дискретном представлении ТМП в виде рядов цифровых эквивалентов их мгновенных значений – выборок и временном разделении каналов (ВРК) в ПСД потоки выборок от различных ТМП концентрируются в единый равномерный цифровой поток, т.н. групповой телеметрический сигнал (ГТС) – кадр, с целью вывода в общий последовательный канал связи (КС). Одновременно производится оптимальное распределение пропускной способности (информативности I_s) КС, которая является дефицитным ресурсом, между каналами мультиплексоров согласно информационной производительности подключенных ТМП. Указанные задачи решаются с помощью программно-адресного управления переключением (опросом) каналов ПСД. Эта

функция обеспечивает рациональное использование информативности I_s КС, позволяя выполнять опрос с заданной для каждого измерительного канала в программе измерений (ПИ) частотой. Набор ПИ составляет т. н. циклограмму полета изделия и представляет собой совокупность участков контроля, каждый из которых характеризуется своим составом и частотами опроса ТМП. Программное управление опросом производится с помощью специального функционального узла – генератора форматов кадра (ГФК), который по определенной процедуре (алгоритму), используя заданные в ПИ частоты $f_{v(n)}$, вычисляет элементы единого временного циклического ряда управляющих команд опроса – адресов переключения измерительных каналов, генерируя циклограмму опроса, со следующими свойствами:

- суммарная частота следования адресов в ряду должна быть $\leq I_s$;
- адрес каждого канала n должен следовать в составе ряда со своей индивидуальной частотой $f_{v(n)}$ заданной в ПИ и кратной информативности I_s ;
- временное наложение адресов в общем едином ряду не допустимо.

Элемент ряда вычисляется для каждой временной позиции ГТС H_j , длительность которых – $\Delta t_{(j)}$, равна периоду информативности системы телеизмерений – $1/I_s$. Длительность самой циклограммы опроса соответствует длительности цикла ГТС, определяется самой низкой частотой $f_{v(n) \min}$ в ПИ и называется циклом телеметрирования – L ИИС [2].

В работах [3, 4] предложены алгоритмы вычисления адресов на позициях ГТС для заданного в ПИ набора периодов опроса каналов $[T_1, T_2, T_3, \dots, T_n]$ на основе разложения натурального ряда чисел $j = 0, 1, 2, 3, \dots$ (номеров позиций ГТС) на непересекающиеся классы вычетов по модулям T_n : $\Psi_{n(i)} \equiv \Psi_{n(i)} \pmod{T_n} = C_n + i T_n$, где классы вычетов $\Psi_{n(i)}$ по модулям T_n [5] представляют собой номера позиций ГТС, на которых располагается i -я по счету команда опроса n -го канала, а целая величина C_n – остаток класса ($0 \leq C_n < T_n$) – номер позиции, на которой происходит первый опрос n -го канала, имеет смысл фазы функции $\Psi_{n(i)}$, т.е. $C_n = \Psi_{n(0)}$. Алгоритмы на каждой позиции ГТС последовательно, используя заданные в ПИ частоты $f_{v(n)}$ (периоды $[T_n]$), резервируют за каналами фазы опроса C_n и сравнивают их с текущей фазой, выделенной из номера позиции H_j . Адрес (номер канала n), для которого резервируемая и текущая фазы совпали, фиксируется в качестве адреса опроса.

При разработке алгоритмов функционирования и синтезе ГФК условия физической реализуемости диктуют необходимость назначения частот опроса каналов ТМП в ПИ не произвольно, а из некоторого набора частот ω_k (периодов $\overline{T_k}$), $T_n \in \overline{T_k}$ [3, 4]. Набор частот представляет собой конечный ряд значений, сформированных по определенному математическому закону, для которого выполняются соотношения (2), (3), (4) [2]. Очевидно, чем выше плотность ряда, т.е. чем ближе по абсолютной величине его соседние значения, тем больше возможностей у пользователя приблизить заданные в ПИ частоты опроса ТМП к оптимальным по отношению к их спектральному составу, и тем лучше одна из основных характеристик ИИС – ее информационная гибкость [1].

При этом необходимо ответить на вопрос: возможно ли прямое назначе-

ние частот опроса каналов в ПИ по априорным данным о спектральных или вероятностных характеристиках ТМП, и как влияет вид закона формирования членов ряда периодов \widetilde{T}_k (частот ω_k) на алгоритм и саму возможность формирования циклической равномерной последовательности команд опроса измерительных каналов ТМП без пропусков и наложений по заданной ПИ.

В соответствии с (2) [2] можно рассматривать набор (ряд) периодов, который назовём сеткой периодов (частот) и который определим как некоторое множество целочисленных величин \widetilde{T}_k , удовлетворяющих следующим условиям:

$$\widetilde{T}_k < \widetilde{T}_{k+1} \quad (k = 1, 2, \dots, l - 1), \quad (1)$$

где l – количество периодов в сетке периодов (частот).

Кроме этого, считаем, что при распределении каналов по периодам сетки возможно использование всего набора ее периодов.

Тогда, согласно (7) и (12) [2], должны выполняться следующие условия:

$$\widetilde{T}_k = m \cdot a_k \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, l; \\ a_k \in \mathbb{N}; \end{cases} \quad (2)$$

$$m = \{\widetilde{T}_1, \widetilde{T}_2, \dots, \widetilde{T}_l\} \geq g \quad (2a)$$

$$g \in \mathbb{Z}$$

Выбор той или иной сетки периодов позволяет наилучшим образом ориентировать методы программного управления опросом на выполнение задач опроса измерительных каналов ТМП в заданной области изменения основных параметров таких как:

- максимально допустимое количество измерительных каналов ТМП N_{max} ;
- максимально допустимый цикл телеметрирования L_{max} ;
- максимальная частота опроса канала ω_{max} ;
- спектр частот опроса каналов M ;
- коэффициенты потерь β, α , связанные с несовпадением частот, заданных для измерения некоторых процессов (ТМП) и частот, которые определяются данной сеткой периодов. Рассмотрим эти параметры более подробно.

Величина N_{max} получается в том случае, если в соотношении

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{T_n} = 1$$

имеется наибольшее количество членов, что достигается тогда, когда все $T_n = \widetilde{T}_l$ ($n = 1, 2, \dots, N$), т.е. все каналы имеют наибольший период опроса, где N – количество каналов в ПСД. Из этого следует:

$$N_{max} = \widetilde{T}_l = m \cdot a_l. \quad (3)$$

Величина L_{max} представляет собой максимальную длину цикла телеметрирования, которая может быть достигнута при использовании данной сетки периодов. L_{max} получается в том случае, когда под опрос каналов задействованы все периоды сетки.

С учётом (3) [2] можно записать:

$$L_{max} = [\widetilde{T}_1, \widetilde{T}_2, \dots, \widetilde{T}_l] = m[a_1, a_2, \dots, a_l]. \quad (4)$$

Максимальная частота опроса каналов, допустимая в данной сетке частот, определяется формулой:

$$\omega_{max} = \omega_1 = \frac{I_s}{\tilde{T}_1} = \frac{I_s}{m \cdot a_1} \leq \frac{I_s}{m}. \quad (5)$$

Спектр частот опроса каналов для данной сетки частот определяется как отношение максимальной частоты к минимальной, т.е.

$$M = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = \frac{\tilde{T}_l}{\tilde{T}_1} = \frac{a_l}{a_1}. \quad (6)$$

Коэффициент потерь β определяется так:

$$\beta = \frac{\sum \text{заданных частот опроса каналов}}{\sum \text{частот опроса каналов из сетки}}.$$

Для количественной оценки величины β рассмотрим ось частот φ , на которой отметим значения частот сетки $\omega_k = \frac{I_s}{T_k}$.

Введём вероятностную функцию $h(\varphi)$ плотности распределения частот опроса каналов ТМП по оси частот φ , которую определим на отрезке $[\omega_l; \omega_1]$ (рис. 1).

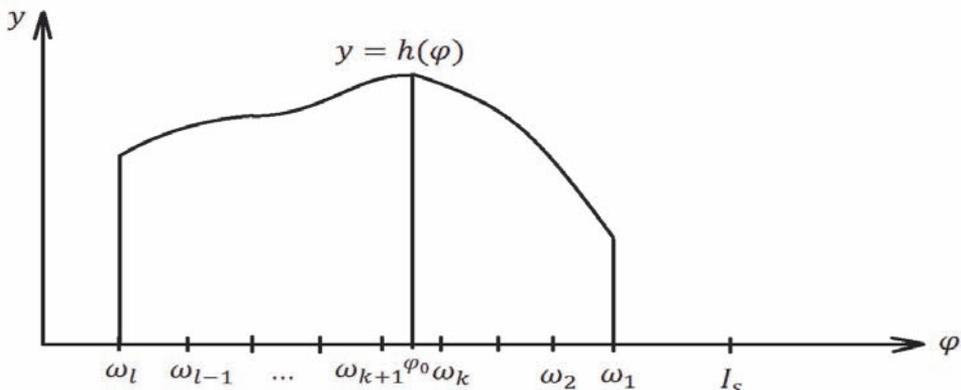


Рисунок 1 – График функции $h(\varphi)$ вероятности распределения частот опроса каналов ТМП по оси частот φ на отрезке $[\omega_l; \omega_1]$

Тогда величина $N_\varphi = Nh(\varphi)\Delta\varphi$ представляет собой среднее количество каналов, которые требуется опросить с частотой $\varphi \div (\varphi + \Delta\varphi)$. Очевидно, что:

$$\int_{\omega_l}^{\omega_1} Nh(\varphi)d\varphi = N,$$

или
$$\int_{\omega_l}^{\omega_1} h(\varphi)d\varphi = 1 \quad (\text{условие нормировки}). \quad (7)$$

Сумма частот каналов, имеющих частоту $\varphi \div (\varphi + \Delta\varphi)$, определяется выражением $\varphi N_\varphi = \varphi Nh(\varphi)\Delta\varphi$, а общая сумма частот всех каналов составит

$$S_1 = N \int_{\omega_2}^{\omega_1} \varphi \cdot h(\varphi)d\varphi = Nf_\varphi, \quad (8)$$

где f_φ – среднее значение частоты φ на отрезке $[\omega_l; \omega_1]$.

Пусть N_φ каналов, имеющих частоту $\varphi \div (\varphi + \Delta\varphi)$, попали в промежуток $[\omega_k + i\omega_k]$, т.е. $\omega_{k+1} \leq \varphi < \varphi + \Delta\varphi \leq \omega_k$.

Введём функцию $\Phi_k = \Phi(\omega_k; \omega_{k+1}; \varphi)$, где $(\omega_{k+1} \leq \varphi \leq \omega_k)$, представляющую собой вероятность того, что частота φ будет приведена к частоте ω_k . Соответственно, $(1 - \Phi_k)$ – вероятность того, что частота φ будет приведена к частоте ω_{k+1} . Тогда $N_\varphi[\Phi_k\omega_k + (1 - \Phi_k)\omega_{k+1}]$ – сумма частот из сетки, которую будут иметь N_φ каналов.

Таким образом, полная сумма частот из сетки определяется выражением:

$$S_2 = \sum_{k=1}^{l-1} \int_{\omega_{k+1}}^{\omega_k} [\Phi_k\omega_k + (1 - \Phi_k)\omega_{k+1}] N_\varphi d\varphi, \quad (9)$$

а коэффициент потерь β определяется формулой:

$$\beta = \frac{f_\varphi}{\sum_{k=1}^{l-1} \int_{\omega_{k+1}}^{\omega_k} [\Phi_k\omega_k + (1 - \Phi_k)\omega_{k+1}] h(\varphi) d\varphi}. \quad (10)$$

Коэффициент потерь α определяется так:

$$\alpha = \frac{\sum \text{модулей разностей между заданными частотами и частотами из сетки}}{\sum \text{частот из сетки}}.$$

Проводя рассуждения, аналогичные вышеприведённым, найдём, что:

$$\alpha = \frac{\sum_{k=1}^{l-1} \int_{\omega_{k+1}}^{\omega_k} [\Phi_k(\omega_k - \varphi) + (1 - \Phi_k)(\varphi - \omega_{k+1})] h(\varphi) d\varphi}{\sum_{k=1}^{l-1} \int_{\omega_{k+1}}^{\omega_k} [\Phi_k\omega_k + (1 - \Phi_k)\omega_{k+1}] h(\varphi) d\varphi}. \quad (11)$$

Между α и β имеются следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \alpha(\Phi_k = 0) &= \beta(\Phi_k = 0) = 1; \\ \alpha(\Phi_k = 1) &= 1 - \beta(\Phi_k = 1). \end{aligned}$$

Отметим, что величины α и β дают статистические оценки потерь.

Функцию $h(\varphi)$ следует рассматривать как функцию, интерполирующую плотность распределения каналов ТМП, полученную статистическим усреднением по многим экспериментам.

Функцию Φ_k следует рассматривать как функцию, отражающую работу некоторого класса алгоритмов приведения частот $(\omega_{k+1} \leq \varphi \leq \omega_k)$ либо к ω_k , либо к ω_{k+1} .

Отметим также, что вышеприведённые параметры не являются взаимно независимыми. Так, если количество каналов $N = N_{max}$, то величина цикла телеметрирования L уменьшается до величины $L = N$. С другой стороны, при $L = L_{max}$, количество каналов $N < N_{max}$. Рассматривая другие параметры при различных распределениях каналов по частотам сетки, можно также обнаружить их взаимозависимость.

Представляет интерес следующая задача: на основе выбранной сетки периодов дать оценки указанных параметров. В общем случае величины $\alpha_{max}, N_{max}, \omega_{max}, M$ можно определить по формулам (3), (4), (5), (6) соответственно. Для определения величин α и β (формулы (10) и (11)) необходимо задать-

ся функциями $h(\varphi)$ и Φ_k .

Рассмотрим самую плотную сетку периодов, которая подчиняется линейному закону:

$$\begin{array}{cccccc} & 2 & 3 & \dots & k & \dots \\ \widetilde{T}_k & 2 & 3 & \dots & k & \dots \\ & m & m & & m & m \\ d_k & 2 & 3 & \dots & k & \dots \end{array} \quad (12)$$

Дадим оценку величины m . Для сетки периодов (12) количество взаимно простых a_k (т.е. количество $g - 1$ из (2а)) совпадает с функцией $\Pi(l)$, определяемой, как количество простых чисел, не превышающих l . Воспользовавшись оценкой Чебышева [6]:

$$0,9 \frac{l}{\ln l} < \Pi(l) \leq g - 1; \quad l \geq 5 \quad (13)$$

и формулой (2а), получим:

$$m \geq \gamma = \left[0,9 \frac{l}{\ln l} \right] + 2, \quad (14)$$

где скобки [...] означают целую часть числа в скобках.

Оценим величину L_{max} . Т.к. для j -го по счёту простого числа ρ_j верно [6]:

$$0,9j \ln j < \rho_j < 1,6j \ln j; \quad j \geq 3, \quad (15)$$

а в выражение (4) входят все $\rho_j \leq l$ и величина m , то можно записать:

$$L_{max} = m \prod_{j=1}^{\gamma-1} \rho_j^{Q_j} > \gamma 2^{Q_1} 3^{Q_2} \prod_{j=1}^{\gamma-1} (0,9j \ln j)^{Q_j}, \quad (16)$$

где $Q_j > 0$, целые и определяются как максимальные степени ρ_j , удовлетворяющие условию:

$$\rho_j^{Q_j} \leq l \quad (j = 1, 2, \dots, \gamma - 1). \quad (17)$$

Оценивая ρ_j по максимуму из (15), запишем для $l \geq 5$:

$$\begin{aligned} \theta_j &= \left[\frac{\ln l}{\ln(1,6j \cdot \ln j)} \right] - 1, \quad (j = 3, 4, \dots, \gamma - 1), \\ \theta_1 &= \left[\frac{\ln l}{\ln 2} \right]; \quad \theta_2 = \left[\frac{\ln l}{\ln 3} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Выражения для величин ω_{max} и M находятся более простым способом и соответствующие им формулы приведены в таблице 1.

Для нахождения величин α и β были заданы две функции $h(\varphi)$:

$$h(\varphi) = \frac{1}{\omega_1 - \omega_l}; \quad (\text{равномерный спектр}), \quad (19)$$

$$h(\varphi) = \frac{1}{\varphi \cdot \ln M} \quad (\text{падающий спектр}), \quad (20)$$

а также две функции Φ_k :

$$\text{а) } \Phi_k(\omega_k; \omega_{k+1}; \varphi) = \Phi \varphi_0 = \begin{cases} 1, & \varphi_0 \leq \varphi \leq \omega_k; \\ 0, & \omega_{k+1} \leq \varphi < \varphi_0, \end{cases} \quad (21)$$

где φ_0 определяется из выражения:

$$\frac{\omega_k - \varphi_0}{\omega_k} = \frac{\varphi_0 - \omega_{k+1}}{\omega_k}; \quad \varphi_0 = \frac{2\omega_k \cdot \omega_{k+1}}{\omega_k + \omega_{k+1}}; \quad (22)$$

$$\text{б) } \Phi_k = \Phi = \text{const.} \quad (23)$$

При этом, для $\Phi_k = \Phi = \text{const}$ рассчитывались при значениях α и β для:

$\Phi = 0$ (приближение φ к нижней границе);

$\Phi = 1$ (приближение φ к верхней границе);

$\Phi = \frac{1}{2}$ (равновероятный выбор ω_k и ω_{k+1} для приближения φ).

Расчётные значения при указанных $h(\varphi)$ и Φ_k приведены в таблице 2. Из формул (14) и (16) видно, что нежелательный рост m и L_{max} при увеличении l в значительной мере связан с сопутствующим этому увеличению количества разных простых сомножителей ρ_j , взятых из всех канонических разложений \overline{T}_k ($k = 1, 2, \dots, l$). Поэтому для уравнения в таблице 1 даны параметры:

Таблица 1 – Оценки параметров рядов допустимых периодов опроса, формируемых по линейному и степенному законам

Закон → формирование ряда (сетки)	$\overline{T}_k = mk$ (линейный)		$\overline{T}_k = a^k$ (степенной)	
	Оцениваемые параметры ↓	Общий вид	Общий вид	Общий вид
		$m = 5$ $l = 10$		$a = 2$ $l = 10$
N_{max}	$m \cdot l^*$	50	a^l	1024
L_{max}	Формула (16)	12600	a^l	1024
ω_{max}	$\frac{I_s^*}{m}$	$\frac{I_s}{5}$	$\frac{I_s}{a}$	$\frac{I_s}{2}$
M	l	10	a^{l-1}	512

Примечание к таблице 1: *величина m оценивается по формуле (14).

N_{max} ; L_{max} ; ω_{max} ; M ; α ; β для описанной сетки периодов вида:

$$\overline{T}_k = a^k \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, l; \\ a \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (24)$$

Для этой сетки количество простых сомножителей не растёт от периода к периоду. Более того, оно может быть сведено к минимуму, если выбрать значение a равным какому-либо простому числу.

Интересно отметить, что указанные сетки периодов имеют качественное отличие по параметру ω_{max} , а именно следующее. Для плотной сетки периодов частота ω_{max} обратно пропорциональна величине $m \geq \left[0,9 \frac{l}{\ln l}\right] + 2$, которая является возрастающей функцией от l . Это приводит к значительному уменьшению ω_{max} при больших l (т.е. при большом количестве периодов в сетке). При этом для степенной сетки периодов параметр ω_{max} не зависит от l и остаётся посто-

ЯННЫМ.

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициентов потерь α и β при заданных $h(\varphi)$ и Φ_k для линейного и степенного рядов допустимых частот опроса каналов ТМП

Закон формирования → ряда (сетки)			$\widetilde{T}_k = mk$ (ли- нейный)		$\widetilde{T}_k = a^k$ * (степен- ной, $a = 2$)		
Значения коэффициентов потерь α и β → при заданных $h(\varphi)$ и Φ_k ↓			β	α	β	α	
$h(\varphi) = \frac{1}{\omega_1 - \omega_l}$	$\Phi_k = const$	$\Phi = 0$	$l=10$	1,39	0,39	1,50	0,50
			$l=100$	1,4	0,40		
		$\Phi = \frac{1}{2}$	$l=10$	1,00	0,28	1,00	0,33
			$l=100$	1,00	0,29		
	$\Phi = 1$	$l=10$	0,78	0,22	0,75	0,25	
		$l=100$	0,78	0,22			
	$\Phi_k = \Phi\varphi_0$	-	$l=10$	0,91	0,14	0,90	0,17
			$l=100$	0,92	0,15		
$h(\varphi) = \frac{1}{\varphi \ln M}$	$\Phi_k = const$	$\Phi = 0$	$l=10$	1,30	0,30	1,40	0,40
			$l=100$	1,27	0,27		
		$\Phi = \frac{1}{2}$	$l=10$	0,98	0,25	0,93	0,33
			$l=100$	0,98	0,23		
	$\Phi = 1$	$l=10$	0,78	0,22	0,70	0,30	
		$l=100$	0,79	0,21			
	$\Phi_k = \Phi\varphi_0$	-	$l=10$	0,94	0,13	0,90	0,19
			$l=100$	0,95	0,12		

Примечание к таблице 2: *для $\widetilde{T}_k = a^k$ (при $a = 2$) значения величин β, α , рассчитанные для $l = 10$ и $l = 100$ отличаются более высоким порядком точности, чем 10^{-2} .

Итак, линейную и степенную сетки периодов можно рассматривать как предельные случаи сеток периодов общего вида (1).

Оценочно можно считать, что значения параметров $N_{max}; L_{max}; \omega_{max}; M; \alpha; \beta$ для произвольных сеток периодов ограничены значениями соответствующих параметров, полученных для предельных сеток при заданном l .

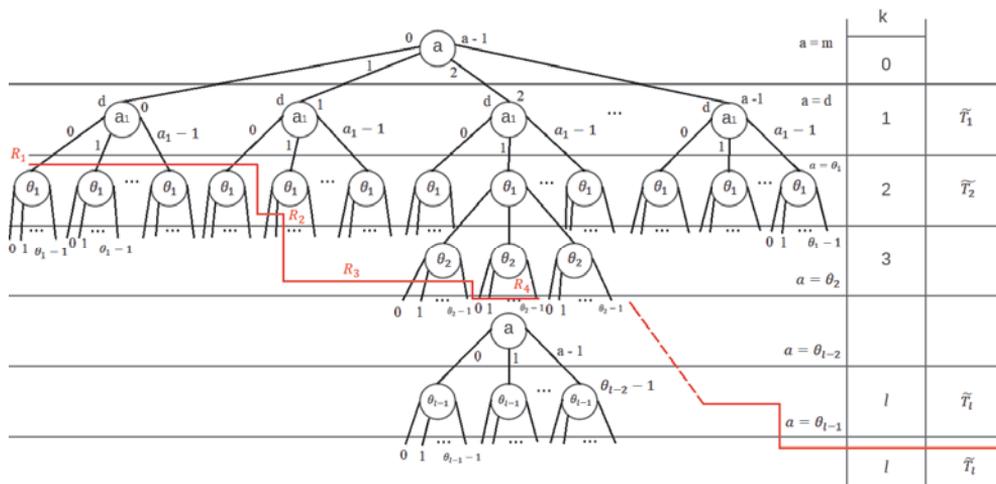


Рисунок 2 – Дерево графа, соответствующее условию (28)

Тогда любому набору R_k ($k = 1, 2, \dots, l$) можно сопоставить сечение графа по ветвям, проведённое следующим образом:

а) начиная слева направо, проводится горизонтальное сечение, отсекающее R_1 ветвей, проходящих с первого яруса на второй. При этом отсечённая нижележащая часть графа пропадает и в дальнейшем не рассматривается, т.е. под R_1 каналов резервируется R_1 фаз периода \tilde{T}_1 и запрещается их расщепление;

б) из оставшейся части графа отсекается ещё R_2 ветвей на 2-ом ярусе и отбрасывается нижележащая часть графа, т.е. резервируется ещё R_2 фаз периода \tilde{T}_2 и запрещается их расщепление;

в) процедура продолжается до тех пор, пока не будет исчерпан набор R_k ($k = 1, 2, \dots, l$) или исчерпаны все фазы.

При этом во втором случае, если из набора R_k остались незадействованные номера каналов, то это означает, что (25) не выполняется (что легко проверить суммированием).

В результате сечения остаётся дерево графа, аналогичное дереву, приведённому на рисунке 2. Следовательно, по формуле (8) можно определить [2] величину фаз c_k , использование которых даёт возможность равномерного размещения команд опроса без наложения во временную последовательность, т.е. сетка корректна.

Необходимость. Для сетки периодов (1), (2) обязательно выполняется (27), если сетка корректна.

Пусть сетка корректна, при этом имеется только две взаимоисключающие возможности:

- либо для сетки выполняется (27);
- либо имеется, по крайней мере одна пара $\widetilde{T}_{k+1}, \widetilde{T}_k$, для которой:

$$\widetilde{T}_{k+1} \neq \varkappa_k \widetilde{T}_k \quad (29)$$
 ни при каких целых $\varkappa_k > 1$.

Рассмотрим второй случай и покажем, что он противоречит условию корректности сетки, тем самым докажем необходимость.

Пусть общий множитель в периодах $\widetilde{T}_{k+1}; \widetilde{T}_k$ из (29)

$$\{\widetilde{T}_k; \widetilde{T}_{k+1}\} = mr, \tag{30}$$

где r – целое. Тогда

$$0 < r < a_k, \tag{31}$$

т.к. в противном случае \widetilde{T}_{k+1} обязательно делился бы нацело на \widetilde{T}_k , что противоречит (29).

Таким образом, числа $\widetilde{T}_k; \widetilde{T}_{k+1}$ можно представить так:

$$\begin{aligned} \widetilde{T}_k &= mrq = ma_k; \\ \widetilde{T}_{k+1} &= mr \cdot b = ma_{k+1}, \end{aligned} \tag{32}$$

где q, b – целые, причём

$$1 < q < b \tag{33}$$

$$\{b; q\} = 1 \tag{34}$$

Рассмотрим дерево графа, производящее разбиение ряда $j = 0, 1, 2, \dots$ на непересекающиеся классы вычетов по модулям $\widetilde{T}_k, \widetilde{T}_{k+1}$ [5, 7] (рис. 3). Для этого зададим значения:

$R_k = (m - 1)rq - 1$, – количество каналов, имеющих период \widetilde{T}_k ;

$R_{k+1} = rb + 1$, – количество каналов, имеющих период \widetilde{T}_{k+1} ;

$R_j = 0$ ($j \neq k; k + 1$).

При распределении фаз графа между указанными группами каналов, R_k каналов заберут R_k фаз периода \widetilde{T}_k , т.е. будут использованы все узлы со значением $a_k = rq$ (рис. 3). При этом одна фаза x для узла E_1 останется свободной. R_{k+1} каналов заберут $R_{k+1} - 1$ фаз периода \widetilde{T}_{k+1} от единственного узла со значением $a_{k+1} = rb$, при этом один канал останется неиспользованным.

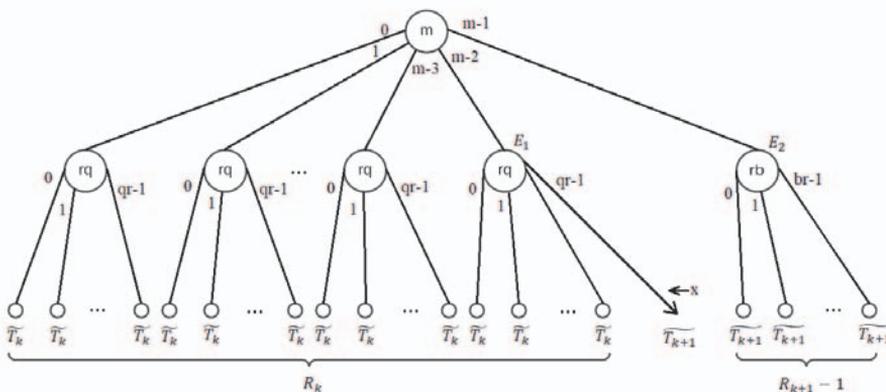


Рисунок 3 – Дерево графа распределения фаз между группами каналов R_k

Заметим, что свободная фаза x периода \widetilde{T}_k не может быть зарезервирована под нераспределённый канал с периодом \widetilde{T}_{k+1} , т.к. для этого необходимо, чтобы существовало такое целое $u_k > 1$, что:

$$\widetilde{T}_{k+1} = mr \cdot b = u_k mrq = u_k \widetilde{T}_k,$$

а это противоречит (29).

Аналогичные результаты получаются при любом другом распределении

фаз графа между R_k и R_{k+1} каналами с периодами \widetilde{T}_k и \widetilde{T}_{k+1} соответственно. При этом в (25) будет строгое неравенство, т.к.

$$\sum_{j=1}^l \frac{R_j}{\widetilde{T}_j} = \frac{(m-1)rq - 1}{mrq} + \frac{rb + 1}{mrb} = 1 - \frac{1}{mr} \left(\frac{b-q}{bq} \right) < 1.$$

Таким образом, для любых сеток периодов, которые не удовлетворяют (27), можно указать такой набор R_j ($j = 1, 2, \dots, l$), что невозможно распределить фазы дерева между всеми каналами, а, следовательно, невозможно равномерное размещение команд опроса всех каналов в единую временную последовательность без наложения, т.е. сетка некорректна.

Отметим, что в частных случаях для некорректных сеток можно указать такой набор R_j ($j = 1, 2, \dots, l$), что в (25) будет строгое равенство, а равномерное расположение команд опроса без наложения невозможно. Например, если какой-либо период сетки $\widetilde{T}_l = mrbq$, то стоит добавить к R_k и R_{k+1} каналам с периодами \widetilde{T}_k и \widetilde{T}_{k+1} ещё $R_j = b - q$ каналов с периодами \widetilde{T}_l , как в (25) будет строгое равенство. Но при этом для рассматриваемой сетки по-прежнему невозможно найти место на дереве (рис. 4).

Из рисунка 4 видно, что на дереве осталось q свободных фаз периода \widetilde{T}_j и один незадействованный канал с периодом \widetilde{T}_{k+1} . Соответственно, в макрокадре длиной L будет $L_n = q \frac{L}{T} = \frac{L}{mrb}$ свободных позиций, и точно такое же количество позиций $L_n = q \frac{L}{T} = \frac{L}{mrb}$ требуется для размещения команд опроса канала с периодом \widetilde{T}_{k+1} . Однако, указанное размещение провести невозможно, т.к. период повторения пустых позиций в макрокадре L является переменным и не совпадает с заданным периодом \widetilde{T}_{k+1} , т.е. требование регулярности опроса для этого канала не выполняется.

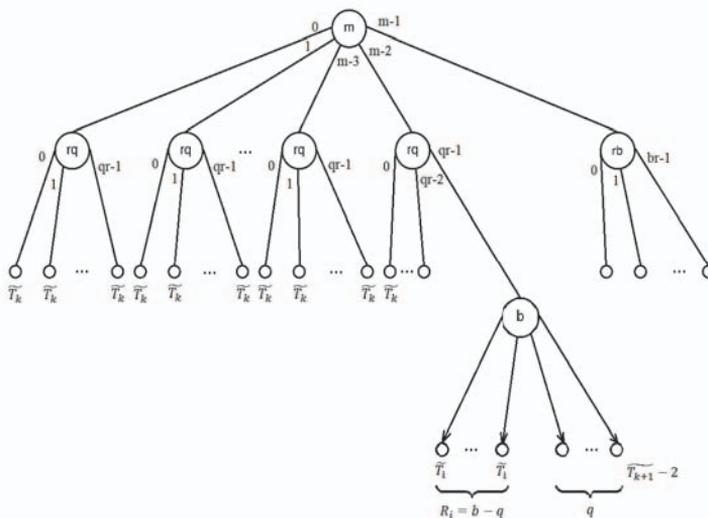


Рисунок 4 – Дерево графа, иллюстрирующее отсутствие возможности размещения канала с периодом \widetilde{T}_{k+1} в макрокадре L

Следует отметить, что граф корректной сетки является полным в том смысле, что он отражает все возможные разбиения натурального ряда чисел $j = 0, 1, 2, \dots$ на непересекающиеся классы вычетов по модулям \widetilde{T}_k ($k = 1, 2, \dots, l$). Для любого корректного набора R_k ($k = 1, 2, \dots, l$), возможны различные варианты распределения фаз дерева среди измерительных каналов, а не обязательно тот вариант, что использовался при доказательстве теоремы 1.

При резервировании за измерительными каналами фаз опроса необходимо руководствоваться следующими правилами:

любые R_k фаз периода \widetilde{T}_k можно резервировать под R_k каналов с периодами \widetilde{T}_k , при этом:

- а) нельзя одну фазу резервировать под два или более каналов;
- б) зарезервированная фаза периода \widetilde{T}_k запрещает резервирование всех тех фаз, расщеплением которых она получена, а также всех тех фаз, которые могут быть получены при её дальнейшем расщеплении.

Отметим также, что для некорректных сеток нельзя построить полный граф, что легче всего продемонстрировать на примере сетки периодов $\widetilde{T}_1 = 2 \times 2$; $\widetilde{T}_2 = 2 \times 3$. Для данной сетки возможно 3 способа распределения фаз между каналами, которые показаны на рисунке 5. Из рисунка 5 видно, что невозможно построение одного общего графа, сечением которого по ветвям можно было бы получить как частные все три случая, приведённые на рисунке.

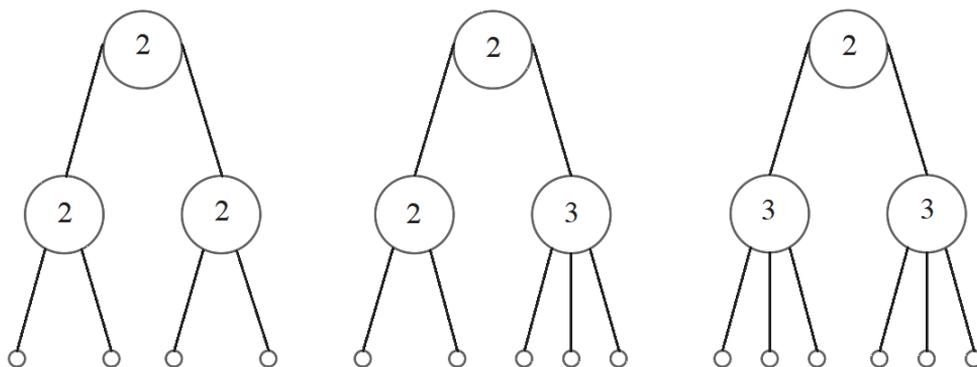


Рисунок 5 – Пример отсутствия возможности построения полного графа для некорректных рядов (сеток)

Рассмотрим степенную сетку периодов:

$$\widetilde{T}_k = a^k \quad \begin{cases} k = 1, 2, \dots, l; \\ a > 1, a \in \mathbb{Z}, \end{cases} \quad (35)$$

которая является корректной, и для неё существует полное дерево графа (рис. 6).

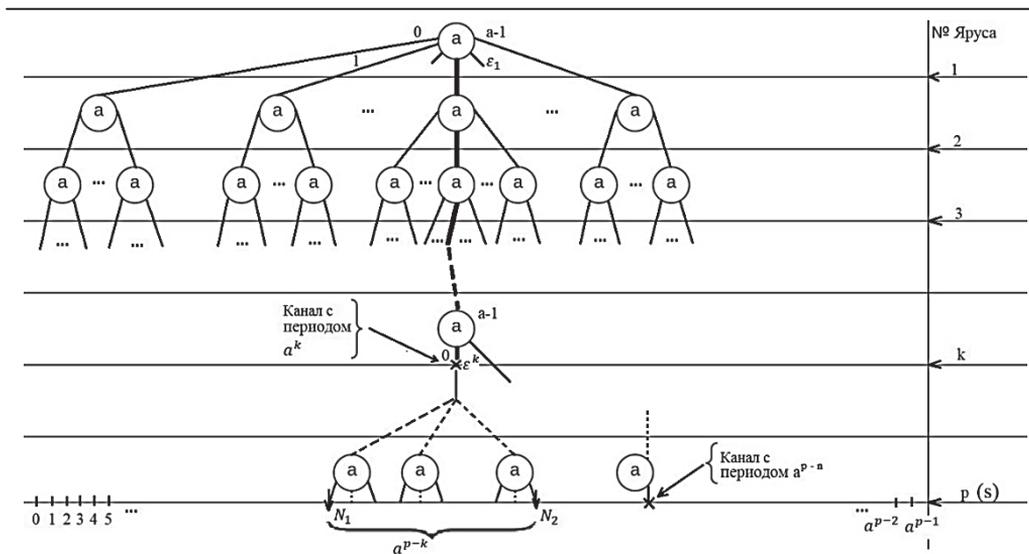


Рисунок 6 – Полное дерево графа степенного ряда (сетки) периодов $\widetilde{T}_k = a^k$

усть задан некоторый набор R_k , удовлетворяющий (25), и такой, что:

а) $R_k \neq 0$; $1 \leq k \leq l$, т. е. в наборе имеется канал с периодом a^k ;

б) $R_p \neq 0$, где p такое, что $R_i > p = 0$, $k \leq p \leq l$, т.е. в наборе нет каналов с периодом большим, чем a^p . Длина макрокадра L для данного набора определяется самым низкочастотным каналом, т.е.

$$L = a^p. \quad (36)$$

Рассмотрим канал D с периодом опроса a^k (рис. 6). Для него по формуле (8) [2] можно подсчитать начальную позицию в макрокадре L , т. е. фазу:

$$c_D = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 a + \varepsilon_3 a^2 + \dots + \varepsilon_{k-1} a^{k-2} + \varepsilon_k a^{k-1}, \quad (37)$$

где ε_i ($i = 1, 2, \dots, k$) – номер ветвей, исходящих из узлов, и таких, что они составляют путь, ведущий к каналу D ($0 \leq \varepsilon < a$).

Запись c_D в позиционной системе счисления по основанию « a » будет выглядеть следующим образом:

$$c_D = \varepsilon_k \varepsilon_{k-1} \dots \varepsilon_1, \quad (\text{по основанию } a).$$

Рассмотрим номера позиций в макрокадре L , которые будут иметь команды опроса канала D с фазой c_D и периодом a^k . Можно увидеть, что последовательные значения ψ этих позиций, записанные в позиционной системе счисления по основанию « a », будут:

$$\begin{array}{r}
 c_D = \\
 \psi:
 \end{array}
 \left.
 \begin{array}{cc}
 \overbrace{\quad\quad\quad}^{p-k} & \overbrace{\quad\quad\quad}^k \\
 00 \dots 00 & \varepsilon_k \varepsilon_{k-1} \dots \varepsilon_1 \\
 00 \dots 01 & \varepsilon_k \varepsilon_{k-1} \dots \varepsilon_1 \\
 \dots \dots \dots & \dots \dots \dots \\
 00 \dots 0(a-1) & \varepsilon_k \varepsilon_{k-1} \dots \varepsilon_1 \\
 (a-1)(a-1) \dots (a-1)(a-1) & \varepsilon_k \varepsilon_{k-1} \dots \varepsilon_1
 \end{array}
 \right\} a^{p-k} \quad (38)$$

Рассмотрим горизонтальное сечение s графа на p -ом уровне (рис. 6), т.е. на уровне, где расположен самый низкочастотный канал из набора R_k ($k = 1, 2, \dots, l$). Линия сечения s пересекает ровно a^p фаз периода a^p , что совпадает с величиной L из (37). Пронумеруем все эти фазы вдоль линии s слева направо, начиная с 0.

Фаза периода a^k , которую имеет канал D , расщепляется на a^{p-k} фаз периода a^p , которые будут пронумерованы на сечении s подряд от N_1 до N_2 ,

$$1 + N_2 - N_1 = a^{p-k}. \quad (39)$$

Подсчитаем значение N_1 . Для этого необходимо подсчитать все ветви графа (с соответствующими весовыми коэффициентами), которые остаются слева от пути, ведущего к каналу D .

На первом ярусе количество таких ветвей будет ε_1 и они опустят на линию s $\varepsilon_1 a^{p-1}$ фаз периода a^p . На втором ярусе - $\varepsilon_2 a^{p-2}$ фаз периода a^p и т.д. Таким образом,

$$N_1 = \varepsilon_1 a^{p-1} + \varepsilon_2 a^{p-2} + \dots + \varepsilon_k a^{p-k} + 0a^{p-k-1} + \dots + 0a^1 + 0a^0,$$

или, записывая в позиционной системе счисления по основанию « a », имеем:

$$N_1 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_k \overbrace{00 \dots 00}^{\substack{k \\ p-k}}$$

При этом последовательные позиции ψ_s на сечении s от N_1 до N_2 принимают следующие значения:

$$\begin{array}{r}
 N_1 = \\
 \psi_s: \\
 N_2 =
 \end{array}
 \left.
 \begin{array}{cc}
 \overbrace{\quad\quad\quad}^k & \overbrace{\quad\quad\quad}^{p-k} \\
 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_k & 0 \dots 00 \\
 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_k & 0 \dots 01 \\
 \dots \dots \dots & \dots \dots \dots \\
 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_k & 0 \dots 0(a-1) \\
 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_k & (a-1) \dots (a-1)(a-1)
 \end{array}
 \right\} a^{p-k} \quad (40)$$

Сравнивая (38) и (40), можно сделать следующий вывод:

Каждому значению ψ из множества чисел (38) всегда можно найти одно и только одно соответствующее значение ψ_s из множества чисел (40), такое, что зеркальное отображение ψ_s (относительно правого или левого края записи) совпадает со значением ψ или, что то же самое, множество чисел (38) взаимно одно-

значно отображается на множества чисел (40) операцией зеркального отображения записей этих чисел в позиционной системе счисления по основанию a .

Таким образом доказана Теорема 2: граф сетки периодов $\widetilde{T}_k = a^k$ ($k = 1, 2, \dots, l$), на котором задано размещение номеров каналов из некоторого набора R_k ($k = 1, 2, \dots, l$), взаимно однозначно определяет все номера позиций всех каналов в макрокадре L .

Из теоремы 2 следует важный вывод.

Пусть ξ есть p – позиционный счётчик по основанию a , считающий последовательные позиции в макрокадре L , начиная с 0. Тогда на позиции ξ располагается команда опроса канала D только в том случае, если

$$c_{D_s} \leq \xi_s < c_{D_s} + a^{p-k}, \quad (41)$$

где ξ_s – зеркальное отображение ξ ,

c_{D_s} – зеркальное отображение c_D .

Выводы

1. Трудности по организации программно-управляемого адресного опроса, связанные с универсальным подходом к задаче в широком диапазоне количества измерительных каналов и их информативности, при использовании произвольных частот опроса делают эту задачу очень сложной, т.к. каждая конкретная совокупность каналов и их частот опроса в программе измерений требует определённых исследований для своей реализации в данной системе сбора. Поэтому для реальных систем сбора информации необходимо использовать конкретные ряды (сетки) частот, такие, для которых:

а) максимально допустимое количество каналов N_{max} , максимальная частота их опроса ω_{max} , спектр частот M имеют наибольшие значения;

б) максимальная длина цикла телеметрирования L_{max} , коэффициенты потерь α, β имеют наименьшие значения.

2. Кроме этого необходимо использовать корректные сетки частот. Это обусловлено тем, что для некорректных сеток усложняются алгоритмы приведения заданных частот опроса каналов к частотам сетки, т.к. в результате работы этих алгоритмов могут возникнуть такие наборы величин R_k ($k = 1, 2, \dots, l$) в программе измерений, для которых невозможно равномерное размещение команд опроса всех каналов в макрокадре L , а это приводит к дополнительным перераспределениям до получения корректного набора R_k .

Исходя из вышесказанного, для дальнейших исследований функции программно-управляемого адресного опроса была выбрана следующая степенная сетка (ряд) периодов:

$$\widetilde{T}_k = a^k \quad (k = 1, 2, \dots, l),$$

при $a = 2$, так как:

а) двоично-степенная сетка частот является корректной сеткой;

б) двоично-степенная сетка частот является самой плотной среди корректных сеток, причём потери, характеризующие несовпадение заданных частот опроса каналов и частот из сетки (параметр α), остаются вполне приемлемыми для практического применения. При этом параметр потерь α для двоично-степенной сетки частот (периодов) оценочно только на 10 ... 15% больше (табл.

2), чем аналогичный параметр для самой плотной - линейной сетки периодов;
в) максимальная длина цикла телеметрирования (макрокадра) L , которая может быть достигнута при использовании двоично-степенной сетки частот – L_{max} , является минимальной среди аналогичных параметров L_{max} для всех возможных сеток частот при заданном l :

$$L_{max} = 2^l;$$

г) максимальная частота опроса каналов ω_{max} , допустимая в двоично-степенной сетке частот, является наибольшей среди аналогичных параметров для всевозможных сеток частот (при заданных l и I_s):

$$\omega_{max} = \frac{I_s}{2};$$

д) максимальное количество каналов N_{max} , а также спектр частот опроса M , допустимые в двоично-степенной сетке, являются достаточно большими для широкого диапазона практических применений:

$$M = 2^{l-1},$$

$$N_{max} = 2^l.$$

При заданных l , L_{max} параметр M для двоично-степенной сетки является самым большим среди аналогичных параметров для всевозможных сеток частот;

е) учитывая, что генераторы форматов кадра информационно-измерительной системы являются цифровыми устройствами на элементах двузначной логики, двоично-степенная сетка удобна для синтеза алгоритмов функционирования генератора форматов кадра и физической реализации [3, 4].

Литература

1. Ракетная телеметрия : монография / А.П. Мороз. М.: Издательство «Научный консультант», 2021. 478 с.
2. Полехин А.И., Полехина Г.Е., Алексеев В.Н. Методическое и математическое обеспечение формирования циклограмм опроса информационных источников в бортовых системах программируемой телеметрии // Сборник трудов 4 ЦНИИ Минобороны России. Вып. 163. Т. 2. Инв. № 218326. Королев, 2021. С. 158-166.
3. Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Специализированный вычислитель – формирователь последовательностей команд опроса каналов программируемых цифровых систем телеизмерений // Цифровая трансформация науки и образования: Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Нальчик, 2021. С. 79-89.
4. Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Повышение производительности алгоритма построения циклограммы команд опроса в многоканальных телеметрических системах с программно-управляемым сбором информации // Информационно-технологический вестник. 2022. № 2(32). С. 83-96.
5. Бухштаб А.А. Теория чисел. М.: Просвещение, 1966. 371 с.
6. Королев М.А. Теория чисел в работах Чебышёва // Квант. 2021. № 8. С. 2-9.
7. Уилсон Р. Введение в теорию графов. М.: Мир, 1977. 208 с.

УДК 537.634:620.263

**Теоретическое обоснование характеристик магнетронов
для активации жидких диамагнетиков**

И.Г. Панин, директор «Конструкторского бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева» филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область,

К.В. Щурин, доктор технических наук, профессор,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

Рассмотрена проблема повышения теплотворной способности углеводородных топлив методом магнитной активации, реализующим разрыв межмолекулярных и внутримолекулярных связей, что обеспечивает высокий уровень доступа молекул окислителя к молекулам горючего, повышая полноту сгорания топлива и снижение вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания. С использованием зависимостей Ван-дер-Ваальса и уравнения Шредингера предложены методы расчета энергии магнитного поля, необходимой для разрыва межмолекулярных внутримолекулярных связей. Рассмотрены методы косвенной оценки эффективности процесса магнитной активации немагнитных жидких сред, и в качестве приоритетного рекомендован метод сравнительной оценки вязкости рабочей жидкости до и после активации.

Тепловые двигатели, углеводородные топлива, теплотворная способность, магнитная активация, вязкость.

**Theoretical substantiation of the characteristics of magnetrons
for activation liquid diamagnets**

I.G. Panin, Director of the «Design Bureau of Chemical Engineering named after A.M. Isaev» of the branch of JSC «GKNPTS named after M.V. Khrunichev», Korolev, Moscow region,

K.V. Shchurin, Doctor of Technical Sciences, Professor,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The problem of increasing the calorific value of hydrocarbon fuels by the method of magnetic activation, which realizes the rupture of intermolecular and intramolecular bonds, which ensures a high level of access of oxidizing molecules to fuel molecules, increasing the completeness of fuel combustion and reducing harmful emissions of internal combustion engines, is considered. Using van der Waals dependencies and the Schrödinger equation, methods for calculating the magnetic field energy

required for rupture are proposed intermolecular intramolecular bonds. Methods for indirect assessment of the effectiveness of the process of magnetic activation of non-magnetic liquid media are considered, and the method of comparative assessment of the viscosity of the working fluid before and after activation is recommended as a priority.

Heat engines, hydrocarbon fuels, calorific value, magnetic activation, viscosity.

Введение. Необратимое снижение запасов углеводородного сырья обуславливает необходимость повышения эффективности его использования, в первую очередь продуктов передела – углеводородных топлив. Целеполаганием технико-технологического прогресса при создании тепловых двигателей (ТД) является снижение энтропии их подсистем, осуществляющих преобразования энергии на пути к рабочему органу и, как результат, повышение КПД со снижением удельного расхода топлива и улучшением экологических показателей. Необходимо признать, что в этой области достигнуты результаты, близкие к предельным и дальнейшие высокие темпы повышения энергетических и экологических показателей ТД для их сложившихся конструкций и рабочих процессов представляются маловероятными [1].

Основной характеристикой качества топлива, формирующей показатели его энергетической и экологической эффективности, является теплотворная способность, которая преимущественно зависит от полноты сгорания топлива. Применительно к жидким топливам величина низшей теплотворной способности $Q_{н}$ (МДж/кг) определяется по известной формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_{н} = 0,339[C] + 1,256[H] + 0,109[S] - 0,109[O] - 0,025[W], \quad (1)$$

где в скобках указано процентное массовое содержание соответствующих химических элементов – углерода, водорода, серы, кислорода и влаги W в составе топлива; 0,339, 1,256, 0,109 – теплоты сгорания, необходимые для сжигания 1% соответствующего элемента.

Ключевым моментом анализа теплотворной способности топлива является необходимость учета того, что формула Д.И. Менделеева справедлива только при выполнении условия свободного доступа кислорода ко всем молекулам горючего. Это условие практически реализуется с помощью внешних малоэнергетических воздействий, исследованию которых посвящены работы [1-8, 14-17].

Отличительной особенностью молекул компонентов в составе немагнитных жидких сред, в том числе углеводородных топлив, является межмолекулярное взаимодействие, в результате которого образуются устойчивые системы – кластеры (ассоциаты) [1-4], состоящие из большого числа молекул, и основной задачей повышения энергетической и экологической эффективности ТД является повышение теплотворной способности топлива путем дефрагментации молекулярных кластеров до выделения отдельных молекул [1-4, 17].

В качестве внешних малоэнергетических воздействий, способствующих дефрагментации, чаще всего используют введение присадок и внешние физические воздействия – ультразвуковые, электрические, электромагнитные, магнит-

ные и другие [1, 3-8], позволяющие повысить степень упорядоченности внутри-молекулярных и надмолекулярных структур. Это способствует достижению цели настоящего исследования – повышению КПД двигателя и снижению его вредных выбросов.

Методика исследования. Среди названных малоэнергетических физических воздействий в наибольшей степени апробированы ультразвуковые, электромагнитные и магнитные методы [4, 5]. Магнитная обработка (активация) жидкого углеводородного топлива является наиболее предпочтительной по совокупности определяющих технико-экономических показателей.

В настоящее время многие реальные физические процессы сопровождаются феноменами, которые лежат за пределами законов, описывающих данное явление или процесс. Воздействия таких кардинальных факторов на протекание процесса и его конечный результат называют *неспецифичным физическим воздействием* (НФВ) [4]. Для описания таких явлений некорректно использование классических количественных молекулярно-кинетического и термодинамического подходов, поэтому используют аналогичные качественные – *квазимолекулярно-кинетический* (КМК) и *квазитермодинамический* (КТД) подходы [4].

Изучение структурных физико-химических свойств немагнитных жидкостей началось с исследований воды – диамагнетика, магнитное поле которого формируется движением электронов, имеющих по два магнитных момента – орбитальный и спиновой; при этом формирующими, основными являются орбитальные магнитные моменты. Согласно классической теории П. Ланжевена, у диамагнетиков во внешнем магнитном поле (МП) за счет прецессии электронных орбит с частотой Лармора, индуцируется направленный противоположно внешнему полю (правило Ленца) магнитный момент, и, согласно принципу суперпозиции, суммарное поле в диамагнетике оказывается несколько меньше, чем напряженность приложенного внешнего МП [9]. При этом следует констатировать, что после снятия внешнего МП никакой остаточной магнитной информации об его влиянии диамагнетик не несет, и это дает основание с позиций классической физики отрицать реально существующий феномен «магнитной памяти» воды.

В.Г. Левич [10], считая воду *равновесной системой*, с позиций классической термодинамики и статистической физики полагает, что её свойства в свою очередь будут полностью определяться функцией состояния – статистической суммой Z , зависящей от температуры T , а также энергий микросостояний $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$, которые определяются другими термодинамическими величинами, такими как масса, число частиц и объем. Магнитная восприимчивость по Левичу является количественной мерой изменения статистической суммы при помещении воды в МП напряженностью H и определяется по формуле

$$\chi_n = \frac{KT}{V} \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{\partial(\ln Z)}{\partial H} \quad (2)$$

где K – постоянная Больцмана, Дж·К⁻¹; T – абсолютная температура, К; V – скорость движения воды, м/с, направленная перпендикулярно вектору напряженности МП H , А·м.

Отметим, что жидкие углеводородные топлива, как и вода, являются

диамагнетиками, поэтому для исследования процессов их магнитной активации так же правомерен подход В.Г. Левича. При этом для количественной оценки необходимых параметров внешнего МП процессы следует рассматривать как НФВ.

При воздействии МП на немагнитную жидкость индуцируется магнитный момент, вызванный смещением орбит электронных облаков атомов. Вследствие этого диамагнитные молекулы вытесняются в области меньшей напряженности МП, а парамагнитные молекулы вытесняются в сторону тех областей МП, где выше значение магнитной напряженности [4, 6, 9]. «Водные» теории [4, 6-8] основаны на разрушении в МП агрегатов железосодержащих частиц.

Следует отметить, что в процессе магнитной обработки нефтепродуктов основными микропримесями вместе с железосодержащими включениями являются смолисто-асфальтеновые компоненты (САК), несущие свободные поверхностные заряды, которые также активно взаимодействуют с внешним МП [6, 7].

Таким образом, первоочередной задачей повышения энергетической эффективности – теплотворной способности топлива – является выделение отдельных молекул горючего путем дробления молекулярных кластеров, а задачей следующего уровня является дефрагментация молекул на свободные радикалы и атомы [1, 6, 7].

Межмолекулярное взаимодействие основано на электрическом взаимодействии – силе Ван-дер-Ваальса, которая является частным случаем Кулоновских сил, и основными параметрами, определяющими силу межмолекулярной связи, являются длина связи, валентный угол и энергия связи [11-14]. При этом молекулярные диполи взаимодействуют между собой полюсами с противоположными зарядами.

Для диполь-дипольного межмолекулярного взаимодействия расчет значений энергии разрыва связей производится с использованием зависимостей Ван-дер-Ваальса [13, 14]. В качестве примера рассмотрим взаимодействие диполей, показанное в таблице 1, поз. 1. Результирующая сила взаимодействия складывается из четырех компонентов – двух сил отталкивания между одноименными зарядами и двух сил притяжения – между разноименными зарядами [13-15]. Суперпозиция сил определяет равнодействующую

$$F = \frac{(-q)(-q)}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{qq}{4\pi\epsilon_0 r^2} + \frac{(-q)(-q)}{4\pi\epsilon_0 (r-l)^2} + \frac{(-q)(-q)}{4\pi\epsilon_0 (r+l)^2} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2}{r^2} - \frac{1}{(r-l)^2} - \frac{1}{(r+l)^2} \right] \quad (3)$$

Осуществив преобразования, получим

$$F = \frac{6q^2 l^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r^2 - (l^2 \div 3)}{r^2 (r^2 - l^2)^2} \quad (4)$$

Для расчета силы взаимодействия двух молекул понадобится определить размер длины молекулы (l), дипольный момент (p), эффективный заряд диполя (σ). Для этого воспользуемся данными [12, 14]. Длину молекулы можно определить через сумму диаметров атомов, входящих в нее. Атомы углерода и водорода

да, образующие молекулы топлива, имеют соответственно размеры $D_C = 0,154$ нм, $D_H = 0,275$ нм. Дипольный момент – произведение величины заряда на расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов. Единицей измерения дипольного момента является внесистемная единица Дебай (D): $1 D = 3,33 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

В таблице 1 приведены результаты расчета сил притяжения молекул при их различном взаимном расположении. Расчеты проведены аналогично выводу формул (3), (4).

Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения сил взаимодействия диполей

Поз.	Ориентация диполей	Сила взаимодействия
1		$F = \frac{6q^2 l^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{r^2 - (l^2 \div 3)}{r^2(r^2 - l^2)^2} \quad (5)$
2*		$F = \frac{2q^2 l^2 (R^2 + Rr + r^2)}{4\pi\epsilon_0 r^2 R^3 (R + r)} \quad (6)$
3		
4		

*Примечание: для схемы, поз. 2, в уравнении (6) $R = r$.

Проведя математические расчеты по нахождению экстремума функции ($dF/dr = 0$), можно сделать вывод, что максимальная сила притяжения происходит в том случае, когда расстояние между соседними диполями не более длины, равной самой молекуле, а при меньшем – взаимное отталкивание. Следовательно, необходимо приложить несколько большую внешнюю силу, чтобы разорвать молекулярный кластер на отдельные молекулы.

Энергия внутримолекулярной связи равна работе, которую необходимо затратить, чтобы разделить молекулу на атомы (группы атомов) и удалить их друг от друга на условно «бесконечные» расстояния [14, 15], при которых стано-

вится не возможным их синтетическое взаимодействие – восстановление связи. Для энергетического анализа таких связей в квантовой химии применяют метод наложения валентных схем (теории резонанса) [11, 15] и используют приближенные решения уравнения Шредингера в волновые функции вида

$$\psi = \sum c_i \psi_i, \quad (8)$$

где ψ – приближение к результатам точного решения уравнения Шредингера для многоатомных молекул, ψ_i – отвечает определенному расположению связей в молекуле, c_i – коэффициенты.

Уравнение Шредингера называют основным уравнением квантовой химии, и при решении используют приближенные выражения для ψ -функций, определяемых вариационным методом [11, 13, 14].

Энергетический анализ некоторых внутримолекулярных связей, характерных для многокомпонентных углеводородных топлив, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения энергии связи некоторых молекул

Связь	Гибридизация атома углерода	Энергия (среднее значение), кДж/моль	Длина связи, нм	Дипольный момент, D
C–C	sp ³	348	0,154	0
C=C	sp ²	620	0,134	0
C≡C	sp	814	0,120	0
C–H	sp ²	435	0,107	0,40
C–O	sp ³	344	0,143	0,86
C=O	sp ²	708	0,121	2,40
C–F	sp ³	473	0,140	1,39
C–I	sp ³	239	0,213	1,25
C–N	sp ³	293	0,147	0,45
C=N	sp ²	598	0,128	1,40
C–S	sp ³	260	0,181	0,80
O–H	–	460	0,096	1,51
N–H	–	390	0,101	1,31
S–H	–	348	0,130	0,70

Анализ значений дипольных моментов элементов и их соединений (таблица 2) подтверждает вывод «коллоидной теории» [6, 7] о решающем влиянии неферромагнитных микропримесей на внешние и внутримолекулярные взаимодействия, в первую очередь, на образование молекулярных кластеров. Отметим также, что энергия связи СН – основного звена углеводородных цепей – не значительна, что облегчает процесс дефрагментации молекул.

Энергия межмолекулярного взаимодействия на один-два порядка меньше энергии химической связи. Например, энергия химической связи C–H (в углеводородах) составляет 415 кДж/моль, C–C-связи – 332 кДж/моль, а энергия взаимодействия между молекулами углеводородов – приблизительно 4,18 кДж на группу CH₃ [11, 12].

В общем случае энергия взаимодействия определяется по формуле (9) [13].

$$E_K = -2\mu_1\mu_2 / 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (9)$$

где μ_1, μ_2 – дипольные моменты; r – расстояние между молекулами; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

В случае одинаковых молекул ($\mu_1 = \mu_2$) формулу (9) можно записать в виде

$$E_K = -\mu^2 / 4\pi\epsilon_0 r^3 \quad (10)$$

В равновесной среде устанавливается некоторое распределение кластеров по числу содержащихся в них частиц. Это число в общем случае является случайной величиной. Функция распределения кластеров должна учитывать особенности строения кластера. Исследование свойств различных статистических распределений позволило авторам [2, 17, 18] выделить из их множества наиболее общее – гамма-распределение, плотность вероятностей которого в применении к количеству содержащихся в кластере частиц определяется по формуле (11)

$$f(Z) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} Z^{\alpha-1} e^{-\lambda Z}, \quad (11)$$

где $\lambda > 0$ – параметр масштаба, $\alpha > 0$ – порядок распределения, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция (интеграл Эйлера второго рода).

Расчет по формуле (11) позволяет определить наиболее вероятное количество частиц в кластере с последующим расчетом суммарной энергии связей внутри него.

В нашем случае для разрушения кластеров и внутримолекулярных связей используется энергия магнитного поля (ЭМП). На рисунке 1 показаны этапы воздействия магнитного поля на единичный диполь.

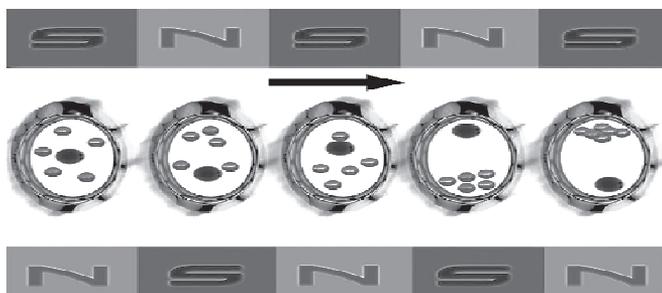


Рисунок 1 – Движение молекулы в переменном магнитном поле

Во-первых, магнитное поле снимает электростатический заряд с топлива, который оно получило при протекании в топливных магистралях и меняет его структуру. Во-вторых, изменяется вязкость и все параметры, входящие в нее: диэлектрическая проницаемость, поверхностное натяжение жидкости, константы горения, растворимость кислорода в топливе и т.д. В-третьих, при поляризации происходит упорядочение ориентаций спиновых и орбитальных моментов хаотично движущихся молекул. И, в-четвертых, благодаря переменному магнитно-

му полю ассоциаты-кластеры, совершая колебательные движения, разрушаются на отдельные диполи, которые быстрее вступают в реакцию горения. При этом также высвобождаются свободные радикалы и отдельные элементы молекулы, что дополнительно повышает теплотворную способность.

Все выше перечисленные факторы влияют на достижение поставленной цели – увеличение энергетических и экологических показателей сгорания топлива за счет полноты сгорания его компонентов.

При расчетах аппаратов для магнитной активации в [2, 4, 8] наиболее существенными полагают следующие магнитотропные параметры: напряженность магнитного поля (МП); градиент напряженности МП; время экспозиции в МП; количество пересечений разнонаправленного МП активируемой жидкостью; скорость протекания жидкости в МП.

Зная вышеперечисленные параметры, определяется энергия магнитного поля (максимальное энергетическое произведение, объемная плотность энергии) w (кДж/м³), которая зависит от магнитной индукции (B) и напряженности магнитного поля (H).

Энергия магнитного поля, заключенная в единичном объеме этого поля, называется объемной плотностью энергии магнитного поля w :

$$w = \frac{W}{V} \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}, \quad (12)$$

где B – магнитная индукция, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; H – напряженность магнитного поля, А/м; μ – относительная магнитная проницаемость.

В устройствах, для активации немагнитных жидких сред применяют неодимовые магниты из сплава Nd-Fe-B (неодим-железо-бор), которые имеют существенно лучшие магнитные свойства. В таблице 3 представлены характеристики энергоемких неодимовых магнитов.

Таблица 3 – Характеристики некоторых неодимовых магнитов

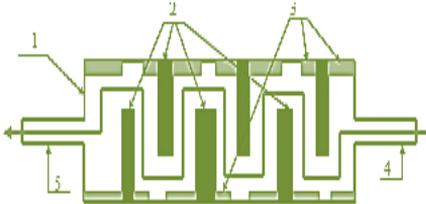
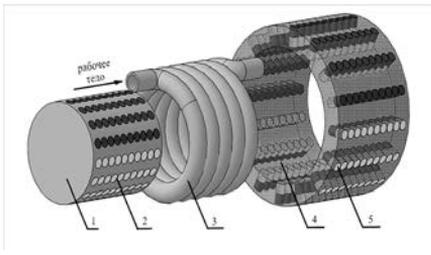
Код материала	Остаточная магнитная индукция, B_r (Тл)*	Коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cb} (кА/м)*	Коэрцитивная сила по индукции, H_{ci} (кА/м)*	Максимальная магнитная энергия, BH (кДж/м ³)*
N40	1,26–1,29	≥876	≥ 955	303–318
N42	1,29–1,33	≥ 876	≥ 955	318–334
N45	1,33–1,37	≥ 876	≥ 955	334–358
N48	1,36–1,42	≥ 876	≥ 955	358–382
N50	1,41–1,45	≥ 876	≥ 955	382–398

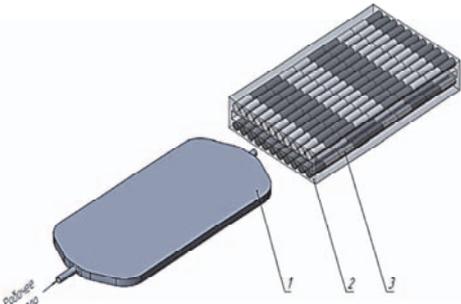
Полимерные цепочки органического топлива, проходя через магнитное поле переменной полярности, совершают колебательные движения и разрываются, увеличивая количество активных сторон молекул, одновременно вступающих в процесс окисления.

Известные конструкции аппаратов для магнитной активации жидкостей

(АМАЖ) имеют общий недостаток – низкий коэффициент использования рабочего объема (КИРО), равный отношению длины зон, в которых происходит активация, к общей длине рабочей части аппарата, и не превышающий 0,75-0,8. При скорости протекания топлива 0,5-1,0 м/с время экспозиции в магнитном зазоре – не более 0,2 с. Для увеличения времени экспозиции конструктивно реализуют либо увеличение длины рабочей зоны АМАЖ, либо снижение скорости движения жидкости путем локального увеличения сечения трубопровода. На основе данной концепции нами реализованы и запатентованы конструкции АМАЖ, во многом свободные от перечисленных недостатков (табл. 4).

**Таблица 4 – Улучшенные конструкции аппаратов
для магнитной активации жидкостей**

Конструкция, патент	Преимущества и недостатки	Примечания
 <p>1 – неферромагнитный корпус; 2 – магниты; 3 – неферромагнитные крепежные пластины; 4 – входной патрубок; 5 – выходной патрубок (патент 2411190 РФ, МПК G 02 F 1/48 «Магнитный активатор жидких сред», авторы – В.А. Помазкин, К.В. Щурин, Е.В. Цветкова)</p>	<p><i>Преимущества:</i> КИРО более 2,5; время экспозиции в МП – более 2 с.</p> <p><i>Недостаток</i> – турбулентность потока с кавитационными явлениями</p>	<p>1. Зигзагообразная траектория движения жидкости в МП; 2. Пересечение магнитного потока под углом, близким к 90°.</p>
 <p>1 – внутренняя обойма с магнитами 2; 3 – спиральный трубопровод; 4 – внешняя обойма с магнитами 5 (патент № 2693158 РФ «Аппарат магнитной активации жидкостей», авторы – К.В. Щурин, И.Г. Панин, А.А. Фокин)</p>	<p><i>Преимущества:</i> ламинарное движение потока жидкости под углом 90° к силовым линиям магнитного потока; КИРО свыше 20</p>	<p>Переменное магнитное поле создается изменением полярности магнитов на противоположную через определенные угловые промежутки – секторы, содержащие заданное количество магнитов</p>

Конструкция, патент	Преимущества и недостатки	Примечания
 <p>1 – расширительная емкость с патрубками; 2 – кассета с магнитами 3 (патент № 2703837 РФ «Магнитный активатор», авторы – К.В. Шурин, И.Г. Панин, А.А. Фокин)</p>	<p><i>Преимущества:</i> ламинарное движение потока жидкости под углом 90° к силовым линиям магнитного потока; увеличение времени экспозиции жидкости в магнитном поле в 20-25 раз</p>	<p>Переменное магнитное поле создается изменением полярности магнитов на противоположную через определенные промежутки, равные длине магнита</p>

Оценка эффективности конструктивных решений АМАЖ и, как следствие, степени активации осуществляется косвенными методами на основе анализа изменений физических свойств жидкости [1, 4]. В таблице 5 приведен анализ наиболее распространенных физических методов косвенной оценки эффективности активации, который дает возможность мотивированного выбора наиболее адекватного метода активации и конструкции АМАЖ.

Отметим, что все приведенные в таблице 5 показатели тесно коррелированы, и объединяющим параметром является вязкость жидкости (μ – динамический коэффициент вязкости). В этой связи логично принять сравнительный показатель вязкости (или поверхностного натяжения) за практический способ косвенной оценки эффективности активации путем сравнения этих показателей до проведения активации и после нее.

Таблица 5 – К применению косвенных методов оценки эффективности активации

Показатель	Расчетная зависимость	Примечание
1. Плотность	<p>1. С учетом температурного расширения:</p> $\rho = \frac{\rho_{ст}}{1 + \beta t(T - T_{ст})};$ <p>2. Для неассоциированных растворов:</p> $\rho_{см} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n x_k \frac{1}{\rho_k}}$	<p>T – текущее значение температуры; $T_{ст}$ – стандартная температура; β_i – коэффициент объемного температурного расширения; x_i – массовая доля i-го компонента в смеси, кг/кг; ρ_i – плотность i-го компонента</p>

Показатель	Расчетная зависимость	Примечание
2. Вязкость	<p>1. Касательные силы по формуле Ньютона:</p> $\tau = \mu \cdot \frac{dV}{dn}$ <p>2. Для смеси неассоциированных жидкостей:</p> <p>3. $\ell g \mu_{см} = x_1 \ell g \mu_1 + x_2 \ell g \mu_2 + \dots + x_n \ell g \mu_n$</p>	<p>μ – динамический коэффициент вязкости; V – скорость потока жидкости; n – единица длины изменения скорости по нормали к направлению движения; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – динамические коэффициенты вязкости компонентов смеси жидкостей, Па с; $\mu_{см}$ – динамический коэффициент вязкости смеси жидкостей, Па с; x_1, x_2, \dots, x_n – мольные доли компонентов смеси</p>
3. Поверхностное натяжение	<p>Поверхностное натяжение соответствует энергии, которую необходимо затратить для создания единицы площади новой поверхности раздела фаз. Величина поверхностной энергии тем больше, чем больше площадь свободной поверхности. При изменении площади свободной поверхности на ΔS поверхностная энергия изменяется на $\Delta W_p = \sigma \cdot \Delta S$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения. Так как для этого изменения необходимо совершить работу $A = \Delta W_p$, или $A = \sigma \cdot \Delta S$. Отсюда величина коэффициента поверхностного натяжения $\sigma = \frac{A}{\Delta S}$</p>	<p>В инженерной практике для системы Жидкость-газ поверхностное натяжение можно считать зависящим только от природы жидкости. Для системы жидкость-жидкость поверхностное натяжение можно приближенно рассчитать как разность поверхностных натяжений этих жидкостей на границе раздела с газом. Размерностью коэффициента поверхностного натяжения в СИ является Дж/м². Равнозначной ему величиной является Н/м (1 Дж/м² = 1Н/м)</p>
4. Теплоемкость	<p>Массовая теплоемкость смеси жидкостей пропорциональна массовой доле компонента смеси и рассчитывается по уравнению</p> $c_{см} = c_1 \bar{\chi}_1 + c_2 \bar{\chi}_2 + \dots + c_n \bar{\chi}_n$	<p>$c_{см}$ – массовая теплоемкость смеси жидкостей или газов, Дж/(кг К); c_1, c_2, c_n – теплоемкости компонентов смеси, Дж/(кг·К); x_1, x_2, x_n – массовые доли компонентов смеси</p>
5. Теплопроводность	<p>Коэффициент теплопроводности жидкостей пропорционален изобарной теплоемкости (c_p), плотности (ρ) и вязкости (μ):</p>	<p>λ_{30} – коэффициент теплопроводности при 30 °С, Вт/(м К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па с; ρ – плотность, кг/м³; β – коэффициент объемного расширения,</p>

Показатель	Расчетная зависимость	Примечание
	$\lambda_{30} = A \cdot c_p \sqrt[3]{\frac{\rho}{\mu}}$ <p>Зависимость теплопроводности от температуры описывается уравнением:</p> $\lambda_t = \lambda_{30} [1 - \beta(t - 30 \text{ }^\circ\text{C})]$ $Pr = c \cdot \mu / \lambda$ $v = \frac{2(\rho - \rho') gr^2}{9\eta}$	<p>1/К; t – температура, $^\circ\text{C}$; A – коэффициент, зависящий от степени ассоциации жидкости. Для ассоциированных жидкостей (вода) $A = 3,5840^{-3}$, для неассоциированных (бензол) $A = 4,2240^{-8}$</p>
Интегральный показатель	<p>Формула Прандтля обобщенно характеризует теплофизические свойства жидкостей. Рассчитывается по уравнению:</p> $Pr = c \cdot \mu / \lambda$	<p>c – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг К); μ – динамический коэффициент вязкости, Па с ; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К)</p>

Примечание: Для определения показателей 1–5 используют стандартные номограммы.

В материалах патента № 2096759 РФ «Экспресс-анализ физической активации жидкостей», авт. В.А. Помазкин, и монографии [4] изложена методика экспресс-анализа эффективности физической активации немагнитных жидкостей, в основу которой положен факт изменения их вязкостно-коагуляционных характеристик. Скорость оседания порошка в жидкости определяется в соответствии с уравнением Стокса

$$v = \frac{2(\rho - \rho') gr^2}{9\eta}, \quad (13)$$

где ρ и ρ' – плотность жидкости и порошка соответственно, кг/м³; η – коэффициент вязкости жидкости, Па·с; r – радиус частиц порошка, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Магнитная активация приводит к усилению коагуляции и уменьшению вязкости и, как следствие, увеличению скорости оседания порошка. Способ дает возможность косвенно оценить глубину изменений в жидкости. При этом эффективность магнитной активации определяется по формуле

$$\Theta = \frac{t' - t_0}{t} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где t' и t_0 , с – время оседания порошка в активированной и неактивированной жидкости до одного и того же значения мутности (реперного значения шкалы гальванометра).

Использование предлагаемого метода косвенной оценки эффективности магнитной активации позволит оперативно оценить адекватность применяемых методов и средств и, при необходимости, произвести направленные регулировки

процесса.

В [1, 3, 16, 17] приведены результаты исследований по изменению свойств бензина в результате его магнитной активации. При этом зафиксировано снижение расхода топлива около 10% и снижение в выхлопных газах количества окислов углерода и азота – более 12%.

Расчеты по приведенной здесь методике оценки изменения теплотворной способности бензина АИ-92 в зависимости от глубины активации показывают, что суммарная теплота его сгорания может теоретически повышаться от 7% до 28%. Полагаем, что рациональная глубина активации должна обеспечивать повышение теплоты сгорания до значений, не создающих опасности ухудшения тепловых и трибологических режимов ТД.

Заключение. Основной задачей обеспечения процесса магнитной активации немагнитных жидкостей, в том числе углеводородных топлив, является назначение и реализация магнитотропных параметров активатора, адекватных поставленной цели, – улучшению эксплуатационных (потребительских) свойств веществ. В соответствии с изложенной методикой этапами решения задачи являются:

- 1) констатация химической формулы основной активируемой жидкости;
- 2) качественный и количественный анализ допускаемых примесей по ГОСТ на жидкость;
- 3) определение видов межмолекулярных и внутримолекулярных связей;
- 4) расчет энергетических характеристик связей;
- 5) определение основных показателей потока активируемой жидкости – удельный расход, скорость потока, ориентация относительно силовых линий МП;
- 6) подбор магнитов с необходимой плотностью энергии магнитного поля;
- 7) выбор конструктивной схемы магнитного активатора, характеристики которого обеспечат разрыв межмолекулярных и внутримолекулярных связей;
- 8) определение способа косвенной оценки эффективности активации;
- 9) проведение лабораторных и эксплуатационных испытаний активатора с корректированием его расчетных магнитотропных параметров.

Литература

1. Щурин К.В., Панин И.Г. Изменение свойств немагнитных жидкостей в переменном магнитном поле // «Информационно-технологический вестник». 2017. № 1. С. 103-114.
2. Мельников Г.А. [и др.]. Структурные свойства конденсированных сред в рамках кластерной модели. Ученые записки // Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2011. № 4(20). С. 1-6.
3. Манаков Н.А., Щурин К.В., Цветкова Е.В. Улучшение эксплуатационных показателей автомобильных двигателей в результате магнитной активации топлива // Естественные и технические науки. 2012. № 2. С. 484-486.
4. Помазкин В.А. Неспецифические воздействия физических факторов на объекты биотехносферы: монография. Оренбург: ОГУ, 2001. 340 с.

5. Василевский А.В. Способ улучшения пусковых качеств дизельных двигателей в условиях низких температур посредством ультразвуковой кавитационной обработки дизельного топлива. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рязань: Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище имени В.Ф. Маргелова (военный институт), 2012. 18 с.
6. Лоскутова Ю.В. Влияние магнитного поля на реологические свойства нефтей: Дис. ... канд. хим. наук: 02.00.13. Томск: РГБ ОД, 61:04-2/441. 2003. 138 с.
7. Пивоварова Н.А. Интенсификация процессов переработки углеводородного сырья воздействием постоянного магнитного поля: Дис. ... докт. техн. наук: 05.17.07. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2005. 361 с.
8. Классен В.И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1982. 296 с.
9. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Выпуск 7. Физика сплошных сред. Перевод Я. Смородинский, А. Ефремов, Ю. Симонов. М.: Либроком Едиториал УРСС, 2013. 288 с.
10. Левич В.Г. Об одном сенсационном эффекте // Успехи физических наук. 1966. Том 88, вып. 4. С. 787-788.
11. Степин Б.Д., Цветков А.А. Неорганическая химия: учебник для хим. и химико-технол. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1994. 608 с.
12. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Справочник по неорганической химии. Константы неорганических веществ: справочное пособие. М.: Химия, 1987. 320 с.
13. Аликберова Л.Ю., Савинкина Е.В., Давыдова М.Н. Основы строения вещества: методическое пособие кафедры неорганической химии МИТХТ им. М.В. Ломоносова. М.: 2004 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.alhimik.ru/stroenie/titul.htm>.
14. Каплан И.Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 312 с.
15. Гурвич Л.В. и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М.: Наука, 1974. 354 с.
16. Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Метелев А.А. Влияние электромагнитного воздействия на показатели топлива и характеристики автомобильных двигателей внутреннего сгорания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2(171). С. 61-67.
17. Щурин К.В., Цветкова Е.В. Изменение физико-химических свойств жидких сред методом магнитной активации // Вестник ОГУ. 2011. № 10(129). С. 199-204.

УДК 621.822.116

Углерод-углеродный композит как перспективный материал для узлов трения навесного технологического оборудования

В.Ю. Прохоров, кандидат технических наук,
доцент, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,

С.В. Фролов, кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой механики и инженерной графики,

В.В. Абразумов, доктор технических наук,
профессор кафедры механики и инженерной графики,

О.В. Токарева, доцент кафедры механики и инженерной графики,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Академия государственной противопожарной службы
МЧС России» (АГПС), г. Москва

Непрерывно повышающиеся требования к эксплуатационным свойствам конструкционных и смазочных материалов, которые применяются в узлах трения, не могут быть удовлетворены с помощью известных ранее способов подготовки поверхностей деталей узлов трения и существующих методов модификации смазочных материалов. Это заставляет изыскивать новые, более совершенные материалы и методы борьбы с изнашиванием с целью увеличения долговечности узлов трения машин и механизмов.

Смазочный материал, подшипник скольжения, трение, изнашивание.

Carbon-carbon composite material as import-substituted for friction units of mounted technological equipment

V.Y. Prokhorov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Senior Lecturer, Department of Mechanics and Engineering Graphics,

S.V. Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

V.V. Abrazumov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

O.V. Tokareva, Associate Professor of the Department of Mechanics
and Engineering Graphics,

Federal State Budgetary Educational Institution Higher education
«Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia», Moscow

Continuously increasing requirements for the performance properties of structural and lubricating materials, which are used in friction units, can not be satisfied with the previously known methods of preparation of surfaces of friction parts and existing methods of modification of lubricants. This makes it necessary to find new, more advanced materials and methods to combat wear in order to increase the durability of friction units of machines and mechanisms.

Lubricant, sliding bearing, friction, wear.

Ежегодно в Российской Федерации списывается огромное количество техники. В леспромхозах и лесхозах за пределами нормативных сроков эксплуатируется 60-80% всего тракторного парка. Следует отметить, что аналогичные тенденции по тракторам других заводов-изготовителей есть и в других отраслях экономики Российской Федерации. Основные причины данной ситуации – отсутствие средств на приобретение, как самой техники, так и запасных частей. Поэтому техника поддерживается в работоспособном состоянии за счет ее разукomплектования. По данным Гостехнадзора, за пять последних лет объем разукomплектования увеличился на 20%. Мониторинг состояния тракторов в ряде регионов лесного, агропромышленного комплекса свидетельствует о том, что количество списанных тракторов значительно превышает количество поставок. И тем самым в виду старения техники снижается их коэффициент технической готовности [1].

Только ежегодные затраты на техническое обслуживание и ремонт машин составляют около 8% стоимости валовой продукции в отраслях. Примерно 50% этих затрат – стоимость запасных частей, 38-42% от всех затрат на техническое обслуживание и ремонт тракторов приходится на устранение последствий отказов и текущий ремонт. Поэтому приоритетным направлением повышения конкурентоспособности тракторов является повышение безотказности и проведение модернизации техники [2].

По данным отчетов Alto Consulting group, объем поставок лесозаготовительной техники по кодам ТН ВЭД, импортируемым в Россию в 2020 году составил 405 наименований техники на общую сумму 42 793 515,42 долларов США. В тоже время отправленная на экспорт из России составляет 14 наименований техники на общую сумму 275 708,81 долларов США.

Такой перекоп по импорту новой техники может привести к негативным последствиям с учетом текущей геополитической и экономической ситуации в мире, в том числе после принятых санкций в отношении Российской Федерации, изменений импортных и экспортных поставок как техники, так и запасных частей и заставляет интенсифицировать исследования по поиску импортозамещающих материалов в данной области.

Слабым звеном в конструкции манипуляторов являются шарнирные соединения, определяющие ресурс и предельное состояние технологического оборудования. Шарнирные соединения манипуляторов при наработке до 2000 моточасов, как правило, выходят из строя, в то время как рабочий ресурс металлоконструкций манипуляторов до капитального ремонта трактора должен составлять 4500-5000 моточасов. Отсюда видно, что вопрос повышения износостойкости шарнирных соединений манипуляторов является крайне актуальным.

Проблема повышения надежности и долговечности узлов трения навесного оборудования технологических и транспортных машин сложна и требует всестороннего научно-практического исследования, базис которого составляют работы известных ученых: Д.Н. Гаркунова, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, В.В. Курчаткина, М.Н. Ерохина, В.П. Лялякина, А.Н. Раевского, В.В. Стрельцова, Н.Ф. Тельнова, М.М. Хрущева и ряда других.

В настоящее время существует ряд принципиально важных подходов к решению задачи повышения надежности подшипников, работающих в условиях воздействия абразивной среды и при значительных удельных нагрузках.

Основными направлениями в борьбе с износом в машиностроении является увеличение твердости трущихся сопрягаемых поверхностей деталей путем азотирования, хромирования, цементирования, цианирования, поверхностной закалки, применение нанотехнологий и наноматериалов [3]. Такие вопросы актуальны еще и потому, что поиск и создание новых конструкционных материалов требуют больших финансовых вложений, и процесс этот может растянуться на 8-10 лет [4].

Как известно, ресурс деталей и агрегатов от износа может быть значительно увеличен с помощью специальных нанопокровтий и эмульсий. Повышенное внимание уделяется наноалмазным композиционным покрытиям [5]. Поэтому задача повышения ресурса деталей машин, оборудования и инструмента за счет нанесения на них многофункциональных покрытий, в том числе нанокомпозитных, является очень важной [6].

Компания ЗАО «Новомет-Пермь» разработала проект по использованию в узлах трения защитных и функциональных наноструктурированных покрытий на основе карбида вольфрама с применением оксида титана, оксида алюминия, хрома и молибдена [7]. Процесс нанесения покрытия проходит по технологии газоплазменного напыления, а размер зерен в структуре покрытий лежит в диапазоне 5-100 нанометров. Это позволяет снизить коэффициент трения радиальных подшипников в 1,4-1,7 раза, а также увеличить их износостойкость в 1,5-2 раза, повысить коррозионную и гидроабразивную стойкость различных деталей.

Немецкая компания PlasmaChem GmbH разработала метод, за счет специальных добавок существенно повышающий прочность различных гальванических покрытий, в том числе хромовых. Наилучшие результаты были достигнуты при добавлении в электролиты алмазных наночастиц, полученных детонационным синтезом [8].

ООО «НаноУглеродные материалы» разработало углеродный наноструктурированный материал ART-NANO [6]. Использование добавок из такого материала при химико-гальванической обработке деталей позволяет: снизить толщину покрытий, получить ультратонкие покрытия с сохранением функциональных свойств при содержании наноуглерода в покрытии от 0,005 до 0,1 массы %; снизить пористость и увеличить коррозионную устойчивость в 3-6 раза; снизить коэффициент «сухого трения» для износостойких покрытий хрома в 2-3,5 раза, а износ в 3-5 раз; снизить внутренние напряжения и исключить растрескивание композиционных покрытий.

Анализ конструкции шарнирных соединений навесного оборудования лесохозяйственной, дорожно-строительной (скреперы, бульдозеры, экскаваторы, трубоукладчики и т.п.), погрузочно-разгрузочной техники, техники для использования в чрезвычайных ситуациях показал, что для их изготовления традиционно применяются пары трения «сталь по бронзе» и «сталь по стали» периодически используя смазку. Детали шарнирных соединений технологического оборудова-

ния функционируют как правило в тяжелых нагрузочных режимах. Они работают при максимальных углах поворота до 130° и удельных нагрузках на поверхности трения до 100 МПа. Кроме того эта специфика работ вызывает динамические и вибрационные нагрузки, что снижает долговечность пар трения. Характерной особенностью работы таких шарнирных соединений является малые скорости скольжения (0,005 ... 0,35 м/с), а также изменение величины скорости скольжения в течение цикла возвратно-вращательного движения [3].

Противозадирные и противоизносные свойства смазок в значительной степени зависят от сочетания конструкционных материалов в узле трения [7]. Проведенный анализ указывает на то, что в паре со сталью 45 (HRC ~ 40) при смазке солидолом несущая способность бронз очень зависит от их состава (рис. 1).

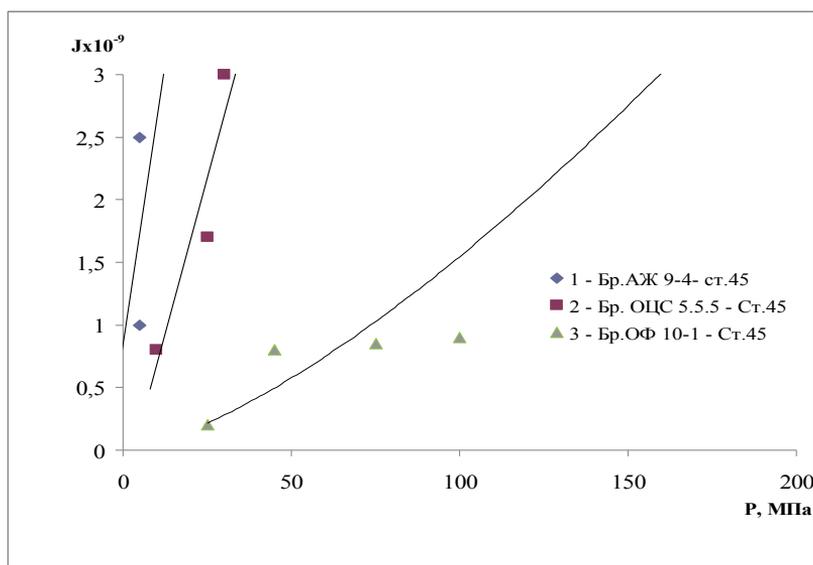


Рисунок 1 – Динамика изменения интенсивности изнашивания разных бронз в паре со сталью 45 (смазка – солидол С)

Анализ нагруженности шарнирных сопряжений показывает, что удельные нагрузки представляют собой усредненную величину и не отражают действительную картину распределений в зоне контакта. Шарнирные соединения машин часто работают за пределами допустимых нагрузок, что является одной из причин их низкой износостойкости.

Критическими нагрузками считались такие, при которых имело место схватывания, либо износ образцов превышал величины $J = 7 \times 10^{-9}$ (рис. 1).

Критические нагрузки трения на пару бронза – сталь зависят также от выбранной марки стали, её термо- и физико-химической обработки. Так, при смазке солидолом бронза ОЦС5-5-5 (ГОСТ 613-79) в паре со сталью 45 (ГОСТ 1050-2013) имеет диапазон работы до 7,5 МПа, в то время, как та же бронза работает со сталями 20Х (ГОСТ 4543-2016) (нитроцементированная) и сталь 20 (ГОСТ 1050-2013) (цементированная) вплоть до 40МПа (табл. 1) [7].

Таблица 1 – Критические нагрузки для бронзы ОЦС5-5-5, работающей в паре с разными сталями (смазка солидол С)

Пара трения	Критическая нагрузка $R_{кр}$
БрОЦС5-5-5 – Сталь 45	7,5 МПа
БрОЦС5-5-5 – Сталь 45 (закалка в том числе)	10,0 МПа
БрОЦС5-5-5 – Сталь 20Х (цементированная)	10,0 МПа
БрОЦС5-5-5 – Сталь 20Х (нитроцементированная)	> 40,0 МПа
БрОЦС5-5-5 – Сталь 20 (цементированная)	> 40,0 МПа

Несущая способность пар трения сталь-сталь также зависит от выбранных марок стали, термо- и физико-химической обработки. Наилучшие результаты из рассмотренных пар показали сочетание сталь 20Х (цементированная) по стали 20Х (нитроцементированная) и сталь 20Х (цементированная) по стали 20 (цементированная), критические нагрузки для которых превышают 40,0 МПа. (табл. 2).

Таблица 2 – Критические нагрузки для стали 45 (закалённая, $HRC 40 \pm 5$), работающей в паре с разными сталями (смазка солидол С)

Пара трения	Критическая нагрузка $R_{кр}$
Сталь 45 – Сталь 40Х	2,5 МПа
Сталь 45 – Сталь 20 (цементированная)	10,0 МПа
Сталь 45 – Сталь 20Х (цементированная)	10,0 МПа
Сталь 45 – Сталь 40Х (в том числе)	10,0 МПа
Сталь 45 – Сталь 20Х (нитроцементированная)	35,0 МПа

При конструировании узлов трения следует учитывать соотношение путей трения сопряженных деталей. У «обратных пар» (менее твердая деталь имеет больший путь трения) несущая способность выше, чем у «прямых пар» (более твердая деталь имеет больший путь трения). Например, несущая способность у стали 45, трущейся по стали 20Х (нитроцементированная) больше, чем у стали 20Х (нитроцементированная), трущейся по стали 45 (рис. 2) [7].

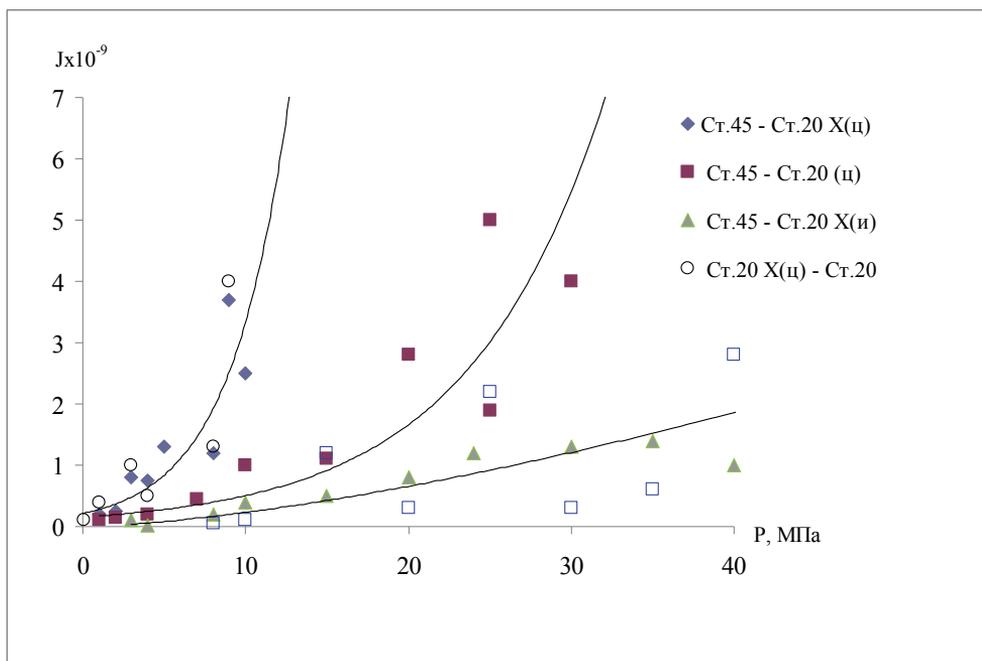


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности износа разных сочетаний сталей (смазка – солидол С)

Графики изменения интенсивности линейного износа стали 45 в зависимости от удельной нагрузки для различных смазочных материалов, аппроксимированные в виде степенной зависимости, представлены на рисунке 3 [8]. Из графиков видно, что по противоположным свойствам для исследуемой пары трения Сталь 45 – Сталь 20X (нитроцементированная) смазки можно расположить в следующем порядке (в порядке ухудшения свойств): ВНИИНП-285; Солидол С + 10% меди; Литол-24; ВНИИНП-242; ЦИАТИМ-201 + 10% меди; Униол-1; ЦИАТИМ-201; Солидол С. Указанный порядок соответствует только данному сочетанию конструкционных материалов.

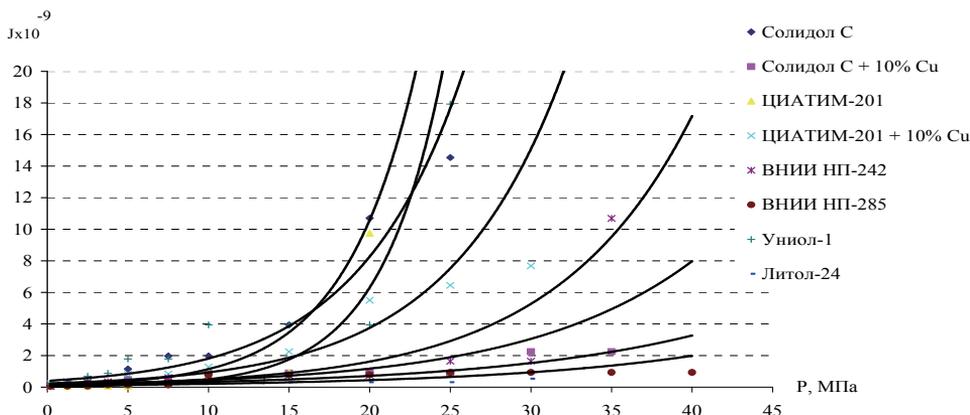


Рисунок 3 – Зависимости изменения интенсивности линейного износа Сталь 45 – Сталь 20X (нитроцементированная) в зависимости от удельной нагрузки для разных смазочных материалов

Выход из строя образцов вследствие задира, схватывания, как и износ носит случайный характер. Эти процессы зависят от большого числа случайных факторов: шероховатости поверхности, вязкости и других свойств смазки, физико-химического состояния поверхности, твердости и т.д., которые ограничены пределами соответствующих стандартов и технических условий. Поэтому, следует ожидать большое рассеяние экспериментальных данных. Нагрузки, при которых наблюдались первые следы схватывания образцов при работе с разными смазками представлены в таблице 3.

Наличие трех образцов для каждой смазки не позволяет построить закон распределения отказов, вследствие схватывания и вычислить на более вероятное значение удельной нагрузки схватывания.

Для расчёта потерь на трение в узлах необходимо знание коэффициента трения для определённого сочетания материалов и смазки. Значения коэффициента трения в зависимости от удельной нагрузки для различных смазок для исследуемой пары трения Сталь 45 – Сталь 20X (нитроцементированная) находились в пределах от 0,05 до 0,15. Величина и характер изменения коэффициента трения указывает на граничный режим трения, реализующийся при данных испытаниях.

Интенсификация рабочих режимов машин и оборудования, вызванная увеличением производительности и мощности, повышение требований надёжности машин в настоящее время привело к необходимости замены в узлах трения традиционной смазки солидол синтетический ГОСТ 4366-76 на более качественные смазки, обладающие повышенными противозадирными и противоизносными свойствами, способных поддерживать положительный градиент механических свойств.

За последние 10-15 лет в стране, кроме более 300 наименований отечественных пластичных смазок (ПС), на рынке появилось большое число смазок зарубежных фирм. Появляются различные модификации известных отечественных

марок, о качестве которых можно судить только по рекламным проспектам.

Таблица 3 – Выход из строя исследуемых образцов в зависимости от нагрузки и вида смазки

На- груз- ка, МПа	Смазка							
	Соли- дол С	Соли- дол С + 10% Cu	ЦИА- ТИМ - 201	ЦИАТИМ -201 + 10% Cu	ВНИ- ИНП - 242	ВНИ- ИНП - 285	Уни- ол -1	Ли- тол -24
5,0	●	●						
10,0	●		●			●		
15,0	●				●			●
20,0				●			●	
25,0			●	●			● ●	
30,0								
35,0				●	●			●
40,0		● ● ●	●		●	● ●		●

Чтобы из многообразия предлагаемых марок выбрать смазку, способную обеспечить длительную и надежную работу узла трения, необходимы данные об ее эффективности в условиях, имитирующих режим работы данного узла трения. При подборе оптимальной пластичной смазки для подшипников качения и скольжения, а так же других узлов трения, должны быть учтены особенности конструктивного исполнения узла, условия трения и влияние окружающей среды [8].

В последние десятилетия на предприятиях появляются импортные машины, станки и оборудование, разнообразные механизмы, в которых используются зарубежные пластичные смазки неизвестного состава. Иностранные фирмы высоко ценят работы по созданию и проверочным испытаниям пластичных смазок для выпускаемых ими машин и механизмов, так как это составляет значительную часть ноу-хау выпускаемой продукции и позволяет дополнительно зарабатывать при ее эксплуатации у потребителя [9]. При покупке зарубежной техники необходимо проведение консультаций с отечественными специалистами по смазочным материалам о возможности замены или воспроизводства масел и смазок для всех узлов трения. Часто выгоднее, оговорив получение вместе с техникой небольшого количества смазки, организовать расшифровку ее состава. По результатам расшифровки принимается решение о создании или подборе из числа существующих смазок. Такой путь достаточно продолжительный, но дешевле и надежнее, чем регулярные приезды представителей фирмы-изготовителя техники

для пополнения ПС. Кроме того, следует учитывать, что фирма может через 5-7 лет прекратить производство данной конкретной смазки, а в санкционных условиях и вообще прекратить поставки.

Работу конструктора и механика по выбору смазки на первом этапе упрощает классификация пластичных смазок, определяющая вид техники, вид трения, основное назначение и условия функционирования выбираемого смазочного материала [9]. Такая классификация смазок с самого начала предопределяет исключение из рассматриваемого ассортимента марок, не соответствующих общим требованиям данного вида техники и условиям его эксплуатации.

Лесохозяйственная, дорожно-строительная (скреперы, бульдозеры, экскаваторы, трубоукладчики и т.п.), погрузочно-разгрузочная и техника для использования в чрезвычайных ситуациях практически круглосуточно находится под открытым небом и работает при значительном запылении и обводнении большей части узлов трения. Оборудование, расположенное на открытых площадках, транспортное оборудование и приспособления ручного использования могут эксплуатироваться при температуре ± 50 °С и более. Осенне-весенний период работы сопровождается обильным попаданием воды и грязи в узлы управления и передвижения. Смазки для этой техники должны быть влагоустойчивыми, с повышенными защитными свойствами. В таблице 4 представлены некоторые виды смазок, применяемые в настоящее время в технике.

Таблица 4 – Смазки, применяемые в дорожно-строительной, лесозаготовительной, сельскохозяйственной и другой технике

Смазка	Назначение	Рабочая температура, °С	
БНЗ-3	Бульдозеры	-30	100
Графитная УСсА	Трактора, автомобили, дорожные машины	-10	70
Литол-24	Колесная, гусеничная техника	-40	120 (130)
№ 158	Автотракторная техника	-30 (40)	90 (120)
Пресс-солидол Ж	Транспортные средства, сельхозтехника	-30	60 (70)
Пресс-солидол С	Транспортные средства, лесозаготовительная техника, сельхозтехника	-30	60
Солидол Ж	Транспортные средства, сельхозтехника	-30	60 (70)
Солидол С	Транспортные средства, лесозаготовительная техника, сельхозтехника	-30	60
Униол 2М/1	Автотракторная техника, сельскохозяйственная, лесозаготовительная	-40	150 (160)
ЦИАТИМ-208	Гусеничная техника	-30	100 (120)
ШРБ-4	Автомобили	-30	130

Преобладающее число этой группы машин и механизмов смонтировано на базе автомобилей и тракторов и вопросы выбора оптимальной марки ПС для ходовой части этих машин определяется руководствами по их обслуживанию. Однако краткость смены и пополнений смазки в некоторых случаях требует уточнения сроков в зависимости от назначения машины и основного места работы (заводская территория, шоссе, лес или пашня). Работа по подбору и последующим испытаниям выбранного смазочного материала позволяет экономить в процессе эксплуатации трудозатраты и материалы. Выбор оптимального смазочного материала обеспечивает максимальный ресурс работы узла трения [10].



Рисунок 4 – Втулка финской фирмы ZEDEX 100 в стреле манипулятора СФ85С81 (фото авторов)

Недостаток научно-обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных параметров шарнирных сопряжений и материалов приводит к тому, что для их изготовления предприятие-изготовитель вынужден порой «наощупь» заменять один материал другим. Отмечается, в частности, что замена стали 40Х на

сталь 20Х рекомендовалась после ускоренных испытаний машин на стенде в заводских условиях, что свидетельствует о низкой износостойкости шарнирных узлов лесозаготовительных и прочих машин [1]. Используются и другие варианты – замена втулок подшипникового узла другими материалами (в том числе импортными), например втулка финской фирмы ZEDEX 100, изображенная на рисунке 4, запрессовывается в стрелу манипулятора СФ85С81 на ОАО «Соломбальский МЗ» [11].

Перспективным направлением при модернизации шарнирных сопряжений машин и механизмов является применение новых конструкционных материалов и покрытий, которые обеспечивают при ремонте повышение долговечности отдельных сборочных единиц, а так же машин в целом.

Способы формирования специальных (как правило, гомогенных) покрытий на ответственных деталях, позволяют получить сложный композиционный материал (КМ) с требуемыми свойствами поверхности и сердцевины. К таким материалам можно отнести углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). Эти материалы представляют собой углеродосодержащую или графитовую матрицу, армированную углеродным либо графитовым волокном. Эти матрицы обладают как свойствами монолитного графита, так и свойствами волокнистых КМ. Рациональное применение таких КМ (полимерных, металлических, керамических, углерод-углеродных композитов и др.) позволяет существенно расширить ресурсы работоспособности конструкций, повысить их эффективность и экономичность.

В настоящее время разработан обширный спектр УУКМ материалов, в основном, для защиты конструкций ракетно-космической техники от эрозии. Современные УУКМ обладают высокой термостойкостью и высокими механическими характеристиками (прочность на растяжение материала в зависимости от структуры армирования изменяется от 100 до 1000 МПа).

Изменение степени армирования матрицы (т.е. объемной доли волокон) приводит к пропорциональному изменению свойств композита в зависимости от характеристик используемых волокон, а введение в матрицу одинакового состава равного количества армирующих волокон, которые отличаются по прочности или модулю упругости, изменяет свойства УУКМ пропорционально характеристикам волокон. Кроме того, путем сочетания в одном УУКМ волокон с различными упруго-прочностными свойствами (например, углеродных и органических) можно регулировать свойства материала. Создание полиматричных материалов также является одним из новых и оригинальных направлений регулирования свойств УУКМ [14].

Вопросы применения углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) в качестве подшипника скольжения изучались специалистами МГУЛ и ОАО НПО «Композит». Проведение поисковых исследований совместно с Наносцентром коллективного пользования ГНУ ГОСНИТИ по изучению структуры, пористости, трибологическим характеристикам, износостойкости, коррозионной стойкости показали возможность использования самосмазывающихся УУКМ в технологическом оборудовании машин манипуляторного типа [12, 13, 14].

Одной из важнейших особенностей УУКМ является возможность создавать из них материалы и детали с заранее заданными свойствами. Композицион-

ные материалы содержат матрицу и армирующий наполнитель, причем нагрузку несут армирующие элементы, а матрица передает напряжения наполнителю и придает материалу монолитность.

В качестве армирующих элементов используют волокнистые материалы с высокой прочностью: углеродные, стеклянные и борные волокна, нитевидные кристаллы на основе карбида кремния, оксида алюминия и т.п. В качестве матрицы в УУКМ используют пироуглерод. Насыщение каркасов изделий осуществляется термоградиентным, изотермическим способом из газовой фазы, либо по пековой технологии. Путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композиции можно направленно регулировать прочность, жесткость, рабочие температуры и другие свойства материала. К тому же многообразие упрочнителей и матриц, используемых при создании УУКМ, дает возможность обеспечить необходимые свойства материала [14].

Получение УУКМ с заданными физико-механическими характеристиками имеет ряд особенностей:

- свойства КМ формируются в процессе производства конкретной конструкции;

- процесс проектирования изделия начинается с конструирования самого материала – выбора его компонентов и назначения оптимальных режимов производства;

- без учета особенностей технологии производства нельзя правильно назначить требования к КМ (как к конструкционному материалу) и тем более к самой конструкции;

- главная особенность создания конструкций из КМ, в отличие от традиционных конструкций, заключается в том, что конструирование материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирование самой конструкции – это единый взаимосвязанный процесс, в котором каждая из составляющих не исключает, а дополняет и определяет другую. Триада материал – конструкция – технология неразделима.

Поведение КМ под действием различных нагрузок определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. В КМ высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения, возникающие в композиции при действии внешних нагрузок, и обеспечивают жесткость и прочность в направлении ориентации волокон.

В качестве армирующего материала наибольшее применение нашли углеграфитовые волокна, нити, жгуты и пряжа. Типовым материалом для матриц служат смолы (фенольные, фурановые, эпоксидные и др.) и каменноугольный пек – продукт крекинга угля.

В настоящее время УУКМ получают в основном тремя способами:

1. многократной пропиткой каменноугольным пеком волокнистого каркаса с последующей карбонизацией;
2. осаждением углерода из газовой фазы между волокнами каркаса;
3. сочетанием пропитки каменноугольным пеком и карбонизации с осаждением углерода из газовой фазы.

На первом этапе идет формирование начальных элементов – связующего и наполнителя. Из углеродных наполнителей методами плетения, ткачества,

сшивки-прошивки, запрессовки изготавливают армирующие каркасы различной структуры (двумерной, трехмерной, пятимерной и т.д.) и формы (плоская, цилиндрическая, коническая и т.д.)

Далее по способу 1:

- насыщение армирующего каркаса (или наполнителя) связующим составом. При использовании органических смол пропитка осуществляется либо на пропиточной машине (тканевый наполнитель), либо вакуумно-автоклавным способом (каркас из нити или сшитой ткани). Пропитка каркаса расплавленными пеками обычно производится как в автоклавах при невысоком давлении ($P < 3$ МПа), так и в специальных установках при высоком давлении (сотни мегапаскалей) и температуре 250-500 °С. При использовании органических смол пропитанный каркас подвергается термообработке с постепенным подъемом температуры под давлением;

- обжиг (карбонизацию) пропитанных или отвержденных (в случае применения смол) заготовок при температуре 1200 °С, обеспечивающий деструкцию смоляной или пековой матрицы и переход ее в твердую углеродную матрицу (кокс). На этой стадии в процессе перехода матрицы из вязкотекучего состояния (пек) и твердого состояния (отвержденный полимер) в твердую углеродную матрицу происходят выделение летучих продуктов пиролиза, образование закрытой пористости, усадка в интервале температур 600...850 °С, иногда даже с деформацией углеродного наполнителя (нить, ткань), и образованием открытой пористости. В процессе усадки матрицы может нарушаться адгезионная связь между наполнителем и матрицей, что в принципе ведет к снижению механических характеристик композиционного материала. Карбонизация проводится в инертной или восстановительной атмосфере.

При получении УУКМ характерным является относительно высокая пористость углеродной матрицы, а также наличие трещин. Трещины в матрице образуются в процессе низкотемпературного обжига из-за высоких термических напряжений. Для устранения пористости цикл пропитка – карбонизация повторяют несколько раз. Многократная пропитка и карбонизация улучшают механические свойства, повышают плотность получаемого материала.

Для получения более плотного и термостабильного материала после карбонизации может проводиться термообработка при более высоких температурах (до $T = 2800$ °С), называемая также графитацией. При термообработке такого типа преодолеваются энергетические барьеры, препятствующие перемещению многоядерных соединений, их присоединению и взаимной переориентации с большей степенью уплотнения, удаляются гетероатомы, химически связанные с углеродом или образующие соединения внедрения.

Проведенные исследования, а также технологическая отработка изготовления углеродных композиционных материалов подтверждают, что способом жидкофазной пропитки пеками (или синтетическими смолами) углеродных волоконистых структур с последующей высокотемпературной обработкой обеспечивается получение УУКМ с требуемыми (и регулируемыми в широком диапазоне) теплофизическими свойствами, плотностью, прочностью и другими экс-

плуатационными характеристиками.

Высокие и стабильные механические свойства, износостойкость и прочие свойства композиционного материала реализуются в полной мере только при оптимальных условиях его формирования, т.е. технологии изготовления. Последняя определяет и получение композита с минимальным количеством дефектов (трещин, раковин, пор).

Способ 2 перспективен, поскольку позволяет создавать материалы любой архитектуры с любыми наперед заданными свойствами при этом даже послойно. Таким образом, полученный УУКМ в виде блока с определенной плотностью, жесткостью и подобными характеристиками, является полуфабрикатом, который может быть переработан в деталь методами механической обработки. Каркас, через который проходит газ, располагается на оправке, нагреваемой индуктором. Таким образом, самая горячая часть каркаса находится на его внутренней поверхности, которая непосредственно контактирует с оправкой. Наружная поверхность каркаса подвержена воздействию более холодной среды, в результате чего возникает перепад температуры по толщине каркаса. Однако коркообразования не происходит, потому что степень осаждения пироуглерода выше на нагретых волокнах вблизи оправки, в то время как на более холодных волокнах либо степень осаждения ниже, либо оно совсем не происходит. При соответствующих условиях пироуглерод осаждается на внутренней поверхности, и этот процесс распространяется радиально через каркас, уплотняя его. Прохождение газа через каркас и осаждение пироуглерода осуществляются при атмосферном давлении и температуре оправки 1100 °С. При процессе с перепадом температуры довольно сложно получить постоянный слой пироуглерода из-за трудной воспроизводимости одинаковых условий осаждения. Продолжительность данного процесса примерно в два раза меньше, чем изотермического процесса.

По 1 и 2 способу нагрев армирующего каркаса осуществляется индуктором. При этом по способу 2 каркас и газ подвергаются нагреву при постоянной температуре. Осаждение пироуглерода происходит при температуре 1100 °С и давлении 6650 Па, расход газа определяется площадью поверхности каркаса. Изотермический процесс проводится с целью получения относительно постоянного слоя пироуглерода по толщине каркаса. При этом способе на наружных поверхностях каркаса образуется корка, препятствующая прохождению процесса осаждения пироуглерода внутри каркаса и получению материала с малым разбросом свойств.

В общем случае УУКМ, полученные вторым способом, имеют большую плотность, более высокое содержание углерода, лучшие характеристики сцепления волокна с матрицей, но и большую стоимость, чем УУКМ, полученные пропиткой.

Значимым фактором при работе УУКМ в качестве подшипника скольжения при возвратно-вращательном движении вала является направление армирования УУКМ.

Эксперименты проводились с целью определения трибологических характеристик УУКМ в зависимости от:

- направления армирования УУКМ;
- конечной температуры термообработки УУКМ;
- конечной плотности УУКМ.

Исследования УУКМ показали, что в зависимости от ориентации армирующего наполнителя и от конечной температуры обработки трибологические характеристики резко меняются. На зависимости коэффициента трения от ориентации волокна были обнаружены два максимума, один в интервале 45-50 ° и один в интервале 130-135 °. Аналогичное поведение показывает износ. Объясняется это тем, что модуль упругости УУКМ минимальный при 45 ° и 135 °, соответственно сопротивление упругой деформации минимально, а износ и коэффициент трения максимальны.

С повышением плотности УУКМ коэффициент трения уменьшается с 0,84 до 0,39 для случая, когда волокна находятся перпендикулярно плоскости трения и с 0,47 до 0,16 – параллельно плоскости трения. Износ УУКМ также снижается с повышением плотности [1].

С повышением конечной температуры обработки УУКМ (от 1273 до 2873 К) коэффициент трения уменьшается с 0,60 до 0,12, что обусловлено образованием графитообразной структуры.

Анализ физико-механических свойств УУКМ показывает, что он удовлетворяет требованиям, предъявляемым к узлам трения в шарнирных соединениях манипуляторов технологического оборудования. Следует отметить, что испытанные образцы (по 15 образцам на каждое испытание) имели полосу разброса характеристик примерно 8-10%, что свидетельствует о стабильности технологического процесса.

Оценка несущей способности УУКМ в условиях пониженных и повышенных температур показала, что в исследуемом температурном диапазоне (от комнатной до 573 К) прочность материала типа углерод-углерод малочувствительна к температуре.

Наблюдения за износом показали, что заметное увеличение его происходит в течение первых 4-5 часов работы шарнира, достигая своего предельного значения, и далее стабилизируется и становится практически постоянной.

Для сравнения были испытаны втулки шарниров из бронзы БрОЦС 5-5-5 (ГОСТ 613-79), чугуна СЧ 18-36 (ГОСТ 1412-85), сталь 45 (ГОСТ 1050-88) со смазкой солидол С (ГОСТ 436В-76), металлофторопласт [14]. Проведение сравнительных и стендовых испытаний осуществлялось по схеме возвратно-вращательного движения с углом качания 355°. Результаты испытаний на износ втулок шарниров в условиях реверсивно-вращательного движения вала показаны в таблице 5.

Из таблицы видно, что работоспособной при принятых условиях является только втулка, которая имела УУКМ, запрессованный в металлическую обойму. Шарнир данной втулки проработал 250 часов с низким (0.04-0.06) коэффициентом трения и не имел практически износа. Сравнимые материалы работали в сопряжении «вал-втулка» при нагрузке 30 МПа в среднем 20-30 минут. Эти материалы быстро изнашиваются вследствие схватывания и задира с поверхностью

контртела.

Следует отметить, что непрерывный рост нагрузок, скоростей и температуры, усложнение условий эксплуатации узлов трения требуют постоянного улучшения свойств антифрикционных материалов.

Таблица 5 – Результаты испытаний на износ втулок шарниров в условиях реверсивно-вращательного движения вала

Материал втулки	Удельная нагрузка, МПа	Время работы узла трения	Коэффициент трения	Износ, мм
УУКМ, запрессованный в металлическую обойму	62,5	250 часов	0,04–0,06	–
Металлофторопласт	62,5	20–30 мин.	0,03 – 0,1	Обнаружены следы разрушения поверхностного слоя втулки
Чугун СЧ 18–36, (смазка солидол С)	5,0	50 часов	0,03 – 0,05	0,1 схватывание поверхностей
	30,0	10–12 мин.	0,05 – 0,34	0,12 – 0,2 схватывание поверхностей
	62,5	Заклинивание и разрушение втулки		
Сталь 45 (смазка солидол С)	30,0	10 мин.	0,07 – 0,21	0,05 – 0,2 заклинивание и разрушение втулки
	62,5	Заклинивание и разрушение втулки		
Бронза Бр ОЦС 5–5–5	30,0	30 мин.	0,1 – 0,2	0,09 – 0,1
	62,5	Смятие втулки		

В связи с вышесказанным необходима разработка методов по совершенствованию технологии изготовления УУКМ, в том числе обработки на этапе подготовки металлической поверхности, а также создание покрытий, инициирующих режим избирательного переноса материалов при трении путем физической и химической модификации матрицы, например, с участием наполнителей в виде наноразмерных порошков меди [14].

На рисунке 5 представлен общий вид подшипника скольжения. Технология изготовления заготовок для втулок шарнирных сопряжений [15], подлежащих запрессовке, не оказывает влияния на технологию запрессовки УУКМ и может быть оставлена на заводе неизменной. Единственной отличительной механической операцией, необходимой для подготовки втулки под запрессовку, является ее расточка на толщину УУКМ и выполнение особой формы торца внутренней

поверхности. Характер расточки и форма торца являются единственными для всех типоразмеров втулок цилиндрической формы. Базы при механической обработке втулок и запрессовка УУКМ остаются неизменными (рис. 5).

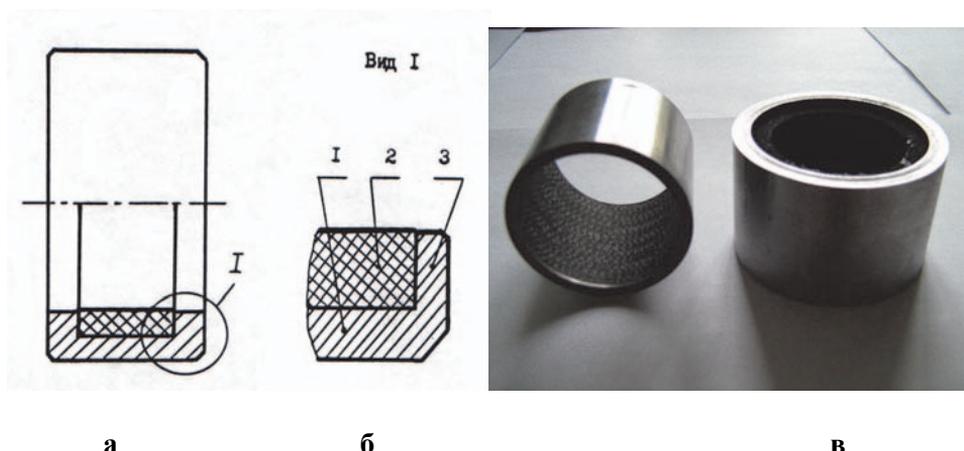


Рисунок 5 – Общий вид втулки шарнирного подшипника скольжения после изготовления (фото авторов): а – основа втулки; б – УУКМ; в – бурт

Материал УУКМ имеет на поверхностном слое открытые поры, микропоры по всей окружности [9], поэтому их заполнение медью электролитическим способом на глубину открытых пор является эффективным. Химический процесс меднения, типовая ванна для нанесения гальванических покрытий представлена в патенте на изобретение [16].

Медь, выдавливаемая из пор УУКМ, выполняет двойную роль. Во-первых, в период приработки материалов не происходит интенсивного износа, во-вторых, проявляется явление избирательного переноса при трении – эффект безызносности.

Многообразие волокон и матричных материалов, а также схем армирования, используемых при создании композитных конструкций, позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры композита, а также воздействием внешних электрических и магнитных полей. Так как при изготовлении изделий из композитов широко используются порошковые материалы и волокна микро- и наномасштабного уровней, появляется возможность изготовления их с помощью технологии 3D-печати, что приведет к значительному удешевлению продукции, улучшению экологической ситуации при практически безотходной технологии (рис. 6).

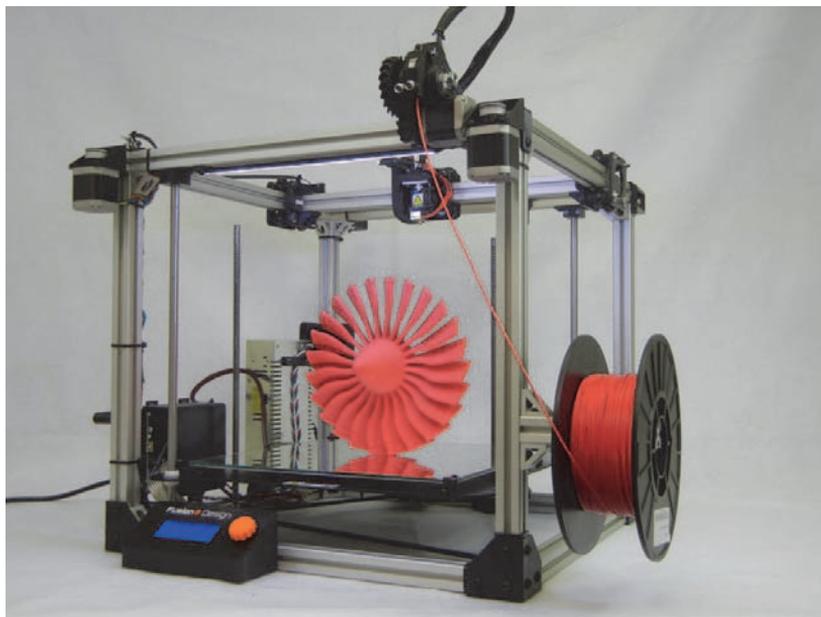


Рисунок 6 – 3D-принтер для промышленных задач

Одна из возможностей технологии 3D печати для промышленных задач – это создание опытных образцов изделий, на которых можно выявить имеющиеся недостатки. Это позволяет в дальнейшем при выпуске готовой продукции избежать тех или иных недочетов и недостатков [17].

Таким образом, представленные характеристики углерод-углеродных композиционных материалов позволяют рассматривать их как перспективные для высоконагруженных узлов трения навесного технологического оборудования транспортных и технологических машин и механизмов.

Литература

1. Быков В.В. Концептуальные и технологические основы системы технического сервиса лесных машин. Дисс... докт. техн. наук: 05.21.01 М., 2005. 300 с.
2. Козырева Л.В. Повышение долговечности подшипников сельскохозяйственной техники применением наноматериалов. Дисс... докт. техн. наук: 05.20.03 М., 2012. 310 с.
3. Прохоров В.Ю., Быков В.В., Окладников Л.В. Повышение долговечности узлов трения навесного оборудования лесных машин. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 5-4(10-4). С. 59-62.
4. Нефтедобывающее оборудование с использованием наноструктурированных покрытий. Каталог проектов ОАО «Роснано» Команда Александра Кондрашова // Проспект выставки «Открытые инновации». Москва, ЦВК Экспоцентр, 2012. М.: ОАО «Роснано», 2012. 3 с.
5. Антипов А., Калачев А. Наноалмазы для улучшенных гальванических покрытий // Наноиндустрия. 2012. № 4. С. 30-31.
6. Углеродные наноматериалы // Проспект ООО «НаноУглеродные материалы»

- на выставке «Открытые инновации». Москва. ЦВК Экспоцентр. 2012. 16 с.
7. Окладников Л.В., Прохоров В.Ю., Синюков Н.В. Исследование влияния сочетания конструкционных материалов на противозадирные и противоизносные свойства смазок // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 139-141.
 8. Окладников Л.В., В.Ю. Прохоров, Синюков Н.В. Исследование противозадирной стойкости пластичных смазок // Сборник научных статей докторантов и аспирантов МГУЛ. Науч. тр. Вып. 376. ФГБОУ ВПО МГУЛ. 2015. С. 53-57.
 9. Прохоров В.Ю. Выбор и исследование противозадирной стойкости отечественных пластичных смазок взамен зарубежным. Труды международного симпозиума «Надежность и качество», г. Пенза (ПГУ). 2019. № 2. С. 50-52.
 10. Белов Ю.А., Часовский В.Н., Якимов П.Л. Ускоренные испытания машин ЛП-18А и ЛП-49 // Лесная промышленность. 1979. № 4. С. 19-20.
 11. Быков В.В., Окладников Л.В., Прохоров В.Ю. Новые материалы и покрытия для узлов трения навесного оборудования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-2 7-2). С. 21-27.
 12. Прохоров В.Ю. Повышение долговечности шарнирных сопряжений лесозаготовительных машин с использованием УУКМ // Сборник научных трудов МГУЛ. 2011. Вып. 356. «Технология и оборудование лесопромышленного производства». С. 20-24.
 13. Лаптев А.В., Прохоров В.Ю. Результаты исследований трибологических характеристик УУКМ для тяжелонагруженных узлов трения машин манипуляторного типа // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2014. № 2-S'. Т. 18. С. 166-168.
 14. Ефремов Е.Е., Прохоров В.Ю. Альтернативный материал шарнирных сопряжений навесного оборудования подьёмно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2018. № 2(4). С. 16-19.
 15. Патент на полезную модель РФ № 144153. Подшипник скольжения / Быков В.В., Найман В.С., Окладников Л.В., Прохоров В.Ю. № 2014110733/11; заявл. 21.03.2014; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22.
 16. Патент на изобретение РФ № 2741972. Способ изготовления подшипника скольжения / Быков В.В., Найман В.С., Прохоров В.Ю., Синюков Н.В., Тащилов С.В. № 2017128358; заявл. 08.08.2017; опуб. 01.02.2021, Бюл. № 4.
 17. Telead.ru Мир новостей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://telead.ru/economy/vozmozhnosti-3d-printera.html> (дата обращения 05.03.2023).

УДК 621.793.74:62-408.64

**Профиль пятна напыления наклонной геометрии
при газотермическом нанесении порошкового покрытия**

М.Е. Соловьев, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры Информационные системы и технологии,
Институт цифровых систем,

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль,

С.С. Кокарев, кандидат физико-математических наук,
директор регионального научно-образовательного центра «Логос», г. Ярославль,

С.Л. Балдаев, кандидат технических наук,
заместитель генерального директора по технологиям,

Л.Х. Балдаев, доктор технических наук, генеральный директор,
ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва, г. Щербинка

Предложена методика расчета профиля пятна напыления материала в процессе газотермического нанесения порошковых покрытий при наклонном расположении оси плазменной свечи относительно плоскости напыления. Решена обратная задача напыления, проведен размерный анзац профиля, описание наклонной геометрии напыления и преобразование нормального профиля в наклонный.

Газотермическоенапыление, профиль сечения, моделирование.

Spott profile of inclined geometry during gas thermal powder coating

M.E. Soloviev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor of the Department of Information Systems and Technologies,
Institute of Digital Systems, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl,

S.S. Kokarev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Director of the Logos Regional Scientific and Educational Center, Yaroslavl,

S.L. Baldaev, Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director,

L.Kh. Baldaev, Doctor of Technical Sciences, General Director,
Technological Systems of Protective Coatings LLC, Moscow, Shcherbinka

A method for calculating the profile of the spray spot of a material in the process of gas-thermal deposition of powder coatings with an inclined position of the axis of the plasma candle relative to the spraying plane is proposed. The inverse problem of deposition is solved, a dimensional ansatz of the profile is carried out, a description of the oblique geometry of the deposition is carried out, and the normal profile is transformed into an oblique one.

Thermal spraying, section profile, modeling.

Введение

Технология газотермического нанесения порошковых покрытий является одной из наиболее широко применяемых для создания на поверхности деталей функциональных покрытий, обладающих многими специальными свойствами [1-5]. Процесс состоит в нанесении на поверхность изделия дисперсного материала высокотемпературным газовым потоком, создаваемым при помощи газофакельной или плазменной свечи в результате многократных проходов рабочей головки аппарата относительно поверхности детали, либо вращения детали относительно неподвижно расположенной, или же двигающейся с постоянной скоростью, рабочей головки.

При однократном проходе плазменной свечи относительно детали на ее поверхности в результате напыления порошка из наплавляемых частиц происходит образование характерного бугорка [6,7], который далее в результате движения головки распылителя трансформируется в валик [8,9]. При повторных проходах головки отдельные валики накладываются друг на друга, в результате чего формируется поверхность покрытия [10,11]. Форма поперечного сечения первичного пятна напыления имеет важное значение, поскольку на ее основе формируется окончательный профиль поверхности покрытия, и свойства покрытия также зависят от взаимодействия материала в смежных слоях.

Общепризнанным является факт оптимальности свойств покрытия по большинству его физически значимых характеристик в том случае, когда ось плазменной свечи расположена нормально к поверхности напыления. Будем называть это обстоятельство технологии напыления *нормальной геометрией*. В случае нормальной геометрии процесса адгезионная прочность напыления, его равномерность и однородность, коэффициент использования материала и ряд других параметров оказывается максимальной, что подтверждено различными экспериментальными исследованиями [1,5].

Между тем, в реальных условиях при обработке не слишком больших деталей с искривленными участками поверхности соблюдение нормальной геометрии процесса напыления бывает технологически нецелесообразным или даже невозможным. В связи с этим, возникает теоретическая задача исследования технологии процесса напыления в условиях *наклонной геометрии*, в которой ось плазменной свечи отклоняется от нормали к обрабатываемой поверхности и в общем случае ориентирована произвольно как по отношению к поверхности, так и по отношению к вектору скорости перемещения свечи вдоль поверхности. Ввиду отсутствия систематических исследований по покрытиям, полученным в условиях наклонной геометрии с одной стороны, и обилию экспериментальных данных по покрытиям в нормальной геометрии с другой, теоретической основой исследования технологии наклонной геометрии могли бы стать некоторые базовые зависимости, взятые непосредственно из экспериментов в нормальной геометрии. В настоящей статье мы ограничиваемся исследованием геометрических свойств профиля пятна покрытия в наклонной геометрии, взяв за основу экспериментальный профиль такого пятна в нормальной геометрии. Задача естественным образом разбивается на ряд подзадач: обратная задача напыления, правильный размерный анзац профиля, описание наклонной геометрии напыления, преобразование нормального профиля в наклонный.

1. Обратная задача напыления

Для адекватного исследования технологии напыления в условиях наклонной геометрии с использованием экспериментальных профилей нормальной геометрии нам потребуется решить следующую предварительную задачу: по заданному (взятому из эксперимента) поперечному профилю пятна напыления в нормальной геометрии отыскать зависимость $j(r)$ эффективной плотности потока материала от радиальной координаты r , отсчитываемой от оси плазменной свечи, на некотором фиксированном расстоянии h от выходного сечения сопла свечи, на котором расположена обрабатываемая плоская поверхность. Следует подчеркнуть, что речь идет не об истинном распределении потока массы порошка в сечении струи, а об его эффективном распределении, которое учитывает изменение физических характеристик частиц порошка при нагревании, вклад газоплазменной струи в формирование условий в области пятна напыления, частичное или полное проплавление области теплового контакта струи и поверхности и т.д. Можно сказать, что эффективная плотность потока материала заменяет реальную плотность потока так, что профиль сечения пятна с реальной плотностью потока получается таким же, как и в случае процесса с эффективной плотностью потока, в котором присутствует единственный физический процесс: насыпание идеального материала при комнатной температуре, который обладает всеми физическими свойствами конечного реального покрытия с мгновенной реальной адгезией при контакте с поверхностью или с уже нанесенным материалом. Именно эффективная плотность определяет конечный геометрический профиль и именно только эту величину, как мы покажем далее, и можно определить непосредственно из экспериментальных данных.

Задачу удобно рассматривать в системе координат, связанной со свечой. Пусть плоскость XU этой системы координат параллельна обрабатываемой поверхности, ось OY антипараллельна вектору скорости \vec{v} свечи, так что в системе отсчета свечи поверхность движется со скоростью v в направлении оси OY (см. рис. 1).

Ось OX , таким образом, становится поперечной координатой профиля $F(x)$ пятна напыления, который и наблюдается в эксперименте. Этот профиль в точке с координатой x получается накоплением материала из различных областей струи, которые небольшой участок пятна проходит в процессе своего перемещения в системе отсчета свечи. Пусть $j(r)$ – осесимметричная эффективная функция плотности потока материала, которая представляет собой объем идеального материала, проходящий через единичную площадку сечения струи в единицу времени. Будем считать, что функция $j(r)$ имеет финитный носитель: она отлична от нуля только в области $0 \leq r \leq R$, при этом носитель $j(r)$ (круг радиуса R) будем называть *кругом действия свечи*. Его радиус отличается от радиуса сопла и является функцией расстояния h от сопла до поверхности, которое мы пока считаем фиксированным. Рассмотрим небольшой участок поверхности площадью $dS = dx dy$, который входит в круг действия имея координату x (см. рис. 1).

Этот участок пройдет со скоростью v хорду круга действия, перпендикулярную оси OX и пересекающую ее в точке x и за общее время $T = 2\sqrt{R^2 - x^2}/v$

накопит некоторый объем материала. Для вычисления этого объема через функцию $j(r)$ напишем закон движения выбранного участка в системе отсчета свечи:

$$y(t) = y_0 + vt = -\sqrt{R^2 - x^2} + vt. \quad (1)$$

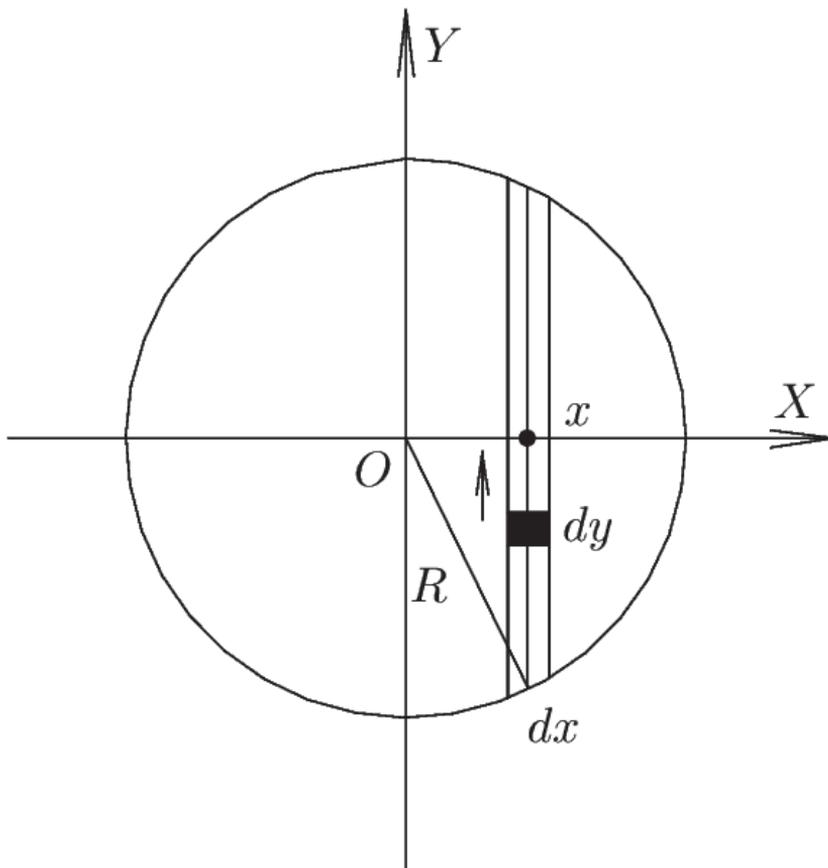


Рисунок 1 – Круг действия свечи накопление материала на элементарной площадке

Тогда в момент времени t на выбранной площадке материал будет поступать с плотностью потока:

$$j(r(t)) = j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}), \quad (2)$$

а за все время прохождения круга действия свечи эта площадка получит объем материала, выражаемый интегралом:

$$dV = \int_0^T j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}) dt dS. \quad (3)$$

Чтобы связать эту величину с экспериментальным профилем пятна покрытия $F(x)$ подсчитаем суммарный объем материала на однопроходной дорожке длины L , приходящийся на полоску шириной dx . С одной стороны:

$$dV = L \cdot F(x) dx, \quad (4)$$

с другой стороны тот же dV получится интегрированием (3) по координате y

$$dV = \int_0^L dy \int_0^T j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}) dt dx = L \cdot \int_0^T j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}) dt dx. \quad (5)$$

Из условия равенства объемов получаем:

$$F(x) = \int_0^T j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}) dt. \quad (6)$$

Таким образом, наблюдаемый профиль теоретически получается как результат некоторого интегрального преобразования функции эффективной осесимметричной плотности. Для приведения этого интегрального преобразования к некоторому более простому каноническому виду перейдем в интеграле (6) к новой переменной интегрирования r :

$$dt = \frac{1}{|r|} dr = \frac{r}{v\sqrt{r^2 - x^2}} dr \Rightarrow F(x) = \frac{2}{v} \int_{|x|}^R \frac{j(r)r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr. \quad (7)$$

Последнее интегральное преобразование функции $j(r)$ в (7) носит название *интегрального преобразования Абеля*. Для отыскания его обращения переписем формулу (7) в виде, в котором интеграл можно дифференцировать по параметру x под знаком интеграла. Для возможности дифференцирования интеграла по параметру под знаком интеграла необходимо, чтобы ядро интегрального преобразования (в нашем случае оно равно $K(x, r) = r/\sqrt{r^2 - x^2}$) было равномерно-непрерывной по x функцией в области интегрирования по r , между тем как это ядро не является даже ограниченной функцией в этой области.

Используя формулу интегрирования по частям, имеем:

$$\int_{|x|}^R \frac{j(r)r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr = \int_{|x|}^R j(r) d\sqrt{r^2 - x^2} = j(r)\sqrt{r^2 - x^2} \Big|_{|x|}^R - \int_{|x|}^R j'(r)\sqrt{r^2 - x^2} dr. \quad (8)$$

Внеинтегральный член на подстановках равен нулю: на верхней в силу $j(R) = 0$ (это соотношение по существу является определением области действия свечи), на нижней – ввиду зануления корня. В итоге получаем эквивалентную (7) формулу вида:

$$F(x) = -\frac{2}{v} \int_{|x|}^R j'(r)\sqrt{r^2 - x^2} dr. \quad (9)$$

Вычислим теперь производную $F'(x)$ с учетом зависимости от x и в нижнем пределе интегрирования (вычисления производим при $x > 0$, что не принципиально, так как функция $F(x)$ – четная):

$$F'(x) = -\frac{2}{v} \frac{d}{dx} \left(\int_x^R j'(r)\sqrt{r^2 - x^2} dr \right) = -\frac{2}{v} \left(-j'(r)\sqrt{r^2 - x^2} \Big|_{r=x} - x \int_x^R \frac{j'(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr \right),$$

откуда очевидно следует:

$$F'(x) = \frac{2x}{v} \int_x^R \frac{j'(r)}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr. \quad (10)$$

Умножим теперь обе части уравнения (10) на x и проинтегрируем их по x в пределах от s до R . В результате получим:

$$\int_s^R \frac{F'(x)}{\sqrt{x^2 - s^2}} dx = \frac{2}{v} \int_x^R \int_s^R \frac{j'(r)x}{\sqrt{r^2 - x^2} \cdot \sqrt{x^2 - s^2}} dx dr. \quad (11)$$

Рассмотрим интеграл стоящий справа, как двойной интеграл по области на плоскости $x - r$. Область интегрирования на этой плоскости показана на рисунке 2: она удовлетворяет системе неравенств:

$$s \leq x \leq R \text{ и } x \leq r \leq R$$

и геометрически представляет собой заштрихованный на рисунке треугольник.

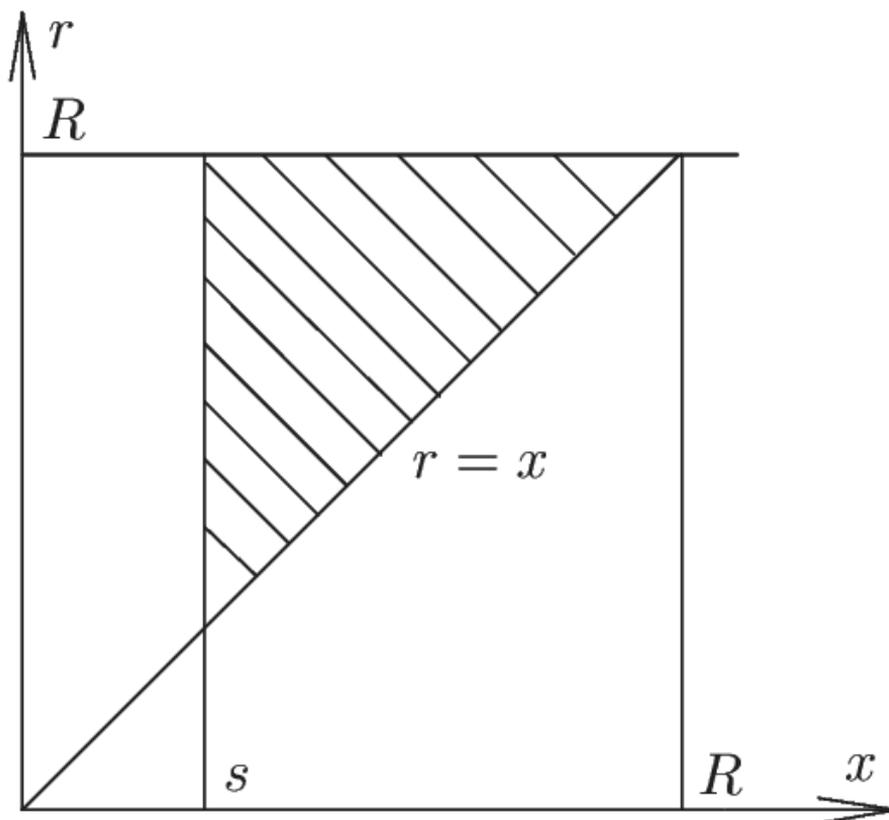


Рисунок 2 – Область интегрирования в двойном интеграле (11)

Выполним интегрирование по этому треугольнику последовательно: сначала по переменной x в пределах от s до r , а потом по переменной r в пределах от s до R . Первое интегрирование не зависит от вида $j'(r)$ и сводится к вычислению интеграла:

$$\int_s^r \frac{xdx}{\sqrt{r^2-x^2}\sqrt{x^2-s^2}}, \tag{12}$$

который, как показывает простое вычисление с помощью замены переменной, не зависит от s и r и равен $\pi/2$. Подставляя этот результат в (11), получаем:

$$\int_s^R \frac{F'(x)}{\sqrt{x^2-s^2}} dx = \frac{\pi}{v} \int_s^R j'(r) dr = \frac{\pi}{v} (j(R) - j(s)) = -\frac{\pi}{v} j(s), \tag{13}$$

откуда получаем окончательный ответ в принятых обозначениях:

$$j(r) = -\frac{v}{\pi} \int_r^R \frac{F'(x)}{\sqrt{x^2-r^2}} dx. \tag{14}$$

Формула (14) и дает общий ответ к обратной задаче напыления: функция эффективной плотности потока материала вычисляется с помощью экспериментальной функции профиля пятна напыления посредством интегрального преоб-

разования ее производной, которое по существу является обращением преобразования Абеля.

В процессе вывода мы считали, что экспериментальный профиль пятна напыления $F(x)$ снимается при фиксированном расстоянии h от плоскости сопла свечи до поверхности напыления. Очевидно, что для задачи наклонной геометрии напыления этого недостаточно, так как сечение газово-плазменной струи плоскостью напыления является наклонным и напыление при этом происходит на участках пятна, расположенных на различных расстояниях от сопла. В этом случае требуется более детальная зависимость профилей пятна $F(x, h)$, которая подразумевает предварительное экспериментальное исследование профилей при различных значениях расстояния h . В связи с нетривиальным характером этой зависимости необходимо сделать одно существенное замечание к формуле (14), а точнее даже к первоначальной формуле (6), из которой она получается. При выводе (6) мы негласно полагали, что эффективная плотность потока не зависит от текущего вертикального положения элементарной площадки, которая движется в системе отсчета свечи. Между тем, ввиду того, что в действительности эффективная плотность потока как и $F(x, h)$ зависит от обеих параметров – поперечного и продольного – т.е. ввиду зависимости $j(x, h)$ скорость напыления материала в действительности зависит от текущей высоты площадки dS . Чтобы учесть это обстоятельство, необходимо добавить в j второй аргумент в форме $h - F$ и написать уравнение (6) в дифференциальной форме. В итоге, получим более точное уравнение роста профиля в виде:

$$\frac{dF(x, h)}{dt} = j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}, h - F). \quad (15)$$

Уравнение (15) является неавтономным нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка, которое в общем виде невозможно исследовать аналитически. В случае $F \ll h$, который и реализуется в практике напыления, правую часть можно разложить в ряд Тейлора по второму аргументу в окрестности h по малому параметру F :

$$\begin{aligned} \frac{dF(x, h)}{dt} = j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}, h) + \frac{\partial j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}, h)}{\partial h} F \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 j(\sqrt{x^2 + y^2(t)}, h)}{\partial h^2} F^2 + \dots \end{aligned} \quad (16)$$

и ограничиться отысканием решений для первых членов разложения. Все предыдущее рассмотрение вплоть до конечной формулы обращения (14) фактически ограничивалось нулевым членом разложения в (16). В нормальной геометрии напыления это корректно по двум причинам: 1) высота профиля как минимум примерно на порядок меньше рабочего расстояния h ; 2) рабочее расстояние h как раз и выбирается из тех соображений, чтобы неоднородность эффективной плотности вдоль продольной координаты была минимальной, таким образом, чтобы вкладом второго слагаемого можно было пренебречь, по сравнению с первым (малость производных $\partial j / \partial h$ на некотором оптимальном расстоянии). В противном случае характеристики покрытия обладали бы неустойчивостью по отноше-

нию к малым неровностям обрабатываемой поверхности. Если ограничиться нулевым приближением, то уравнение (16) сразу интегрируется, что мы и сделали в формуле (6). При этом зависимость от h просто переносится из $F(x, h)$ на $j(x, h)$ как зависимость от дополнительного параметра в интеграле (16). Второе слагаемое в (16) можно учесть либо по теории возмущений:

$$\delta F(x, h) = \int_0^T \frac{\partial j(\sqrt{x^2+y^2(t), h})}{\partial h} F dt, \quad (17)$$

где F – решение, полученное в нулевом приближении, либо даже точно, проинтегрировав линейное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами методом вариации постоянных. Как уже отмечалось выше, в условиях нормальной геометрии напыления учет поправки излишен, но в наклонной геометрии при заметных углах наклона свечи к нормали к поверхности сечение струи поверхностью будет растянуто по продольной координате струи и учет поправок или даже использование точного уравнения будут необходимыми.

2. Процесс напыления в наклонной геометрии

Рассмотрим теперь геометрию наклонного напыления на основе зависимости $F(x, h)$ (или, что удобнее в расчетах, следующей из нее по формуле (14) зависимости $j(x, h)$), полученной из экспериментов с нормальной геометрией. Задачу удобнее ставить и решать, вводя две декартовых системы координат: одна $O'XYZ$ привязана к выходному сечению сопла наклоненной свечи, вторая $Oxyz$ связана с центром пятна напыления на обрабатываемой поверхности (см. рис. 3).

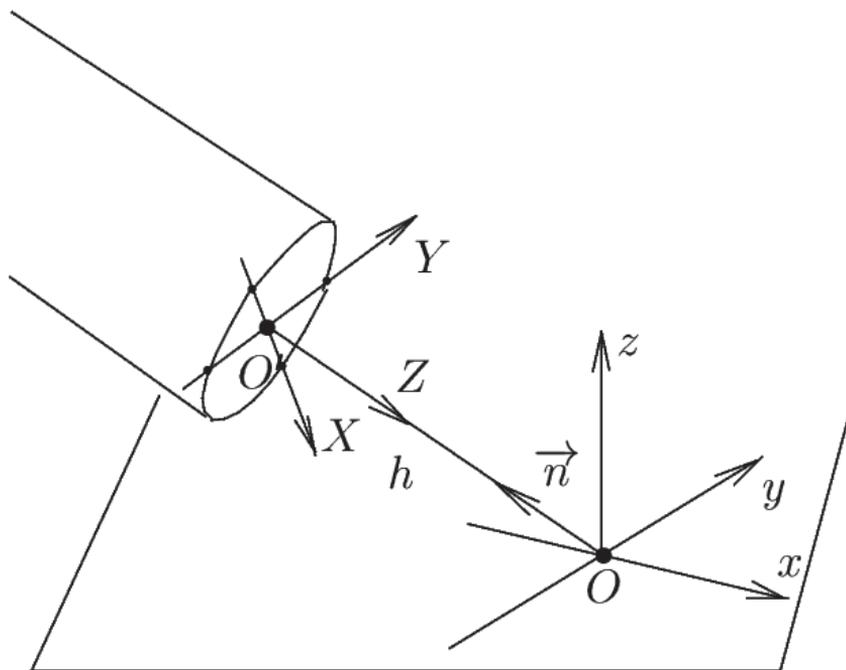


Рисунок 3 – Две системы координат в задаче о наклонном напылении

За счет вращения плоскости $O'XY$ вокруг точки O' ось OY всегда можно выбрать параллельной плоскости напыления, а за счет вращения плоскости Oxy вокруг O ось Oy можно сделать параллельной $O'Y$. При этом направления оси Ox можно согласовать с направлением $O'Z$ так, чтобы их проекции друг на друга были положительными. Обозначим длину отрезка $OO' = h$ и будем считать ее одним из параметров наклонного напыления.

Введем единичный вектор \vec{n} , лежащий на отрезке OO' , который будем называть *вектором ориентации свечи*. Его координаты в системе $Oxyz$ в свете вышесказанного будут иметь вид:

$$n_x = -\sin\theta; n_y = 0; n_z = \cos\theta, \quad (18)$$

где θ – угол между вектором \vec{n} и осью Oz .

Рассмотрим теперь поверхность

$$\Sigma: j(r, Z) = 0, \quad (19)$$

где $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ – полярный радиус в плоскости $O'XY$, жестко связанной с самой свечой. По своему определению поверхность Σ ограничивает область пространства, в котором свеча способна производить напыление идеального материала, свойства которого были описаны в предыдущем разделе. Как это следует из определения (19) и из симметрии функции $j(r, Z)$ эта поверхность представляет собой поверхность вращения вокруг оси $O'Z$ с основанием на выходном сечении сопла, которая простирается на некоторое расстояние вдоль координаты Z и заканчивается при некотором максимальном удалении Z^* от выходного сечения. Наличие конечного значения Z^* в реальности не означает, что материал исчезает при $Z > Z^*$: он продолжает «сыпаться», но, будучи остывшим, теряет способность к образованию адгезионных связей и поэтому за пределами поверхности Σ он дает нулевую эффективную плотность потока напыления. Будем называть объем, заключенный внутри Σ , *областью напыления*. Сечение поверхности Σ плоскостью, проходящей через ось $O'Z$ имеет приблизительный вид, показанный на рисунке 4.

Рабочая область координаты Z в условиях нормальной геометрии расположена в окрестности максимума Z_0 поперечного размера Σ , что обсуждалось в конце предыдущего раздела. Координата Z^* , таким образом, найдется как ближайшее к нулю положительное решение уравнения:

$$j(0, Z^*) = 0. \quad (20)$$

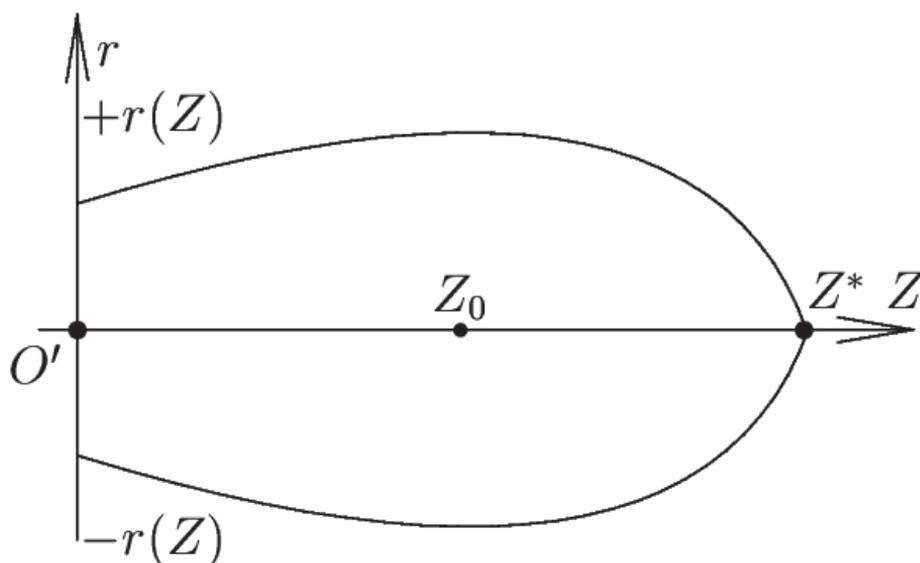


Рисунок 4 – Сечение поверхности Σ плоскостью, проходящей через ось симметрии сопла (ось $O'Z$). Z_0 – точка максимума зависимости $r(Z)$, которая является неявной функцией, определенной уравнением (19)

По теореме о неявной функции уравнение (19) определяет зависимость $r(Z)$, которую, таким образом, можно считать известной на промежутке $[0, Z^*]$.

Найдем теперь уравнение контура пятна напыления на плоскости напыления. Геометрически оно получается как сечение поверхности Σ плоскостью напыления. Пусть $\{\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z\}$ и $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z\}$ – тройки базисных единичных ортов, ассоциированных с системами координат $O'XYZ$ и $Oxyz$ соответственно. Заметим, что в силу нашего специального выбора осей имеют место дополнительные соотношения:

$$\vec{E}_y = \vec{e}_y, \vec{E}_z = -\vec{n}. \quad (21)$$

Векторное уравнение поверхности Σ в системе координат $O'XYZ$ имеет вид:

$$\vec{r}'_{\Sigma} = r(Z)(\cos\phi\vec{E}_x + \sin\phi\vec{E}_y) - Z\vec{n}. \quad (22)$$

Это уравнение можно отнести и к системе координат $Oxyz$, если добавить к нему вектор $h\vec{n}$ положения O' относительно O . В результате получим:

$$\vec{r}_{\Sigma} = r(Z)(\cos\phi\vec{E}_x + \sin\phi\vec{E}_y) + (h - Z)\vec{n}. \quad (23)$$

Для построения кривой пересечения Σ и плоскости напыления (будем обозначать далее эту плоскость Π), необходимо приравнять векторное уравнение (22) векторному уравнению плоскости Π : $\vec{r}_{\Pi} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y$. В итоге для искомого контура $\ell = \Sigma \cap \Pi$ получаем векторное уравнение:

$$\ell: r(Z)(\cos\phi\vec{E}_x + \sin\phi\vec{E}_y) + (h - Z)\vec{n} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y. \quad (24)$$

Для вывода из (24) независимых уравнений необходимо переписать уравнение в одном из базисов – удобнее в качестве него выбрать $\{\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z\}$. Из (18) следует, что

$$\vec{n} = -\sin\theta\vec{e}_x + \cos\theta\vec{e}_z. \quad (25)$$

Далее, с учетом (21) для правой тройки $\{\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z\}$ имеем:

$$\vec{E}_x = \vec{E}_y \times \vec{E}_z = \vec{n} \times \vec{e}_y = -\sin\theta\vec{e}_z - \cos\theta\vec{e}_x. \quad (26)$$

Подставляя все в (24) и приравнивая координаты слева и справа, получаем систему уравнений на кривую ℓ :

$$\begin{cases} x: & -r(Z)\cos\theta\cos\phi - (h - Z)\sin\theta = x; \\ y: & r(Z)\sin\phi = y; \\ z: & -r(Z)\sin\theta\cos\phi + (h - Z)\cos\theta = 0. \end{cases} \quad (27)$$

Из последнего уравнения следует, что на искомой кривой:

$$\cos\phi = \frac{(h-Z)\cot\theta}{r(Z)} \Rightarrow \sin\phi = \pm\sqrt{1 - \frac{(h-Z)^2\cot^2\theta}{r^2(Z)}} \quad (28)$$

Далее, подставляя (28) в x -уравнение, находим зависимость:

$$x(Z) = \frac{Z-h}{\sin\theta}. \quad (29)$$

Наконец, подставляя (28) в y -уравнение, получим:

$$y(Z) = \pm r(Z)\sqrt{1 - \frac{(h-Z)^2\cot^2\theta}{r^2(Z)}} \quad (30)$$

причем знаки \pm отличают верхний и нижний симметричные куски ℓ в системе координат Oxy . Таким образом, кривая ℓ , очерчивающая контур пятна наклонного напыления, задается параметрически парой зависимостей:

$$\ell = \left\{ x(Z) = \frac{Z-h}{\sin\theta}, y_{\pm}(Z) = \pm r(Z) \frac{\sqrt{1 - \frac{(h-Z)^2\cot^2\theta}{r^2(Z)}}}{1} \right\}. \quad (31)$$

При этом область значений параметра Z находится из условия, что на ее границах $Z_{\pm}(h, \theta)$ должно быть $y(Z) = 0$, откуда следует, что граничные значения являются корнями уравнений:

$$Z_{\pm} = h \pm r(Z_{\pm})\tan\theta. \quad (32)$$

Геометрический смысл этих уравнений наглядно представлен на рисунке 5.

Теперь для использования функции эффективной плотности потока $j(r, Z)$ на плоскости сечения Π необходимо найти связь координат $X_{\Pi}, Y_{\Pi}, Z_{\Pi}$ и координат x, y на плоскости Π . Для этой цели напишем векторное уравнение плоскости Π относительно начала O' :

$$\vec{r}'_{\Pi} = -\vec{n}h + x\vec{e}_x + y\vec{e}_y. \quad (33)$$

Тогда имеем:

$$Z_{\Pi} = \vec{r}'_{\Pi} \cdot \vec{E}_z = -\vec{r}'_{\Pi} \cdot \vec{n} = h + x\sin\theta; \quad (34)$$

$$X_{\Pi} = \vec{r}'_{\Pi} \cdot \vec{E}_x = -\vec{r}'_{\Pi} \cdot (\vec{e}_y\vec{n}) = -(\vec{r}'_{\Pi}, \vec{e}_y, \vec{n}) = -x\cos\theta; \quad (35)$$

$$Y_{\Pi} = \vec{r}'_{\Pi} \cdot \vec{E}_y = \vec{r}'_{\Pi} \cdot \vec{e}_y = y. \quad (36)$$

Для правильного учета роста профиля в сложном наклонном распределении потока необходимо еще вычислить добавки к координатам (34)-(36), которые возникают за счет выхода точки роста профиля за пределы плоскости Π вверх вдоль координаты z на вектор $z\vec{e}_z$, при этом величину z мы будем считать малой

(по сравнению с h, Z_{\pm} и другими параметрами, имеющими размерность длины). Тогда, аналогично:

$$\delta Z = z\vec{e}_z \cdot \vec{E}_z = -z\cos\theta; \tag{37}$$

$$\delta X = z\vec{e}_z \cdot \vec{E}_x = -z\sin\theta; \tag{38}$$

$$\delta Y = z\vec{e}_z \cdot \vec{E}_y = 0. \tag{39}$$

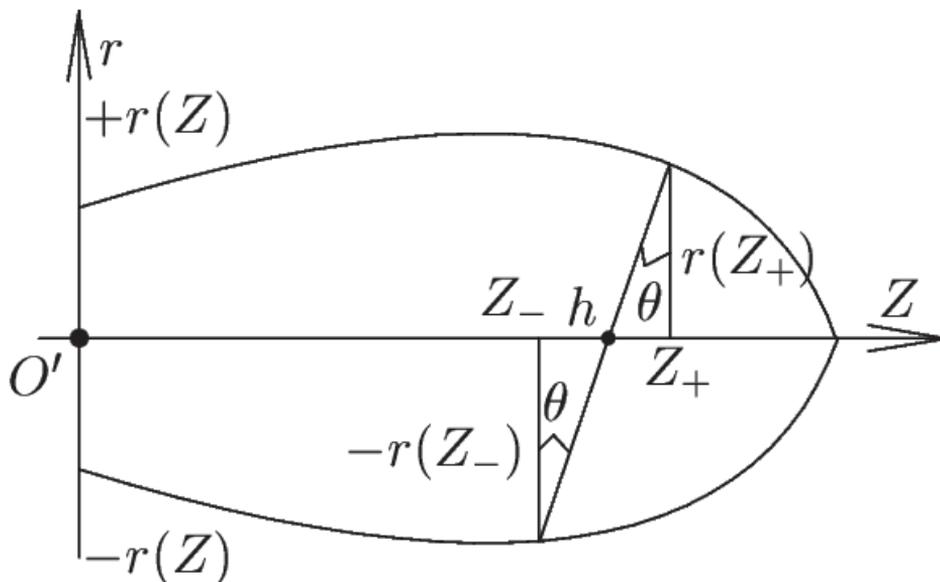


Рисунок 5 – Геометрический смысл уравнений (31)

Из (35)-(36) и (38)-(39) получаем:

$$r_{\Pi} = \sqrt{X_{\Pi}^2 + Y_{\Pi}^2} = \sqrt{x^2\cos^2\theta + y^2 + xz\sin 2\theta} + o(z). \tag{40}$$

Теперь мы можем записать функцию эффективной плотности, ограниченную на плоскость Π и ее небольшую z -окрестность:

$$j_{\Pi}(x, y, z) = j(r_{\Pi}, Z_{\Pi}) = j\left(\sqrt{x^2\cos^2\theta + y^2 + xz\sin 2\theta}, h + x\sin\theta - z\cos\theta\right). \tag{41}$$

Пусть теперь свеча движется со скоростью \vec{v} параллельно поверхности, при этом вектор скорости задается абсолютной величиной v и углом ψ по формуле: $\vec{v} = v(\cos\psi\vec{e}_x + \sin\psi\vec{e}_y)$. В системе отсчета свечи поверхность Π движется со скоростью $-\vec{v}$. Вместо круга действия свечи на плоскости Π теперь возникает область, ограниченная кривой ℓ – назовем ее *овалом действия свечи*. Этот овал будет проходиться участками поверхности под углом ψ к оси Ox , поэтому для вычисления профиля наклонного напыления удобно ввести еще одну систему координат (ξ, η) , которая приспособлена к направлению дорожки, оставляемой на поверхности Π свечой при ее движении со скоростью \vec{v} : координата η будет продольной координатой вдоль дорожки, а координата ξ – поперечной, от которой и будет зависеть искомая функция профиля. Эта система координат будет

повернута по отношению к осям (x, y) на угол $\psi - \pi/2$. Формулы, задающие связь новых координат со старыми — стандартные формулы поворота осей координат:

$$\begin{aligned} \xi &= x \sin \psi - y \cos \psi; \\ \eta &= x \cos \psi + y \sin \psi. \end{aligned} \quad (42)$$

Обратные соотношения, которые понадобятся в дальнейшем:

$$\begin{aligned} x &= \xi \sin \psi + \eta \cos \psi; \\ y &= \eta \sin \psi - \xi \cos \psi. \end{aligned} \quad (43)$$

Найдем теперь диапазон координаты ξ , на котором уместается весь рабочий овал. Очевидно, что в крайних точках коэффициент наклона касательной к кривой ℓ равен $\tan \psi$. С другой стороны, для параметрического задания кривой этот коэффициент равен y'/x' , где штрих означает производную по параметру Z . Таким образом, получаем:

$$\frac{y'_{\pm}(Z'_{\pm})}{x'_{\pm}(Z'_{\pm})} = \tan \psi, \quad (44)$$

где зависимости подставляются из (31). Простые вычисления приводят к следующей форме уравнения на параметры крайних точек:

$$\frac{r(Z'_{\pm})r'(Z'_{\pm})\sin\theta - \cos^2\theta x(Z'_{\pm})}{y_{\pm}(Z'_{\pm})} = \tan\psi. \quad (45)$$

Решая это уравнение относительно параметров Z'_+ и Z'_- , при которых η -линии касаются краев рабочего овала, подставляя их в зависимости $x(Z)$ и $y_{\pm}(Z)$ и затем, подставляя эти выражения в формулу для ξ в (42), найдем:

$$\xi_{\pm} = x(Z'_{\pm})\sin\psi - y_{\pm}(Z'_{\pm})\cos\psi \quad (46)$$

– граничные значения координаты ξ , так что $D = \xi_+ - \xi_- \vee$ представляет собой полную ширину искомого профиля. При этом при $\psi \in [-\pi/2; \pi/2]$ $\xi_+ \leq \xi_-$, а при $\psi \in [\pi/2; 3\pi/2]$ $\xi_+ \geq \xi_-$, что нужно учитывать для правильного составления интегральной формулы.

Рассмотрим теперь площадку поверхности $dS = d\xi d\eta$, которая в системе отсчета свечи движется со скоростью $-\vec{v}$ вдоль одной из η -линий при некотором фиксированном значении координаты ξ , которую и следует рассматривать как поперечную координату искомого профиля $F(\xi)$. Закон движения этой площадки в системе отсчета свечи имеет вид: $\eta = \eta_1 - vt$, где $\eta_{1,2}$ выражаются по формуле:

$$\eta_{1,2} = x(Z_{1,2})\cos\psi + y(Z_{1,2})\sin\psi, \quad (47)$$

а $Z_{1,2}$ – корни уравнения:

$$\xi = x(Z_{1,2})\sin\psi - y(Z_{1,2})\cos\psi, \quad (48)$$

причем $\eta_1 > \eta_2$. Площадка пересекает рабочий овал по хорде за время $T = (\eta_1 - \eta_2)/v$ и за это время успевает набрать материал с разных участков наклонного сечения струи. Подставляя в плотность потока вместо координат (x, y) новые координаты (ξ, η) по формулам (43) и полагая $\eta = \eta_1 - vt$, получим после некоторых упрощений:

$$\frac{z(\xi, t)}{dt} = j(\sqrt{(\eta_1 - vt)^2 g_2(\theta, \psi) + (\eta_1 - vt)g_1(\xi, \theta, \psi, z) + g_0(\xi, \theta, \psi, z)}, w_0(\xi, \theta, \psi, z) + (\eta_1 - vt)w_1(\theta, \psi))\cos\theta \quad (49)$$

– дифференциальное уравнение роста профиля в геометрии наклонного напыления, в котором был учтен общий геометрический фактор проекции площадки на направление напыления посредством общего множителя $\cos\theta$. В (49) введены следующие сокращенные обозначения:

$$\begin{aligned} g_2(\theta, \psi) &= \cos^2\psi \cos^2\theta + \sin^2\psi; \\ g_1(\xi, \theta, \psi_z) &= z \sin 2\theta \cos\psi - \xi \sin 2\psi \sin^2\theta; \\ g_0(\xi, \theta, \psi, z) &= \xi^2 (\sin^2\psi \cos^2\theta + \cos^2\psi) + z \xi \sin 2\theta \sin\psi; \\ w_0(\xi, \theta, \psi, z) &= h + \xi \sin\psi \sin\theta - z \cos\theta; \\ w_1(\theta, \psi) &= \sin\theta \cos\psi. \end{aligned} \quad (50)$$

Уравнение (49) необходимо решить с начальным условием $z(\xi, 0) = 0$ на промежутке $t \in [0, T]$, при этом переменная ξ выступает в этом уравнении как параметр. Результатом решения является величина $z(\xi, T) = F(\xi)$, которая учитывает весь накопленный материал и соответствует искомой функции профиля.

Даже для простых аппроксимационных зависимостей уравнение (49) получится весьма сложным для его аналитического решения. Рассмотрим его наиболее практически важное нулевое приближение, в котором полагаем в правой части всюду $z = 0$. В этом случае уравнение можно сразу проинтегрировать по времени и результат будет иметь вид:

$$\begin{aligned} F(\xi) &= \cos\theta \times \\ &\times \int_0^T j \left(\sqrt{(\eta_1 - vt)^2 g_2(\theta, \psi) + (\eta_1 - vt) \bar{g}_1(\xi, \theta, \psi) + \bar{g}_0(\xi, \theta, \psi)} \right. \\ &\quad \left. + \bar{w}_0(\xi, \theta, \psi) + (\eta_1 - vt) w_1(\theta, \psi) \right) dt, \end{aligned} \quad (51)$$

где функции с чертой берутся при $z = 0$. Для конкретных вычислений этот интеграл удобно представить через интегрирование по переменной η :

$$\begin{aligned} F(\xi) &= \frac{\cos\theta}{v} \times \\ &\int_{\eta_2(\xi)}^{\eta_1(\xi)} j \left(\sqrt{\eta^2 g_2(\theta, \psi) + \eta \bar{g}_1(\xi, \theta, \psi) + \bar{g}_0(\xi, \theta, \psi)} \right. \\ &\quad \left. + \bar{w}_0(\xi, \theta, \psi) + \eta w_1(\theta, \psi) \right) d\eta. \end{aligned} \quad (52)$$

Формула (52) и является решением задачи о вычислении поперечного профиля пятна напыления в условиях наклонной геометрии процесса. При конкретных вычислениях следует иметь ввиду следующее обстоятельство, связанное с пределами интегрирования в (52). Как это видно из схематического рисунка 6, схема вычислений пределов интегрирования $\eta_i(\xi)$ различна при различных ξ : при $\xi_+ < \xi \leq x(Z_-) \sin\psi$ $\eta_i(\xi)$ – это ординаты точек пересечения линии ξ с ℓ_+ – верхней границей овала действия свечи, при $x(Z_+) \sin\psi \leq \xi < \xi_-$ $\eta_i(\xi)$ – это ординаты точек пересечения линии ξ с ℓ_- , а в промежутке $x(Z_-) \sin\psi \leq \xi \leq x(Z_+) \sin\psi$ η_2 – точка пересечения линии ξ с верхней границей ℓ_+ , а η_1 – с нижней границей ℓ_- .

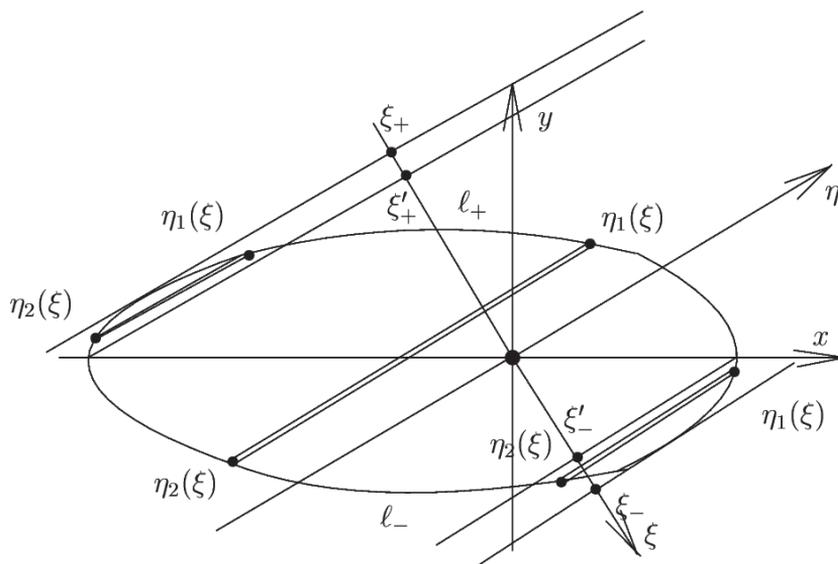


Рисунок 6 – К вычислению пределов интегрирования $\eta_i(\xi)$ в формуле (52)

3. Пример: коническая поверхность Σ

Рассмотрим в качестве иллюстрации работы формулы (52) и всех сопутствующих ей простой пример. Пусть эффективная плотность потока материала в нормальной геометрии напыления задается формулой:

$$j(r, z) = j_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (53)$$

где j_0, r_0, H – некоторые положительные параметры. Граница Σ области напыления такой эффективной плотности является круговым конусом с вершиной, расположенной на оси свечи на расстоянии H от ее выходного сечения, и основанием, совпадающим с кругом выходного сечения, радиус которого и равен r_0 . Качественно такой характер распределения плотности потока частиц соответствует наблюдаемому в эксперименте [12]. Параметр j_0 отвечает за общую нормировку эффективной плотности. В сечениях $z = \text{const}$ распределение плотности потока является параболическим с максимумом в точке $r = 0$ и обращением плотности в нуль при $r(z) = r_0$ т.е. на окружности пересечения выбранного сечения с поверхностью Σ . Профиль $F(x, z)$, соответствующий эффективной плотности (53), легко вычисляется с помощью преобразования Абеля в форме (9). Результат вычисления имеет вид:

$$F(x, z) = \frac{4j_0 r_0 \left((z/r_0)^2 - k^2 (x/r_0)^2 - 2k(z/r_0) + k^2 \right)^{3/2}}{3v k^2 (k - z/r_0)}, \quad (54)$$

где $k = H/r_0$. На рисунке 7 показано полное семейство профилей в виде 2-мерной зависимости.

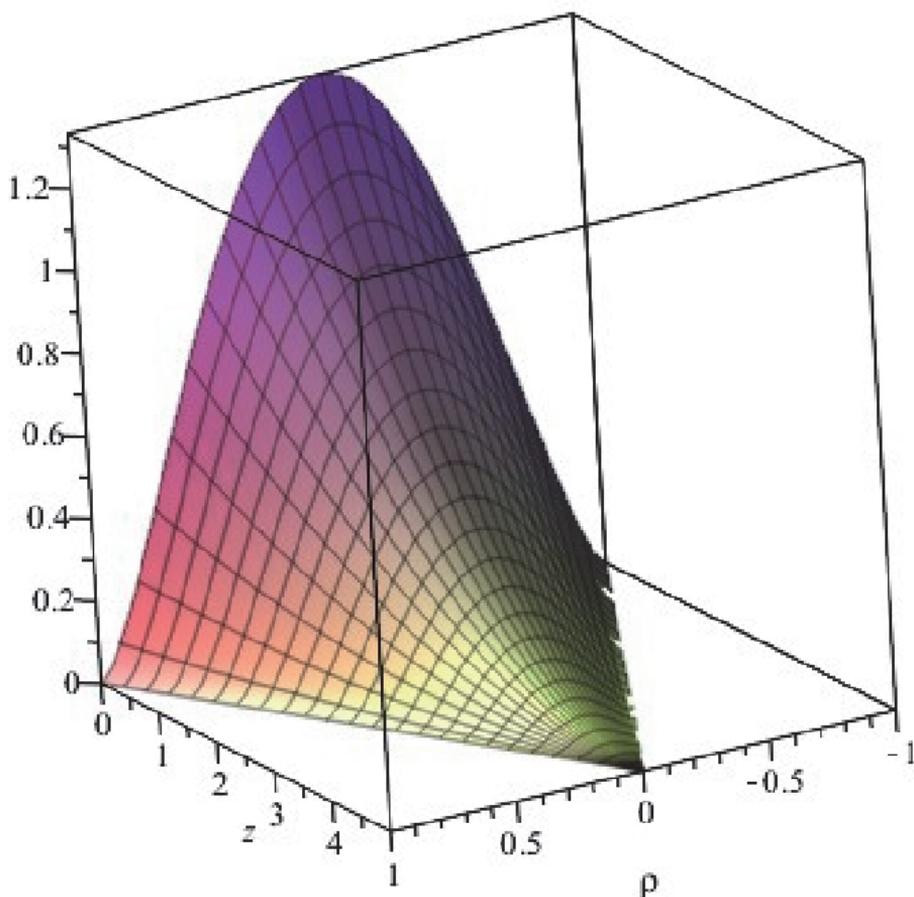


Рисунок 7 – Зависимость (54), иллюстрирующая семейство профилей $F(x, z)$ при разных z . Переменная $\rho = x/r_0$. Иллюстрация построена при $r_0 = 1, j_0 = 1, k = 5$

Граничная кривая ℓ , задаваемая формулой (31), в рассматриваемом случае принимает следующий явный вид:

$$\ell = \left\{ \frac{z-h}{\sin\theta}, \pm r_0(1-z/H) \sqrt{1 - \frac{(h-z)^2 \cot^2\theta}{r_0^2(1-z/H)^2}} \right\}, \quad (55)$$

а диапазон значений параметра z (формулы (45)):

$$Z_{\pm} = \frac{H(r_0 \tan\theta \pm h)}{r_0 \tan\theta \pm H}. \quad (56)$$

На рисунке 8 показано одно из сечений (55) при некоторых специальных значениях параметров, для которых далее и будут строиться следующие иллюстрации.

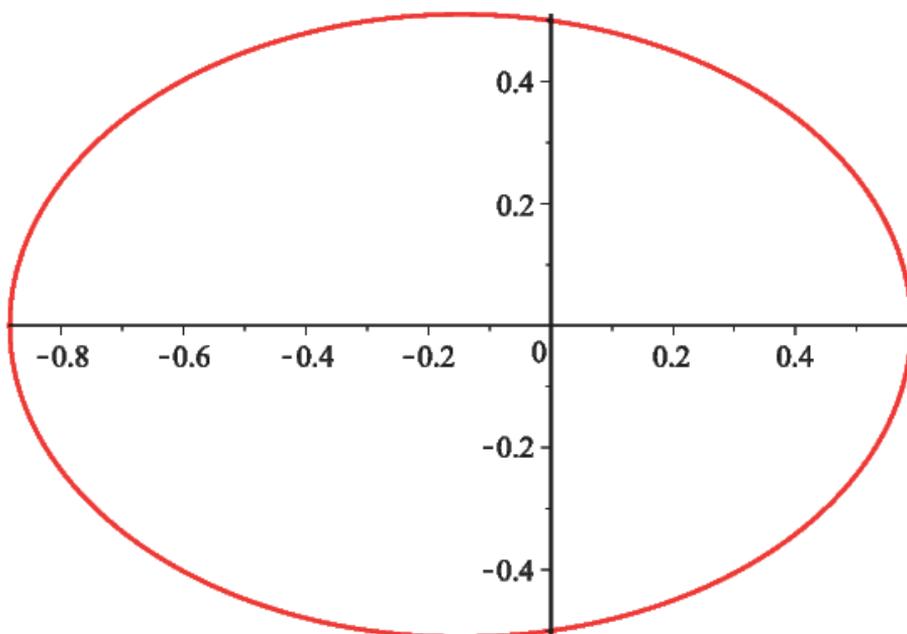


Рисунок 8 – Кривая (эллипс) (55) при $r_0 = 1, H = 5, h = 2.5, \theta = \pi/4$

При выбранных значениях параметров:

$$Z_+ \approx 2.92; Z_- \approx 1.86. \quad (57)$$

Далее все явные формулы становятся громоздкими и мы ограничимся лишь их числовыми и графическими иллюстрациями при выбранных на рисунке 8 значениях параметров. Решения уравнений (45) при

$$r_0 = 1, H = 5, h = 2.5, \theta = \psi = \pi/4, \quad (58)$$

получаются следующими:

$$Z'_+ \approx 1.97, Z'_- \approx 2.82. \quad (59)$$

Сечение струи на рисунке 8, размеченное по направлению скорости свечи, с помощью (58) и уравнений (42)-(43) представлено на рисунке 9.

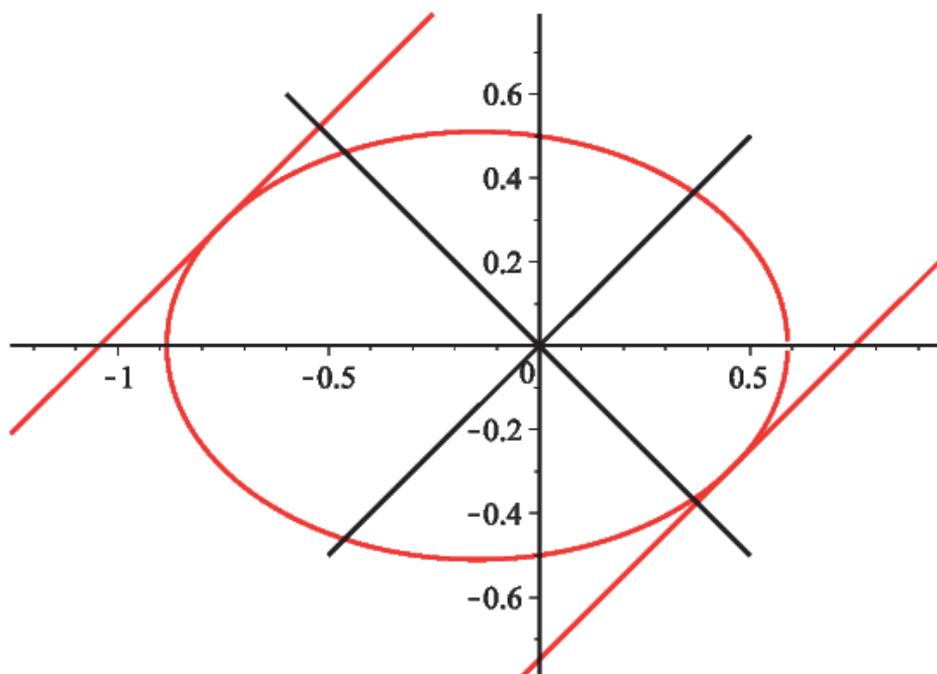


Рисунок 9 – Сечение (8) с граничными прямыми $\xi_+ \approx -0.74$ и $\xi_- \approx 0.53$, сосчитанными по формулам (45)-(46) (показано красным).

Черным цветом показаны координатные оси (ξ, η) , приспособленные для вычисления поперечного к скорости \vec{v} (вдоль η) профиля $F(\xi)$

Значения ξ , соответствующие смене схемы вычисления пределов интегрирования в (52) (см. комментарий к этой формуле):

$$\begin{aligned} \xi'_+ &= x(1.86)\sin(\pi/4) \approx -0.63; \\ \xi'_- &= x(2.82)\sin(\pi/4) \approx 0.42. \end{aligned} \tag{60}$$

Таким образом, все необходимые заготовки для составления интеграла (52) в рассматриваемом примере вычисляются аналитически в явном (хотя иногда и громоздком) виде. Сам интеграл профиля (60) также вычисляется в элементарных функциях, но его явный вывод в общем виде будет занимать несколько страниц. Ограничимся графиком получившегося профиля – он вместе с симметричным профилем нормальной геометрии представлен на рисунке 10.

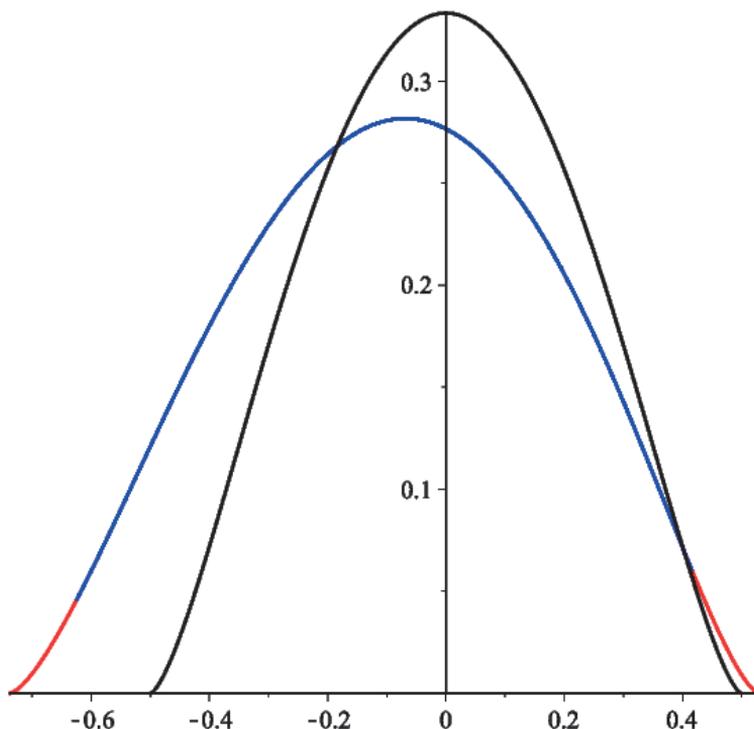


Рисунок 10 – Цветная сине-красная кривая – наклонный профиль пятна напыления, полученный при значениях параметров (58), черная кривая – симметричный профиль нормальной геометрии напыления, полученный при $\theta = 0$ и прочих равных условиях. Нижние красные части наклонного профиля получены интегрированием между точками одной ветви ℓ , пределы интегрирования для синей части кривой лежат на разных ветвях ℓ

Рисунок наглядно демонстрирует все основные эффекты наклонной геометрии напыления в сравнении с нормальной геометрией при прочих равных условиях:

1. Высота профиля заметно уменьшается;
2. Профиль «расплывается»;
3. Профиль в целом (центр масс) смещается в сторону струи (она сыплет материал слева сверху);
4. Это смещение происходит в основном за счет его передней (т.е. обращенной к струе) части, при этом задняя часть смещается незначительно.
5. Профиль становится асимметричным: он «завален» в сторону струи. Впрочем, даже для довольно большого угла наклона $\theta = \pi/4$, разница в протяженности передней и задней части профиля по отношению к положению максимума составляет около 10%.

Рассмотренный пример показывает, что, несмотря на довольно приближенный характер исследуемой нами общей модели, она дает адекватные результаты.

Заключение

В настоящей работе предложен метод расчета профиля пятна напыления при газотермическом нанесении частиц порошкового покрытия на плоскую поверхность при расположении рабочей головки аппарата под углом к поверхности детали. При расчете за основу берется экспериментальный профиль такого пятна при вертикальном расположении рабочей головки. Решена обратная задача напыления: функция эффективной плотности потока материала вычисляется с помощью экспериментальной функции профиля пятна напыления посредством интегрального преобразования ее производной, которое по существу является обращением преобразования Абеля.

Получено дифференциальное уравнение роста профиля в геометрии наклонного напыления, в котором учтен общий геометрический фактор проекции площадки на направление напыления. В качестве примера практического использования данного уравнения рассмотрено его решение для случая, когда граница области напыления является круговым конусом. Показано, что при наклонном расположении оси напыления по отношению к поверхности детали уменьшается высота профиля дорожки напыления, а центр масс дорожки смещается в сторону струи. Степень асимметрии профиля увеличивается с увеличением угла наклона головки аппарата.

Предлагаемая методика может быть полезной при расчете толщины покрытия и при подготовке программ управления процессом напыления в станках с ЧПУ.

Литература

1. Газотермическое напыление / под общей ред. Л.Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
2. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
4. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. Пер. с яп. В.Н. Попова / под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
5. Davis J.R. Handbook of thermal spray technology. ASM International, 2004. 338 p.
6. De Oliveira U., Ocelik V., De Hosson J.Th.M. Analysis of coaxial laser cladding processing conditions // Surface & Coatings Technology. 2005. V.197. P. 127-136 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>.
7. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. 2014. V. 214. P. 1102-1110 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.12.016>.
8. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Enhancement of Deposition Quality in Micro-plasma Transferred Arc Deposition Process // Materials and Manufacturing Processes. 2014. V.29. P. 1017-1023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.892984>.

9. Pinkerton A.J. Advances in the modeling of laser direct metal deposition // *Journal of Laser Applications*. 2015. V.27. S15001 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.2351/1.4815992>.
10. Jain N.K., Sawant M.S., Nikam S.H., Jhavar S. Metal Deposition: Plasma-Based Processes. *Encyclopedia of Plasma Technology*. New York: Taylor and Francis, 2016. P. 19 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1081/E-EPLT-120053919>.
11. Sawant M.S., Jain N.K. Evaluation of stellite coatings by γ -PTA powder, laser, and PTA deposition processes // *Materials and Manufacturing Processes*. 2017. V. 33:10. P. 1043-1050 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2017.1364764>.
12. Smurov I., Doubenskaia M., Zaitsev A. Comprehensive analysis of laser cladding by means of optical diagnostics and numerical simulation // *Surface & Coatings Technology*. 2013. V.220. P. 112-121 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.053>.

УДК 620.22

Изменение структуры и состава покрытий на основе TiN под влиянием мощности импульсной магнетронной системы

Т.О. Сошина, кандидат технических наук,
доцент кафедры Технические дисциплины,
Лысьвенский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета (ЛФ ПНИПУ), г. Лысьва

Рассмотрено влияние технологического параметра процесса импульсно-магнетронного распыления: мощности магнетронной системы на микроструктуру и фазовый состав покрытий на основе TiN. Установлено влияние мощности магнетронной системы на фазовый состав и структуру формируемых покрытий TiN. Определена оптимальная величина мощности магнетронной системы, при достижении которой формируется однокомпонентное текстурированное покрытие на основе фазы (111) c-TiN с минимальным уровнем внутренних напряжений, наименьшим размером зерен и плотной столбчатой нанокристаллической структурой.

Импульсное магнетронное распыление, мощность магнетронной системы, фазовый состав, микроструктура.

Changes in the structure and composition of coatings based on TiN under the influence of power of the pulsed magnetron system

T.O. Soshina, candidate of technical sciences,
associate professor of the department of Technical Disciplines,
Lysva branch of the Perm National Research Polytechnic University
(LF PNRPU), Lysva

The influence of the technological parameter of the process of pulsed magnetron sputtering is considered: the power of the magnetron system on the microstructure and phase composition of coatings based on TiN. The influence of the power of the magnetron system on the phase composition and structure of the formed TiN coatings has been established. The optimal value of the power of the magnetron system is determined, upon reaching which a single-component textured coating based on the (111) c-TiN phase is formed with a minimum level of internal stresses, the smallest grain sizes, and a dense columnar nanocrystalline structure.

Pulsed magnetron sputtering, magnetron system power, phase composition, microstructure.

Введение

В современной конкурентной среде промышленных механообрабатывающих производств основные перспективы развития связывают с применением высокоэффективных и прогрессивных видов режущего инструмента, новых ин-

струментальных материалов и покрытий для них [1, С.98, 2, С.13, 3, С.72]. Инструментальные покрытия позволяют существенно продлить срок эксплуатации режущего инструмента, снизив тем самым расходы на материалы до 20% себестоимости продукции. Длительная стойкость инструмента обеспечивается такими основными свойствами покрытий как высокая твердость, износостойкость, теплостойкость, способность демпфировать нагрузки, действующие на инструмент в процессе резания [4, 5, С.389, 6].

Основными методами осаждения покрытий в России и в мировой практике являются PVD-методы или методы физического осаждения ионизированной плазмы [7, С.232, 8, С.3, 9, С.326]. Широкое применение среди методов физического осаждения находит метод магнетронного распыления (ММР), обеспечивая более низкую температуру нагрева подложки, высокую производительность процесса осаждения и отсутствие микрокапель распыляемого вещества, что положительно сказывается на качестве поверхности покрытия [10, 11, С.126]. Разновидностью ММР является метод импульсного магнетронного распыления (ИМР). ИМР заключается в подаче на магнетрон импульса высокой мощности, малой длительности и заданной скважности. Метод представляет особый интерес ввиду возможностей влияния на фазовые и структурные характеристики покрытий, формируя особомелкозернистую структуру, открывает возможность синтеза новых соединений [12, С.236, 13, С.177]. На стадии изучения находятся вопросы, отражающие влияние технологических режимов процесса ИМР на структуру, фазовый состав и свойства покрытий [14, 15, С.43]. Так, например, мощность магнетронной системы в процессе распыления оказывает влияние на концентрацию ионизированной плазмы и степень ионизации распыляемого вещества [16, С.173, 17, С.42]. С повышением степени ионизации формируются плотные, столбчатые, текстурированные покрытия с улучшенными свойствами: высокой твердостью, низкой шероховатостью, хорошей когезионной и адгезионной прочностью [18, С.120, 19, С.432].

Установление зависимостей структуры и фазового состава покрытий от технологических параметров процесса осаждения позволит управлять основными факторами, определяющими свойства покрытий и прогнозировать их эксплуатационные свойства в целом [9, С.330, 15, С.43, 20, С. 4266]. Целью данного исследования являлось установление закономерностей изменения структуры и фазового состава покрытий на основе TiN (далее покрытий TiN) от величины мощности импульсной магнетронной системы (далее мощности ИМС).

Методика эксперимента

Покрытия TiN осаждены методом ИМР на установке Unicoat-600 (производство НПФ «Элан-Практик») на тестовые образцы из твердого сплава ВК6. Технологический процесс осаждения покрытий TiN состоял из операций: ионная очистка поверхности образца с подачей на него высокого импульсного напряжения → осаждение адгезионного подслоя Ti → осаждение рабочих слоев покрытия TiN. Постоянными оставались параметры технологического процесса: давление газа в вакуумной камере – 0,28 Па; напряжение смещения – 65В; скорость вращения образцов в вакуумной камере 25 об/мин и расстояние от магнетрона до

образцов. Температура нагрева образцов в процессе осаждения покрытия TiN составила 230...250 °С.

Рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализ покрытий TiN проведен на дифрактометре ДРОН-4. Режимы съемки: излучение – Cu K α , напряжение на рентгеновской трубке – 30 кВ, ток на рентгеновской трубке – 20 мА. Объемные доли фаз покрытий, параметр кристаллической решетки (КР) рассчитаны из [22, С.120]. Определение структурных параметров покрытия: отклонение параметра КР (Δa и Δc), отклонение положения дифракционных пиков $\Delta 2\theta$ от аналогичных значений стехиометрического образца проводили для основной фазы покрытия.

Текстурированность T_{HKL} покрытия определена (1):

$$T_{(HKL)} = \frac{\max I_{HKL}}{\sum I_{H_1K_1L_1} + \dots + I_{H_nK_nL_n}}, \quad (1)$$

где $\max I_{HKL}$ – максимальная интенсивность пика основной фазы;
 $\sum I_{H_1K_1L_1} + \dots + I_{H_nK_nL_n}$ – сумма интенсивностей всех пиков фаз.

Микроструктурный анализ и морфология поверхности покрытий TiN изучены с использованием сканирующего электронного микроскопа Ultra 55. Топография поверхности покрытий TiN изучена методом атомно-силовой микроскопии с помощью атомного силового зондового микроскопа «НаноСкан». Размер сканируемой поверхности образца составлял 3 мкм×3 мкм.

Результаты и обсуждение

Мощность ИМС (N) оказывает существенное влияние на фазовый состав и структурные характеристики покрытий TiN (рис. 1). В экспериментальном диапазоне мощности ИМС формируются две фазы покрытий: кубическая с-TiN и гексагональная h-TiN_{0,3} (табл. 1). Гексагональная фаза h-TiN_{0,3} с преимущественной ориентацией в направлении (110) является преобладающей в покрытии TiN, осажденном при минимальной мощности ИМС 5,5 кВт. Формируемое при малом значении мощности ИМС покрытие имеет низкую текстурированность $T_{(111)}$, высокий уровень деформации КР, характеризуемый Δa и имеет повышенный уровень внутренних сжимающих напряжений, о чем свидетельствует величина отклонения дифракционных пиков $\Delta 2\theta = -1,1\%$ и наименьшее значение полуширины пика основной фазы β^0 (табл. 1). Изменение фазового состава с существенным снижением объемной доли гексагональной h-TiN_{0,3} происходит при достижении мощности ИМС 6,5 кВт. Осаждение покрытия TiN при максимальной мощности ИМС приводит к фазовому переходу (110) h-TiN_{0,3} → (111) с-TiN с повышением текстурированности покрытия и снижением уровня $\Delta 2\theta$ до -0,3%, параметр КР имеет близкое к стехиометрическому значение ($\Delta a = 0,07\%$). Смещение углов Брэгга всех пиков в сторону меньших значений (табл. 2) и уменьшение $\Delta 2\theta$ для всех пиков фазы с-TiN свидетельствуют о возникновении только однородных сжимающих напряжений и стабилизации напряженного состояния покрытия при достижении мощности ИМС 8 кВт. Причиной фазовых переходов и изменения напряженного состояния покрытия может быть повышение степени ионизации

металлической плазмы, происходящее при увеличении мощности ИМС.

Размер ОКР покрытий на основе фазы h-TiN_{0,3} составляет 20...35 нм и снижается при увеличении мощности ИМС до 8 кВт принимая значения 6...15 нм, что свидетельствует о нанокристаллическом строении сформированных покрытий TiN.

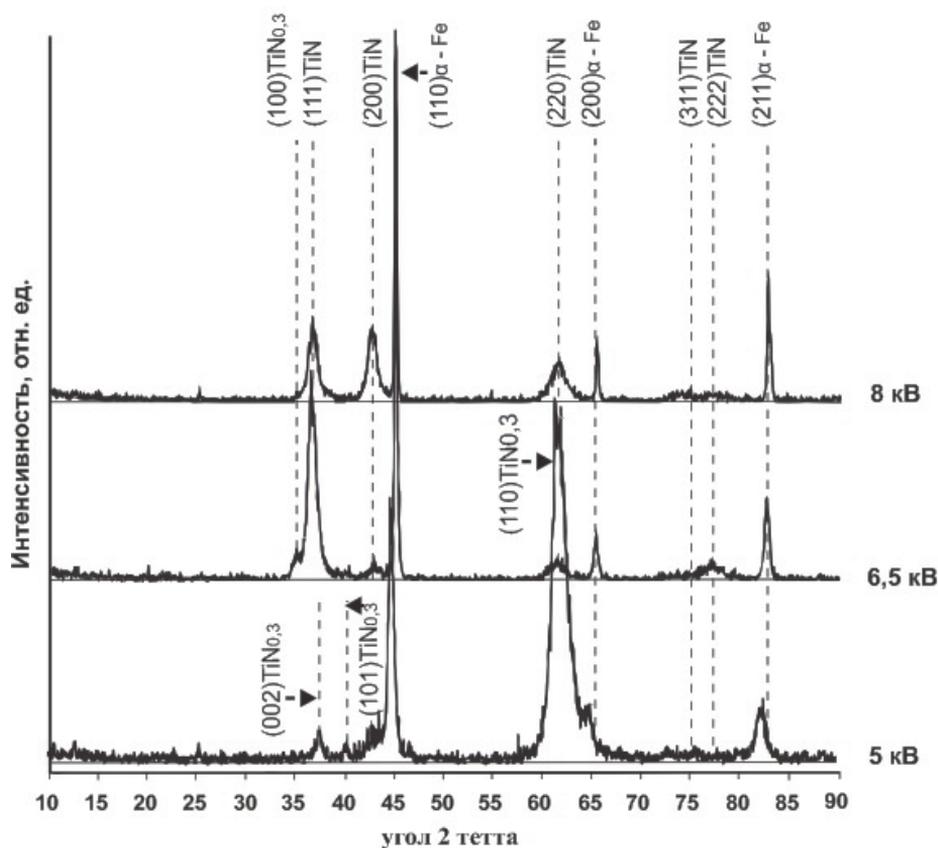


Рисунок 1 - Дифрактограммы покрытий TiN, сформированных при различном значении мощности ИМС

Таблица 1 – Фазовый состав и структурные характеристики покрытий TiN в зависимости от мощности ИМС

N, кВт	Объемная доля фаз		ОКР, нм	T(111)T iN	Δ2θ, %	Δα, %	β0
	c-TiN	h-TiN _{0,3}					
5	28	72	20...35	0,18	-0,9	0,5	0,6
6,5	85	15	15...30	0,48	-0,6	0,15	0,5
8	100	-	6...15	0,84	-0,5	0,07	0,4

Таблица 2 – Положение дифракционных пиков фаз покрытия TiN в зависимости от мощности ИМС

Фаза покрытия	Тип текстуры	2 θ табл, град	2 θ эксп., град		
			5 кВт	6,5 кВт	8 кВт
TiN _{0,3}	(002)	37,5056	37,60	-	-
TiN _{0,3}	(101)	39,7086	40,40	-	-
TiN _{0,3}	(100)	34,8117	-	34,95	-
TiN	(111)	36,8048	-	36,55	36,6
TiN	(200)	42,6109	42,95	42,80	42,65
TiN _{0,3}	(110)	62,3976	61,80	-	-
TiN	(220)	61,9806	-	61,35	61,50
TiN	(311)	74,1981	-	-	73,90
TiN	(222)	78,0749	-	77,10	-

Изменение мощности ИМС приводит к изменению микроструктуры и топографии поверхности исследуемых покрытий основе TiN (рис. 2, 3). Покрытие TiN на основе гексагональной фазы h-TiN_{0,3}, сформированное при минимальной мощности ИМС имеет низкую адгезионную и когезионную прочность с четкими границами разделов между слоями и размером зерна 50...100 нм. Рост зерен преимущественно протекает в направлении перпендикулярном подложке (рис. 2, а). Низкая прочность покрытия может быть обусловлена уровнем внутренних напряжений в покрытии, что находит подтверждение в результатах рентгеноструктурного анализа. Топография поверхности покрытия на основе фазы h-TiN_{0,3}, полученного при мощности ИМС 5,5 кВт показала сильно развитый микрорельеф поверхности – средняя высота микронеровностей – 282,4 нм (рис. 3, а). Уменьшение размера зерен покрытия до 30...50 нм с увеличением ее адгезионной и когезионной прочности наблюдается при повышении мощности ИМС до 6,5 кВт. В этих условиях формируется столбчатая зернистая структура покрытия с низкой плотностью зерен (рис. 2, б). Плотная столбчатая упорядоченная нанокристаллическая структура с высокой когезионной прочностью и наименьшим размером зерна 15...50 нм формируется у покрытия на основе кубической фазы с-TiN, сформированного при максимальной мощности ИМС 8 кВт (рис. 2, в). Рост зерен этого покрытия непрерывен, видимая дефектность структуры минимальна. Средняя высота микронеровностей поверхности покрытия, полученного при максимальной мощности ИМС составляет 94,5 нм (рис. 3, б).

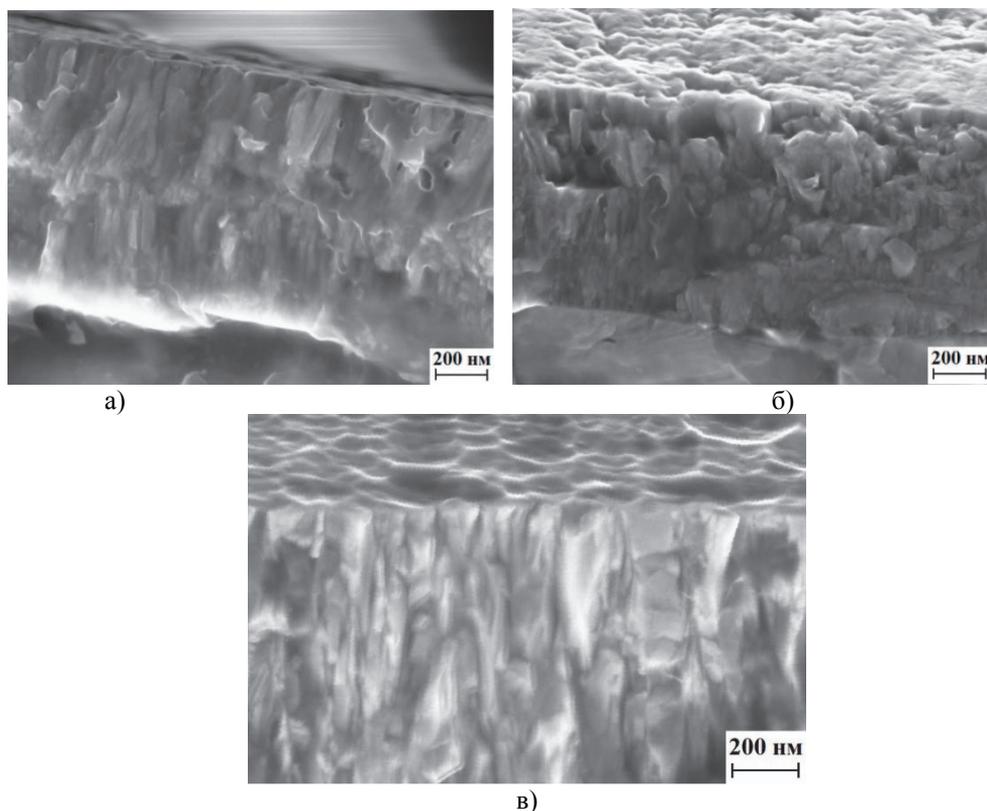


Рисунок 2 – Микроструктура покрытий TiN, сформированных при мощности ИМС: а) 5 кВт; б) 6,5 кВт; в) 8 кВт

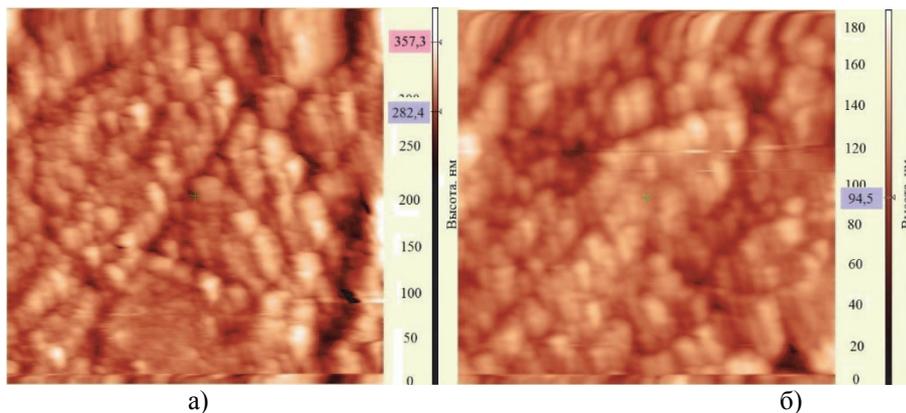


Рисунок 3 – Топография поверхности покрытий TiN, сформированных при мощности ИМС: а) 5 кВт; б) 8 кВт

Выводы

Микроструктурные исследования и рентгенофазовый анализ покрытий TiN полученных импульсным магнетронным распылением позволили установить влияние мощности ИМС на параметры структуры, состав покрытий и шероховатость их поверхности. Установлено, что увеличение мощности ИМС в исследуе-

мом диапазоне 5...8 кВт сопровождается фазовым переходом (110) h-TiN_{0,3} → (111) c-TiN с повышением текстурированности покрытия, уменьшением отклонений параметра КР и положения дифракционных пиков от стехиометрического значения, снижением средней высоты микронеровностей поверхности. С увеличением мощности ИМС происходит снижение дефектности структуры покрытий, увеличение плотности и когезионной прочности зерен, уменьшается размер зерна до 15...50 нм.

Покрытие TiN на основе кубической фазы c-TiN, плотной столбчатой микроструктурой, максимальной текстурированностью, наименьшим размером зерна и шероховатостью поверхности формируется при оптимальной мощности ИМС 8 кВт.

Литература

1. Давлетбаева Р.Р. Покрытие для режущего инструмента // Молодой ученый. 2017. № 2(136). С. 98-101.
2. Попов К.А. Влияние применения покрытий на режущий инструмент, используемый для обработки деталей НГО // Актуальные исследования. 2022. № 23(102). С. 13-16.
3. Шаймухаметова Л.Ф. Применение различных типов покрытий для защиты режущего инструмента // Международный журнал «Инновационная наука». 2017. № 12. С. 72-74.
4. Чемборисов Н.А. Высогорец Я.В. Исследование влияния нанесения износостойких нанопокровтий на стойкость режущего инструмента // Современная техника и технологии. 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://technology.snauka.ru/2015/08/7385> (дата обращения: 27.01.2023).
5. Иващенко А.П. Анализ способов повышения стойкости материалов режущих инструментов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-3. С. 389-392.
6. Revuru R.S., Pasam V.K., Posinasetti N.R. Performance of coated cutting tools in machining: a review // The International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (IConETech-2020). 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.47412/JSID9445> (дата обращения 27.01.2023).
7. Берлин Е.Б., Сейдман Л.А. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением. М.: Техносфера, 2014. 256 с.
8. Афанасьева Ю.Д., Шехтман С.Р. Технология нанесения покрытий Ti-TiN на режущий инструмент // Вестник УГАТУ. 2018. Т. 22. № 4(81). С. 3-9.
9. Griepentrog M., Mackrodt B., Mark G., Linz T. Properties of TiN hard coatings prepared by unbalanced magnetron sputtering and cathodic arc deposition using a uni and bipolar pulsed bias voltage // Surface and Coatings Technology. 1995. V. 74-75. P. 326-332.

10. Danisman S., Odabas D., Teber M. The Effect of TiN, TiAlN, TiCN thin films obtained by reactive magnetron sputtering method on the wear behavior of Ti6Al4V alloy: a comparative study // *Coatings*. 2022. № 12 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/coatings12091238> (дата обращения 27.01.2023).
11. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко А.В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. вып. 2. С. 126-134.
12. Колмаков А.О., Осирко В.О. Модель импульсного источника питания для комбинированных процессов магнетронного распыления HIPIMS+MFMS // *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. 2021. С. 236-240.
13. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Импульсное магнетронное распыление (pulsed magnetron sputtering) керамических СВС-мишеней как перспективная технология получения многофункциональных покрытий // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2020. Т. 56. № 2. С. 165-180.
14. Chang Chi-Lung, Ching-Yen Lin, Fu-Chi Yang, Jian-Fu Tang. The effect of match between high power impulse and bias voltage: TiN coating deposited by high power impulse magnetron sputtering by // *Coatings*. 2021. № 11(7) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/coatings11070822> (дата обращения 20.01.2023).
15. Сошина Т.О., Сошина О.И. Получение многослойных покрытий на основе ZrN и TiN с высокими физико-механическими свойствами // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022. № 1. С. 1-45.
16. Wu Wan-Yu, Man-Yee Chan, Yu-Hsuan Hsu, Guan-Zhen Chen, Shu-Chuan Liao, Cheng-Hung Lee, Ping-Wing Lui. Bioapplication of TiN thin films deposited using high power impulse magnetron sputtering // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 362. P. 167-175.
17. Сошина Т.О. Исследование влияния мощности магнетронной системы на структуру и физико-механические свойства пленок на основе Ti-Al-N // *Технология металлов*. 2013. № 4. С. 38-47.
18. Береснев В.М., Торяник И.Н., Соболев О.В., Погребняк А.Д., Кропотов А.Ю., Стервеев Н.Г., Немченко У.С., Колесников Д.А., Клименко С.А., Турбин П.В. Применение импульсного магнетронного распыления для получения покрытий системы AlN-TiB₂-TiSi₂ // *Журнал технической физики*. 2014. Том 84. вып. 8. С. 118-121.
19. Varshilia N.C., Yogesh K., Rajam K.S. Deposition of TiAlN coatings using reactive bipolar-pulsed direct current unbalanced magnetron sputtering // *Vacuum*. 2009. Vol. 83. P. 427-434.
20. Shetty A.R., Karimi A., Cantoni M. Effect of deposition angle on the structure and properties of pulsed-DC magnetron sputtered TiAlN thin films // *Thin Solid Films*. 2011. Vol. 519. P. 4262-4270.
21. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов. М.: МИСИС, 1994. 328 с.

УДК 674.815

Модель оптимизации получения требуемых эксплуатационных показателей древесно-полимерных структур

Б.Л. Спирин, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,
С.В. Фролов, кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой механики и инженерной графики,
В.В. Абразумов, доктор технических наук,
профессор кафедры механики и инженерной графики,
Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение
Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

В данной статье рассматривается построение модели получения необходимых для применения в промышленности древесно-полимерных композитов. Древесно-полимерные композиты являются относительно новыми строительными материалами, в производстве которых используются с одной стороны природные материалы, а с другой в их производстве может использоваться пластиковый мусор. Получающийся материал ни в чем не уступает обычным древесным материалам, а по ряду параметров превосходит их. Здесь показано как различные характеристики древесины и пластиков, а также особенности процесса производства влияют на получение композита с необходимыми для промышленности свойствами.

Композиционные материалы, мономеры, полимеры, термопласт.

Optimization model for obtaining the required performance indicators of wood-polymer structures

B.L. Spirin, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
S.V. Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
V.V. Abrazumov, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia», Moscow

This article discusses the construction of a model for obtaining wood-polymer composites necessary for use in industry. Wood-polymer composites are relatively new building materials, in the production of which, on the one hand, natural materials are used, and on the other hand, plastic waste can be used in their production. The resulting material is in no way inferior to conventional wood materials, and surpasses them in a number of parameters. It shows how the different characteristics of wood and plastics, as well as the features of the manufacturing process, affect the production of a composite with the properties required for the industry.

Composites, composite materials, pressing, conditioning.

В мире всё больше растёт спрос на использование в промышленности материалов, которые должны обеспечивать необходимую прочность, жесткость, долговечность. При этом всё больше внимания уделяется их экологичности. Они должны, по возможности, не только быть изготовлены из безопасного для окружающей среды природного сырья, но и иметь возможность последующей переработки. Всё сильнее поощряется внедрение технологий, основанных на глубокой повторной переработке. Большое количество скопившегося пластика, например, в постоянно используемых в бытовых нуждах бутылках, изготовленных из полиэтилентерефталата (ПЭТ), а также различных полиэтиленовых изделиях привело к необходимости появления нового материала, совмещающего в себе все достоинства древесины и полимеров.

Древесно-полимерные соединения – высокостабильные природные вещества, в которые заложен потенциал для развития безвредных для окружающей среды продуктов. Древесные волокна первоначально использовались только для уменьшения плотности и стоимости пластмассовых изделий, но в дальнейшем обнаружилось, что волокна древесины улучшают механические характеристики продуктов.

Используя древесину как компонент Древесно-полимерных композитов (ДПК), можно эффективно улучшить жесткость и другие механические свойства композитов. Обычные, укрепленная волокном полимеры, могут обеспечить механические свойства материалов, сопоставимые с соединениями, укрепленными стекловолокном.

При изготовлении ДПК древесину измельчают почти до состояния порошка, количественное содержание которого обычно от 10 до 80%. Использование древесного порошка подразумевает, что для производства готового изделия могут быть использованы опилки, которые обычно в деревообработке идут в отходы. Часто при производстве пропускают достаточно дорогостоящую фазу сортировки (сепарации частиц по фракциям), которая необходима при производстве ДСП (древесно-стружечных плит).

Возможно производство данного материала методом экструзии, что в совокупности с пластичностью в нагретом состоянии полимерной составляющей позволяет получать изделия практически любой формы, а это в свою очередь обеспечивает минимальную обработку материала при строительстве у каждого конкретного заказчика. Композит также может быть изготовлен по заранее разработанному чертежу. При этом возможные отходы могут быть запущены в повторную переработку.

Древесная часть данного композита позволяет материалу не только выглядеть как натуральное дерево, но и иметь запах древесины, а также передавать тактильные ощущения как от контакта с деревом. При этом материал свободен от таких недостатков древесины как появление в нем плесени, вредителей, гниения и выцветания. Также введение соответствующих добавок позволяет обеспечить достаточный уровень пожаробезопасности, недоступный обычной древесине.

Прочность древесно-пластиковых композитов обеспечивается не только

используемыми материалами, но и типом используемого оборудования. Применение экструдера с разными типами калибраторов позволяет получить листовые материалы с требуемыми для конкретного применения профилями плотности, которые фактически являются геометрическими параметрами сечения и могут быть изменены в соответствии с характером воспринимаемой нагрузки. Так при работе элемента на изгиб возможно изготовление профиля плотности близкого к наиболее оптимальному для этого вида нагружения двутавру. Материал с соответствующим профилем изображен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Профилированный древесно-полимерный композит

В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации древесно-полимерных композитов (ДПК), изготовленных из широко распространённых древесных опилок хвойных пород, полиэтилена высокой плотности, а также полиэтилена с привитым малеиновым ангидридом, играющего роль связующего вещества. ДПК с данными компонентами были разработаны с целями использования в малоэтажном строительстве для облицовки фасадов, что требует сочетания в одном изделии достаточно противоречивых характеристик: устойчивость к внешним воздействиям, механическая стойкость, эстетический внешний вид, сохранение данных характеристик в течении достаточно длительного времени.

Качество изделий с требуемыми характеристиками основано на ряде факторов управления и случайных факторов. Факторы управления – те, которые мы можем задавать в процессе производства. Случайные факторы (или подстановочные параметры) – те, которые при изготовлении изделия не оптимизируются или они не поддаются прямой оптимизации, поскольку управлять напрямую ими невозможно (или очень сложно) и могут быть проконтролированы только с разной степенью точности. К последним, например, относится размер древесных частиц, который в целях удешевления производства не контролируется.

Метод создания изделий определенной надежности и качества при наличии случайных факторов разработан инженером Геничи Тагучи. Его метод широко используется в технике с 80-х годов прошлого века. Этот метод основан на параметре прочностного дизайна и продолжает активно развиваться. Однако недостатком данного метода является требование получения большого количества экспериментальных данных, что приводит к усложнению работы по планированию эксперимента, в соответствии с методикой которого необходимо заполнение двойного ортогонального массива данных, который в дальнейшем обрабатывается с измерением коэффициента сигнал/шум. Последующим развитием метода обработки данных являются модели поверхностей отклика, в которые входят и управляющие факторы и случайные величины, помещаемые в общий массив экспериментальных данных, что позволяет избежать заполнения двойного массива. В данном методе для каждой экспериментальной величины вычисляется математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

Также в данных исследованиях применяется оптимизационная процедура нахождения среднего с минимальным отклонением при наилучших условиях, что приводит к методу известному как метод двойного отклика.

Целью данного исследования является определение наилучшего сочетания управляющих факторов, а также определения степени связи между управляющими факторами и случайными параметрами.

Для составления математической модели требуется установление функциональной зависимости между переменными. Так как результаты наблюдений – это набор некоторых случайных величин, то обычно говоря о переменных имеют в виду некоторые средние значения экспериментальных данных, полученные с той или иной степенью точности. Будем предполагать, что эта зависимость имеет следующий вид:

$$E(y/x) = \eta(x) \quad (1)$$

где $E(y/x)$ – среднее значение изучаемой величины y при значениях параметров управления, определяемых координатами вектора x . Функция $\eta(x)$ зависит от переменных $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$, значения которых требуется установить в результате эксперимента. О виде данной функции известно лишь, что она в области экспериментальных данных может быть достаточно хорошо аппроксимирована конечным рядом (1) с использованием некоторых заранее заданных соотношений Эта функция и носит название поверхности отклика.

Нахождение функции $\eta(x)$ и будет являться результатом построения математической модели. Для чего используем экспериментальные данные, приведенные в таблице 1.

Необходимо найти наиболее точное описание функции $\eta(x)$. Поскольку целью эксперимента является определение оценок θ или оценки поверхности отклика $\eta(x, \theta)$ в некоторой заданной области X_0 , то обязательно требуется учитывать, что результаты наблюдений – случайные величины (в простейшем случае результат наблюдения является суммой истинного значения $u_{\text{ист}}$ и случайной помехи), то, опираясь на них невозможно получить реальные значения $\theta_{\text{ист}}$ для физических величин.

Возможно только получение неких параметров $\tilde{\theta}$, которые случайным образом связаны с результатами эксперимента:

$$\tilde{\theta} = \Psi \left(y_1/x_1, y_2/x_2, \dots, y_n/x_n \right)$$

Где y_i – результат наблюдения в точке x_i . Величины $\tilde{\theta}$ называют x_i (точечными) оценками для $\theta_{ист}$. Некоторые значения x_i могут для различных i совпадать между собой.

Для оценки величин, полученных в результате каких-либо экспериментов или для определения поверхности отклика в предположении о справедливости (1) применяется регрессионный анализ, а эксперименты, произведенные по данной методике, называются регрессионными. Для того, чтобы величины $\tilde{\theta}$ имели ценность для практического применения они, по возможности, должны быть состоятельными, достаточными, эффективными и несмещенными.

Оценки – называются несмещенными оценками, в том случае, когда реальные значения параметров равны величине их математических ожиданий.

$$E[\tilde{\theta}] = \theta_{ист}$$

Величины $\tilde{\theta}_N$ – называются состоятельными, если они сходятся к истинным значениям величин по вероятности:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P \left[\left(\tilde{\theta}_N - \theta_{ист} \right)^T \left(\tilde{\theta}_N - \theta_{ист} \right) \geq \varepsilon \right] = 0$$

Для данного выражения индекс N означает, что оценка $\tilde{\theta}_N$ получена в результате N измерений; ε – любое наперед заданное положительное число; величина $P[A \geq \varepsilon]$ это вероятность события $A \geq \varepsilon$.

Несмещенные оценки можно считать эффективными, если для дисперсионной матрицы D выполняется неравенство:

$$D(\tilde{\theta}) \leq D(\tilde{\tilde{\theta}})$$

здесь $D(\tilde{\theta})$ – матрица оценок $\tilde{\theta}$, а $D(\tilde{\tilde{\theta}})$ – матрица произвольных несмещенных оценок $\tilde{\tilde{\theta}}$.

Область допустимых значений функций, на которой производятся измерения, сравнительно невелика и экспериментальные условия внутри нее почти постоянны, следовательно предположение о равноточности измерений вполне оправдано. При выяснении механизма получения ошибки модели обычно задают широкие области X , в которых предположение об однородности экспериментальных условий недопустимо. Однако при этом во многих случаях удается построить функцию эффективности эксперимента $\lambda(x)$, которая позволяет сравнивать значение ошибок дисперсии измерений в различных точках:

$$\lambda(x) = \sigma^{-2} \bar{\lambda}(x) = \sigma^{-2}(x)$$

В тех случаях, когда константа σ^2 неизвестна, можно найти её оценку:

$$\hat{\sigma}^2 = (n - m)^{-1} \sum_{i=1}^n \bar{\lambda}(x_i) [y_i - \theta^T f(x)]^2$$

Обычно для удобства заменяют σ_i^{-2} на $\hat{\sigma}_i^2$ и в результате соответствующие оценки оказываются наиболее близкими к наилучшим линейным оценкам.

Как было указано выше, математический аппарат для данного метода развивался изначально на основе того факта, что процесс измерения управляющих параметров является детерминированным. В реальности данное требование чаще всего не выполняется. Ошибки при измерениях связаны и с погрешностью аппаратуры, и с методикой эксперимента и с ошибками при проведении эксперимента. Если величина ошибки незначительна, то применение аппарата регрессионного анализа не приведет к погрешностям вычислений. В случае значительных погрешностей, параметры могут оказаться несостоятельными или смещенными, особенно в случае применения метода наименьших квадратов.

Для получения интересующих нас значений θ широко используется метод последовательных приближений (итерационный метод), основанный на принципах регрессионного анализа. При этом возможные ошибки в управляющих переменных не учитываются.

Данный подход заключается в следующем:

Составляется сумма

$$M_0 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \eta(x_i, \theta) - \frac{1}{2} (\nabla_{2i} d_{2i}) \right]^2 \omega_i^0$$

Где $\omega_i^0 = \sigma_i^{-2} = \sigma^{-2}(x_{0i})$.

Определяются значения θ_0 , при которых достигается минимум M_0 (при постоянных ω_i^0).

Затем подсчитываются величины $\nabla_{2i}^2 (\theta_0) d_{2i}$.

Составляется сумма

$$M_1 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \eta(x_i, \theta) - \frac{1}{2} (\nabla_{2i} d_{2i}) \right]^2 \omega_i^1,$$

где $\omega_i^1 = \left[\sigma_i^2 + (\nabla_{2i}^2 (\theta_0) d_{2i}) \right]^{-1}$.

Отыскиваются значения θ_1 , при которых достигается минимум M_1 . Вычисления прекращаются при достижении

$$\max_{\alpha} \left| \frac{\theta_{\alpha s} - \theta_{\alpha(s-1)}}{\theta_{\alpha(s-1)}} \right| \leq \gamma \quad (\alpha = 1, 2, \dots, m),$$

где γ – некоторое наперед заданное положительное число. При отыскании минимума квадратичных форм M_s обычно используют программы метода наименьших квадратов.

Учитывая вышесказанное, предложенная модель может быть представлена в следующем виде (формула 2):

$$y = \beta_0 + x'\beta + x'Bx + \gamma_0 + z'y + x'Dz + \varepsilon, \quad (2)$$

где $x' = (x_1, x_2, x_3)$ – вектор параметров управления, а $z' = (z_1)$ массив случайных (подстановочных) параметров, β и γ – соответствующие коэффициенты вектора. B – квадратичная матрица параметров, в которой проявляются зависимости между управляющими факторами. D – треугольная матрица в которой представлены зависимости между управляющими и случайными (подстановочными) параметрами.

Параметры модели – предварительно неизвестные константы. ε – случайная переменная, имеющая нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием и отклонением σ^2 . Ещё одним параметром данной модели является параметр z , который имеет такие же, как и предыдущий параметры, только среднеквадратичным отклонением для него является параметр σ_z^2 . Результатом данной модели должно стать нахождение среднего, математического ожидания и среднеквадратичного отклонения для выражения (2). Использование модели в виде уравнения (2) должно быть проведено для каждой из величин: среднего $E_z(y)$ и среднего отклонения $V_z(y)$.

Первая модель для $E_z(y)$ имеет следующий вид:

$$\mu = E_z(y) = \beta_0 + x'\beta + x'Bx \quad (3)$$

Если данная модель строится исходя из предположения, что входящие в неё величины имеют ноль в качестве математического ожидания, то её можно записать в следующем виде:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'\hat{\beta} + x'Bx \quad (4)$$

Модель для среднеквадратичного отклонения имеет следующий вид:

$$V_z(y) = (\gamma + x'D)V(z)(\gamma + x'D) + \sigma^2 \quad (5)$$

$$\hat{V}_z(y) = (\hat{\gamma} + x'\hat{D})(\hat{\gamma} + x'\hat{D}) + \sigma^2 \quad (6)$$

Процесс получения при помощи экструдера, как наиболее распространенный вариант возможен двумя способами:

- 1) Двухстадийный. Сначала получение компаунда, затем непосредственно экструдирование (рисунок 2).
- 2) Одностадийный. Когда получение компаунда и экструдирование объединены в рамках одного процесса (рисунок 3).

Двухстадийная схема обычно применяется для крупных производств, у которых процессы приготовления исходных компонентов и готовых изделий могут происходить в разных цехах и в разное время. В этом случае древесные опилки сначала сушатся пока их влажность не будет превышать порядка 1%. Затем эта мука помещается в отдельный бункер. В другой бункер помещается смола (обычно полиэтилентерефталат).

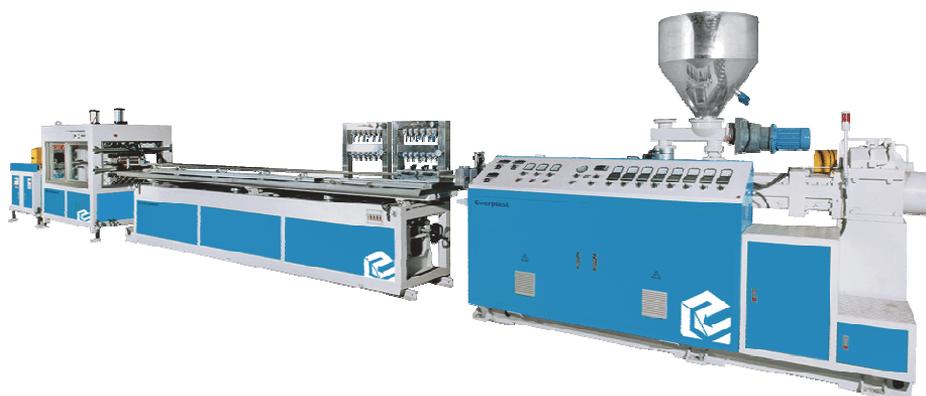


Рисунок 2 – Оборудование для изготовления ДПК (производство Китай)

После чего оба компонента через дозирующую установку попадают в смеситель, где при повышенной температуре к ним добавляют различные добавки, которые могут достаточно существенно влиять на свойства композита. Затем полученную смесь гранулируют и охлаждают. Окончательно в экструдере гранулы снова нагревают до пластичного состояния и подают на калибраторы.



Рисунок 3 – Оборудование для изготовления ДПК (производство Германия)

Второй способ обычно используется в менее крупных производствах. При нем все необходимые вещества подаются в экструдер одновременно. Древесные опилки также как и в первом случае сначала проходят через сушильный блок после чего смешиваются со смолой и связующими веществами через доза-

тор в смесительном барабане, затем подаются в экструдер, где окончательно перемешиваются и нагреваются до пластичного состояния.

Следует отметить, что древесные материалы и пластики склонны к температурной деградации при температуре, превышающей $\sim 100^{\circ}\text{C}$. Поэтому в процессе производства особое внимание следует уделять температурному состоянию композита, а также, по возможности, стремиться к уменьшению времени его пребывания при повышенной температуре. Из чего следует, что важным этапом получения древесных композитов является процесс их кондиционирования.

Схема процесса получения древесно-полимерного композита приведена на рисунке 4.

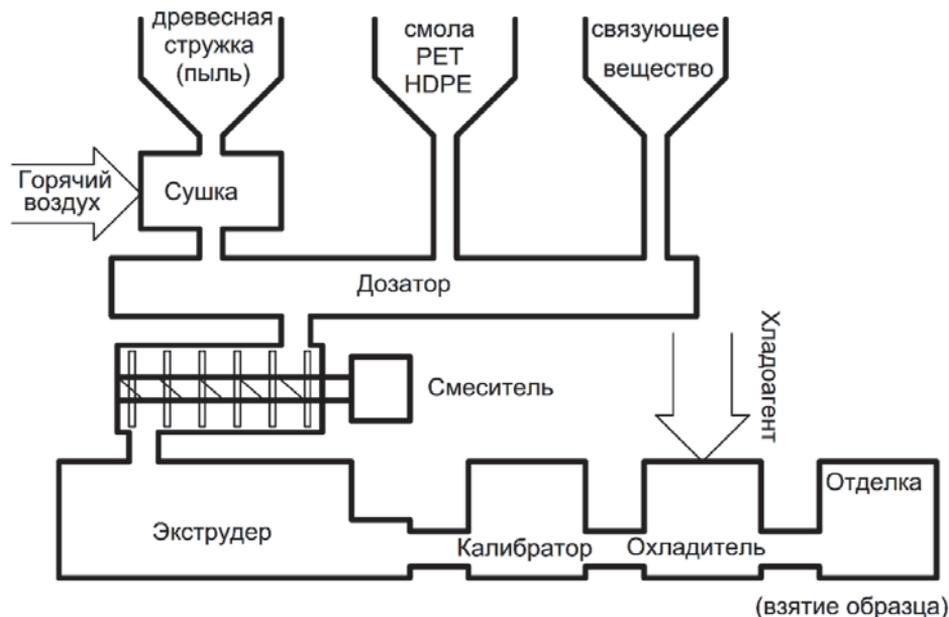


Рисунок 4 – Одностадийный процесс получения ДПК

При проведении исследований опилки были рассортированы по фракциям для изучения влияния размеров частиц на качество получаемого композита. Все три компонента получаемого композита: опилки, связующее вещество и полиэтилентерефталат, использующийся в качестве смолы, были дегидратированы с использованием сушильного шкафа в течении нескольких часов. После чего была определена масса каждого из компонентов. Экструдирование проводилось при различных температурах в диапазоне от 200 до 260°C . Результаты экспериментов сведены в таблицу 1.

Помимо изменения температурного диапазона экструдера и фракций основных опилок, изменялись концентрации полиэтилентерефталата, а также связующих веществ. При воздействии инертной атмосферы и достаточно высокой скорости смешивания опилок со смолой влияние высокой температуры экструдера не могло существенным образом повлиять на скорость деградации исходных веществ. Окончательный цвет ДПК незначительно отличался от цвета исходной древесины, что позволило предположить справедливость гипотезы о незначительных температурных деградациях. В результате эксперимента были

проверены разные связующие вещества в их взаимодействии с полиэтилентерефталатом.

Испытания на растяжение и изгиб проводились на универсальной разрывной машине со скоростью рабочего хода 1 мм/мин. Данные измерений приведены в Мпа.

В таблице 1 показаны результаты экспериментов. Отображены факторы, влияющие на полученное качество композита, а также приведена матрица коэффициентов влияния управляющих и случайных параметров.

Таблица 1 – Результаты эксперимента и исходные данные

Номер	Исходные данные				Кодировка				Эксперимент	
	ПЭ	Связ	Част	Древ	x ₁	x ₂	x ₃	z ₁	Y ₁	Y ₂
1	0.75	PE	2	20	-1	1	1	1	11.6	2.8
2	0.75	PP	1	10	-1	-1	-1	-1	12.8	2.1
3	0.75	PE	2	10	-1	-1	1	1	15.2	2.7
4	0.75	PE	1	10	-1	1	1	-1	18.5	4.4
5	0.75	PP	2	10	-1	-1	-1	1	23.3	4.04
6	0.84	PP	1	20	1	-1	-1	-1	15.7	2.05
7	0.84	PE	2	10	1	-1	1	1	19.3	2.85
8	0.84	PP	2	20	1	-1	-1	1	14.2	1.2
9	0.84	PP	2	20	1	1	-1	1	11.33	2.6
10	0.84	PE	1	20	1	1	1	-1	18.1	2.8
11	0.84	PP	1	20	1	1	-1	-1	20.7	2.04
12	0.75	PP	1	10	-1	1	-1	-1	21.35	3.0
13	0.84	PE	2	20	1	1	1	1	19.2	3.6
14	0.75	PE	1	10	-1	-1	1	-1	21.6	2.6
15	0.75	PP	2	10	-1	1	-1	1	17.57	2.2
16	0.84	PE	1	20	1	-1	1	-1	23.1	3.7

В данной таблице применены следующие сокращения **ПЭ** – тип полиэтилена, **Связ** – тип связующего (**PE** – полиэтилен, **PP** – полипропилен), **Част** – размер древесных частиц, **Древ** – процент содержания древесины в композите.

Таблица 2 показывает какие факторы учитывались при разных исследованиях. В экспериментах была использована термопластическая смола PET (ПЭТ) с высокой и низкой вязкостью, обозначенная соответственно, как PET 0.75 и PET 0.84. Также в качестве добавок были использованы рекомендуемые в описаниях полиэтилен и полипропилен.

Таблица 2 – Кодировка исходных данных

Кодировка	x ₁	x ₂	x ₃	z ₁
Параметр	Тип наполнителя	Процент опилок %	Тип связующего	Размер опилок, мм
от	0.75	10	Полипропилен ПП (PP)	1
до	0.84	20	Полиэтилен ПЭ (PE)	2

С помощью таблицы 1 была получена следующая формула для γ_1 , используемая в модели:

$$\gamma_1 = 17.7 - 0.45x_2 + 1.67x_1x_3 + 0.7x_1x_2z_1 + 1.72x_1x_3z_1 - 1.04x_2x_3 + 1.69x_2x_3z_1 - 0.41x_1z_1 - 1.27x_2z_1 - 1.25z_1 + 0.62x_3 - 0.74x_3z_1 - 0.03x_1 - 0.06x_1x_3 \quad (7)$$

В данной модели присутствуют величины значениями которых можно пренебречь, так как их вклад не значителен. Это $0.03x_1$ и $0.06x_1x_3$.

Данный эксперимент проводился как факторный план, а значит результаты и экспериментальные данные были проанализированы с помощью дисперсионного анализа, который дает следующие статистические результаты:

$$MS_{error} = 0.2, R_{adj}^2 = 98.7\%$$

$$\text{Standard error } \hat{\sigma} = 0.45$$

В соответствии с моделью, описанной формулой (7) были определены математическое ожидание:

$$E_z(Y_1) = 17.8 - 0.02x_1 + 0.04x_1x_2 + 1.6x_1x_3 - 0.45x_2 - 1.04x_2x_3 + 0.5x_3 \quad (8)$$

С учетом того факта, что коэффициент $\sigma_z^2 = 1$ выражение для среднего квадратичного отклонения может быть представлено в следующем виде

$$V_z(Y_1) = (-1.25 - 0.44x_1 + 0.75x_1x_2 + 1.76x_1x_3 - 1.1x_2 + 1.73x_2x_3 - 0.73x_3)^2 \quad (9)$$

Управляющий коэффициент x_1 и коэффициент совместного влияния x_{12} были исключены из данной модели поскольку их влияние пренебрежимо мало. Значения погрешностей для данной модели имеют следующий вид:

$$MS_{error} = 0.44, R^2 = 99.5, R_{adj}^2 = 99.42$$

Что подтверждает правильность изначального предположения о нормальном распределении.

Для параметра Y_2 можно получить следующее выражение:

$$Y_2 = 2.3 - 0.2x_1 + 0.25x_1x_3 - 0.3x_1x_2x_3 + 0.5x_1x_2z_1 + 1.56x_1x_3z_1 - 0.1x_2 + 0.38x_3 - 0.15x_3z_1 + 0.01x_1x_3 - 0.05z_1 - 0.08x_2z_1 + 0.06x_2x_3 \quad (10)$$

Последними четырьмя параметрами в данной формуле можно пренебречь вследствие их малости. С учетом этого погрешности в данном выражении можно оценить как:

$$MS_{error} = 0.1, R_{adj}^2 = 98.4\% \text{ Standard error } \hat{\sigma} = 0.26$$

В связи с этими данными эту модель можно считать статистически достоверной.

Окончательные выражения для данной модели в терминах математического ожидания и среднего квадратичного отклонения могут быть записаны в следующем виде:

$$E_z(Y_2) = 2.8 - 0.2x_1 + 0.01x_1x_2 + 0.25x_1x_3 - 0.26x_1x_2x_3 + 0.12x_2 + 0.4x_3 \quad (11)$$

$$V_z(Y_2) = (-0.05 - 0.08x_1 + 0.48x_1x_2 + 0.2x_1x_3 - 0.15x_3 + 0.08x_2x_3)^2 \quad (12)$$

На графиках, приведенных на рисунке 5 и 6 показаны результаты работы моделей, показывающих математическое ожидание для величин $E_z(Y_1)$ и $E_z(Y_2)$. На этих графиках показаны наилучшие соотношения для управляющих параметров, определяющих максимальные значения продольной и изгибающей силы. Максимальные соотношения достигнуты для марки ПЭТ 0,84 при процентном содержании древесного наполнителя порядка 10. Максимальные достигнутые значения порядка 200 МПа для растяжения и 30 МПа для изгиба.

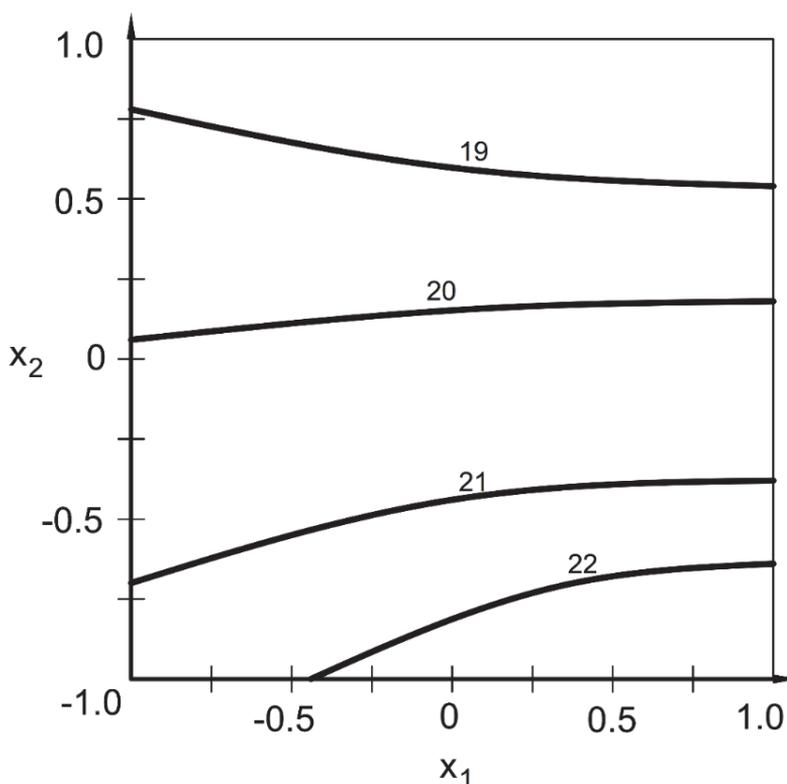


Рисунок 5 – График мат. ожидания для параметра Y1

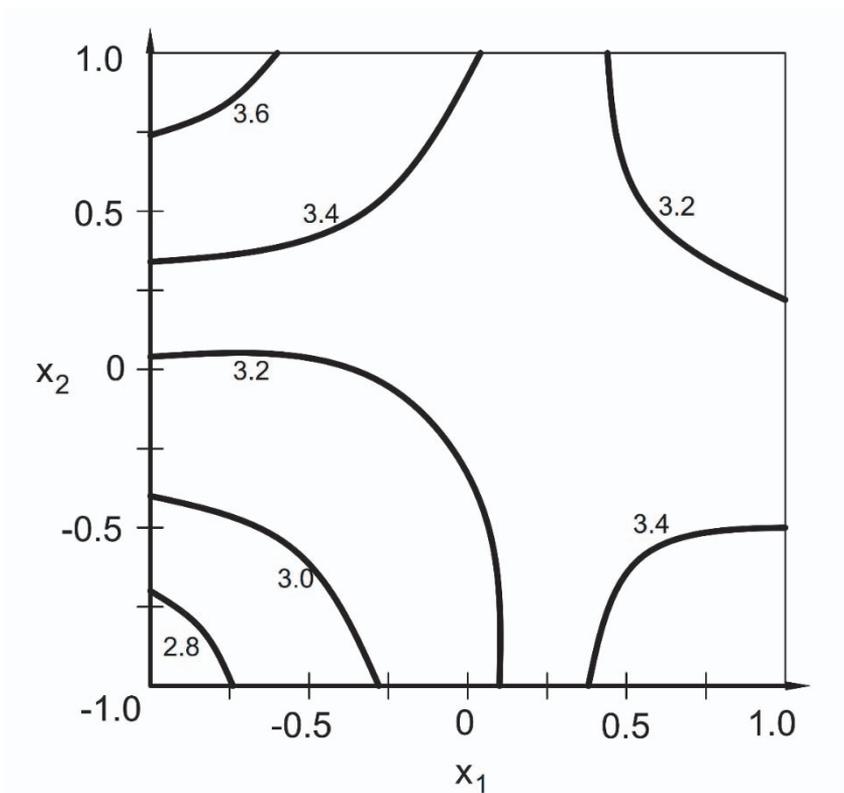


Рисунок 6 – График мат. ожидания для параметра Y2

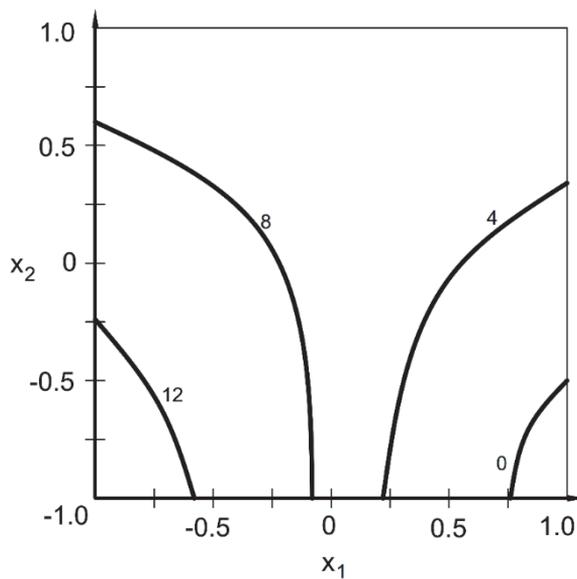


Рисунок 7 – График среднеквадратичного отклонения для параметра Y1

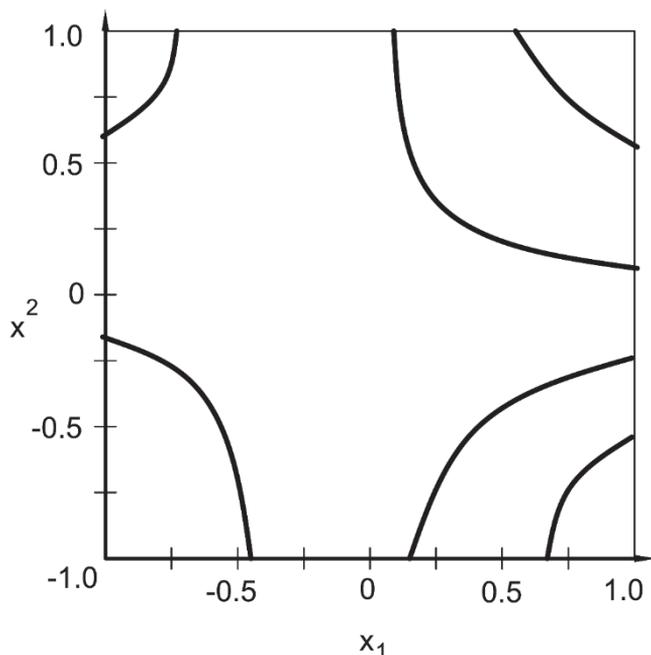


Рисунок 8 – График среднеквадратичного отклонения для параметра Y2

На графиках приведенных на рисунках 7 и 8 приведены управляющие параметры в наименьшей степени, влияющие на окончательные значения для продольной и изгибающей сил (имеющие наименьшее среднеквадратичное отклонение). Оптимально для изгиба наименьший разброс параметров обеспечивается при минимальном размере древесной фракции.

Результаты расчета моделей, построенных в данной статье получены с применением линейной регрессии, которая подтвердила согласованность результатов с экспериментальными данными. В качестве исходных данных было задано несколько управляемых параметров таких как тип полиэтилентерефталата, процентное содержание древесного сырья в композите, а также несколько типов связующего вещества. Размер древесных опилок был выбран как неуправляемый (случайный) фактор. Были определены факторы, которые в наибольшей степени влияют на прочность композиционного материала, а также результат влияния возможного отклонения данных факторов с помощью критериев оценки надежности результатов для готовых изделий.

Литература

1. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии. М.: Изд-во Интеллект, 2009. 352 с.
2. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
3. Мюллер А. Окрасивание полимерных материалов СПб.: Профессия, 2006. 280 с.

4. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. 658 с.
5. Раувендааль К. Экструзия полимеров СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 768 стр.
6. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы М.: Мир, 1973. 302 с.
7. Сергиенко И.В. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации Киев: Наукова Думка, 1980. 275 с.
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 590 с.
9. Черноруцкий И. Методы оптимизации и принятия решений: Учебное пособие СПб.: Лань, 2001. 384 с.
10. Ширяев В.И. Исследование операций и численные методы оптимизации М.: Ленанд, 2017. 224 с.

УДК 669.017

Объяснение аномалий формирования структуры и физико-механических свойств сталей и сплавов

К.Ю. Шахназаров, доктор технических наук,
доцент кафедры «Материаловедения и технологии художественных изделий»,
С.А. Вологжанина, доктор технических наук, профессор кафедры
«Материаловедения и технологии художественных изделий»,
Р.М. Хузнахметов, аспирант кафедры
«Материаловедения и технологии художественных изделий»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»
(Санкт-Петербургский горный университет), г. Санкт-Петербург

В представленной статье на основании совместного анализа диаграмм фазового равновесия и аномалий физико-механических свойств многокомпонентных сплавов сделано предположение, что ответственными за аномалии свойств являются находящиеся в сплавах промежуточные фазы. Разработан единый для сталей, цветных и аморфных сплавов критерий оценки свойств по виду диаграмм фазового равновесия. Разработанный критерий позволяет дать объяснение аномалиям свойств сплавов, а также прогнозировать последние по виду диаграмм фазового равновесия.

Диаграмма фазового равновесия, ликвидус, солидус, интервал кристаллизации.

Explanation of anomalies of structure formation and physical-mechanical properties of steels and alloys

K.Y. Shakhnazarov, Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Materials Science,
S.A. Vologzhanina, Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Materials Science,
R.M. Khuznakhmetov, Graduate student of the Department of Materials Science,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Saint Petersburg Mining University»
(Saint Petersburg Mining University), Saint Petersburg

Based on the joint analysis of phase equilibrium diagrams and anomalies of physical and mechanical properties of multicomponent alloys the assumption that the intermediate phases in the alloys are responsible for the anomalies of properties is made in the presented article. A unified criterion for evaluating the properties of steels, non-ferrous and amorphous alloys by the type of phase equilibrium diagrams has been developed. The developed criterion makes it possible to explain anomalies in the properties of alloys, as well as to predict the latter by the type of phase equilibrium diagrams.

Phase equilibrium diagram, liquidus, solidus, crystallization interval.

ВВЕДЕНИЕ

Весьма трудозатратные в построении диаграммы состояния (фазовых областей, фазовых равновесий) дают представление о т.н. «металлографической структуре» (наиболее известные справочники диаграмм состояния Хансена и Андерко, Эллиота, Шанка называются «Структуры двойных сплавов»).

О значении структуры для объяснения и управления свойствами имеются взаимоисключающие суждения.

А.П. Гуляев считает: «Между видом диаграммы состояния и свойствами сплава должна существовать определенная связь»; Н.И.Беляев, Н.Т.Гудцов: «Видимый предел упругости (предел текучести. – Авт.) не имеет никакой связи со структурой стали, а пользование им вносит только путаницу в общие представления о технических свойствах стали»; А.А. Бочвар: «Однозначной зависимости между составом и свойствами, как оказалось, вообще не существует»; И.И. Корнилов: «Но какую-либо строгую связь твердости с диаграммой состояния установить трудно» [2, 6, 7, 12].

Таким образом, аномалии свойств и отсутствие их связи со структурой сплавов-смесей и диаграммой состояния известны более ста лет, но не нашли объяснения.

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время отсутствует единая классификация промежуточных фаз (химических соединений постоянного состава) на основе какого-либо единственного признака. В связи с этим методической основой исследования являются:

1. В 1928 г. Н.С. Курнаков, Н.В. Агеев и С.А. Погодин отказались от закона Курнакова «теоретически установленного Н.С. Курнаковым и С.Ф. Жемчужным» в 1908 г. [15].

2. М. Хансен: «Промежуточная фаза может обладать выраженными химическими свойствами, подобными свойствам химических соединений, не будучи по характеру своей структуры соединением» [23].

3. Определенный Н.С. Курнаковым критерий наличия промежуточной фазы – «то максимум, то минимум, то просто перелом на кривых изменения свойств... однако для использования этих кривых принципиально безразлично, чем именно объясняются наблюдаемые отступления» [15], как и состояние сплава – жидкое или твердое, т.к. их физические свойства весьма близки [15, 16].

4. По мнению Д.А. Петрова: «Результаты, полученные для систем с непрерывным рядом твердых растворов легко распространить на системы, образующие эвтектические смеси твердых растворов» [17]. Это дает выявления промежуточных фаз по формальным признакам, что в свою очередь может быть интересно поскольку наличие промежуточных фаз приводит к аномалиям на кривых «свойство – состав», что может быть использовано для прогнозирования эксплуатационных свойств сплавов.

В представленной работе приняты следующие показатели наличия промежуточных фаз:

1. Экстремумы на кривых «состав – свойство» сплавов, исходя из утверждения Н.С. Курнакова: «что не состав характеризует определенное химическое

соединение, ... а состав, отвечающий сингулярной точке на кривой различных свойств» [15];

2. Качественное изменение интервала кристаллизации (перекристаллизации) (K_{Δ}), что является характерным признаком экспериментально установленных химических соединений постоянного состава (конгруэнтно и инконгруэнтно плавящихся промежуточных фаз, образующихся в твердом состоянии, соединений типа σ -фазы).

Второй признак проиллюстрируем на примере экспериментально установленных химических соединений постоянного состава (промежуточных фаз), которые являются основой промышленно используемых твердых сплавов – карбидов: WC (рис. 1), TaC (рис. 2) и TiC (рис. 3).

Формирование карбида WC – соответствует перитектической точке (рис. 1), где имеет место скачок интервала кристаллизации, т.е K_{Δ} [24].

Конец эвтектической горизонтали (рис. 2), где имеет место K_{Δ} поскольку интервал кристаллизации максимален (левее и правее эвтектической точки интервал кристаллизации уменьшается) строго соответствует формированию карбида TaC. Формирование карбида W_2C также строго соответствует концу эвтектической горизонтали, где K_{Δ} самоочевидно (рис. 2).

В дистектической точке на диаграмме, где интервал кристаллизации нулевой (далее влево и вправо он начинает расширяться, что означает K_{Δ}) формируется карбид TiC (рис. 3) [24].

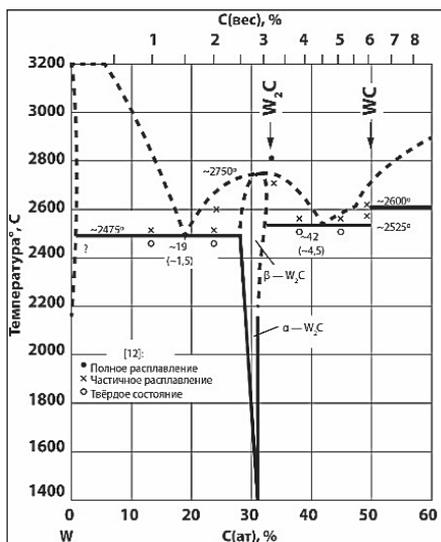


Рисунок 1 – Диаграмма фазового равновесия системы W – C [24]

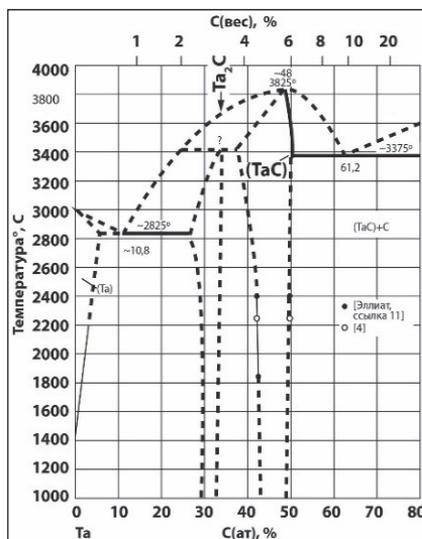


Рисунок 2 – Диаграмма фазового равновесия системы Ta – C [24]

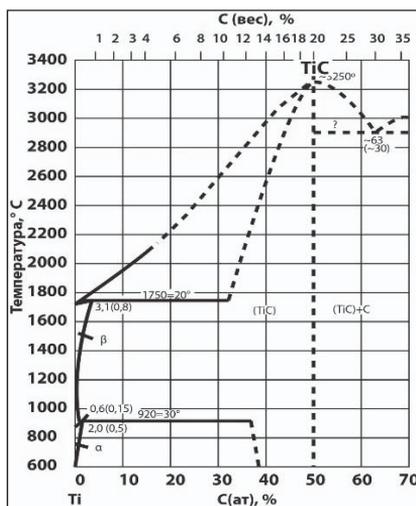


Рисунок 3 – Диаграмма фазового равновесия системы Ti – C [24]

Приведенные выше карбиды формируются по разному, но их объединяет одно – качественное изменение интервала кристаллизации K_{Δ} .

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее наглядным примером использования разработанного критерия является система Fe – Cr (рис. 4).



Рисунок 4 – Диаграмма фазового равновесия системы Fe – Cr [10]

Резкое увеличение коррозионной стойкости, электросопротивления и теплопроводности сплавов с содержанием Cr более 1% [27] соответствуют нулевому интервалу кристаллизации, т.е. происходит его качественное изменение (K_{Δ}).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Связь аномалий свойств силуминов с K_{Δ} . Ликвидус у силуминов линейный от ~ 4 до ~ 8% Si, а на участках 0 – ~ 4% Si и ~ 8 – 12% Si криволинейный, при % Si > ~ 85% ликвидус из криволинейного становится прямолинейным (рис. 5). В эвтектических системах солидус является горизонталью, следовательно при ~ 4, ~ 8, ~ 85% Si имеет место K_{Δ} , как и при ~ 1,5% Si (конец эвтектической горизонтали) и ~ 12% Si (эвтектическая точка) [18]. Итого – 5 K_{Δ} .

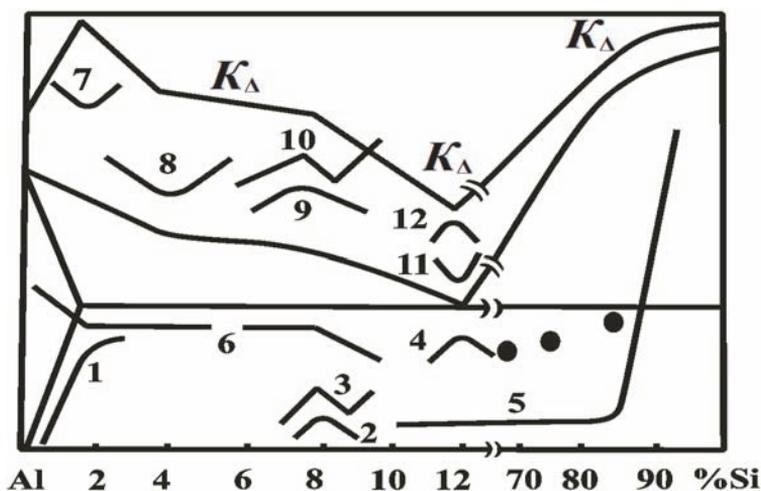


Рисунок 5 – Зависимость от содержания кремния свойств и K_{Δ} , где • – твердость порошковых силуминов (остальные пояснения см. в тексте)

Резко замедляется рост электросопротивления ρ (рис. 5, кр. 1), а у расплава минимум ρ и плотности (рис. 5, кр. 7) при ~ 1,5% Si [18]. Минимум жидкоте-

кучести (рис. 5, кр. 8) находится при $\sim 4\%$ Si [18]. Экстремумы магнитной восприимчивости в жидком и твердом состояниях (рис. 5, кр. 2, кр. 9), максимумы электросопротивления в тех же состояниях (кр. 2, кр. 10), а также изгиб кривой линейной усадки (рис. 5, кр. 9) при $\sim 8\%$ Si, что фактически свидетельствует о наличие фазы $\sim \text{Al}_{11}\text{Si}$ [13]. Расплавы имеют максимум плотности (рис. 5, кр. 12), максимумы σ_B и δ (рис. 5, кр. 4), минимум ρ (рис. 5, кр. 11) при $\sim 12\%$ Si [18]. Неизменность линейной усадки между двумя K_Δ при $\sim 1,5$ и 8% Si (рис. 5, кр. 6) [11].

Таким образом, все пять K_Δ дают объяснения аномалиям физико-механических свойств силуминов.

Связь максимальной (или повышенной) пластичности при максимальной (или повышенной) прочности цветных сплавов и стали с K_Δ . В системе Cu – Mn [31] приводятся одновременные максимумы σ_B , ψ и δ при 40% Mn (рис. 6 а). Такое аномальное поведение прочностных и пластических характеристик отвечает нулевому интервалу кристаллизации (при 40% Mn ликвидус и солидус соприкасаются, подобно эвтектическим сплавам) (рис. 6 а), т.е. K_Δ .

У латуни (рис. 6 з) максимум пластичности (δ) ($\sim 32\%$ Zn), как у равновесной (при $\sim 13\%$ Sn), так и неравновесной (при $\sim 8\%$ Sn) бронзы соответствуют концам перитектических горизонталей (рис. 6 б, в) [31].

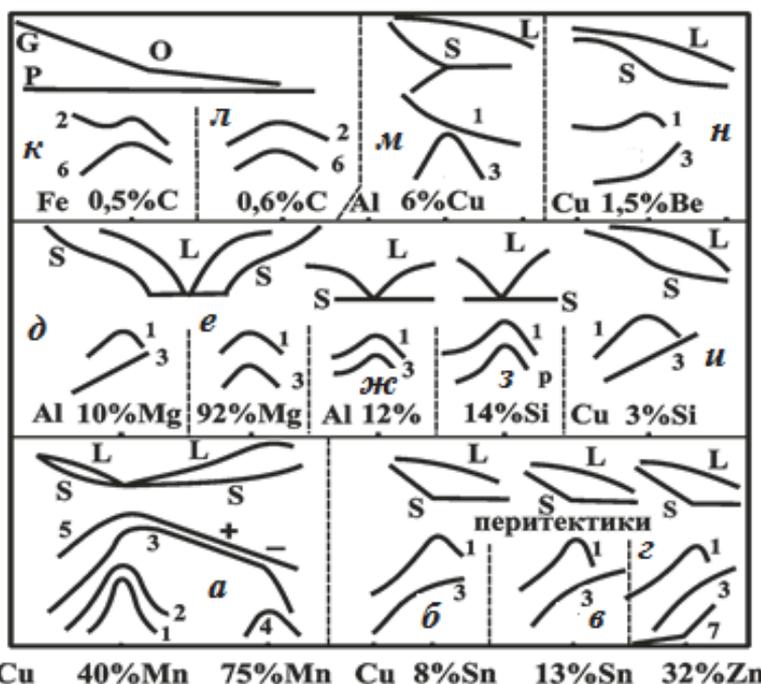


Рисунок 6 – Схематизированная зависимость от содержания второго компонента δ (1), ψ (2), σ_B (3), КСЧ (4), термоЭДС (5), σ_S (6), твердость (7). а – сплавы Cu – Mn; б, в – неравновесная и равновесная оловянистая бронза; з – однофазная латунь; д – магналий; е – сплавы Mg – Al; ж – литой в землю, или кокиль, или деформированный силумин; з – модифицированный силумин; и – кремнистая бронза; к – литая отожженная сталь; л – нормализованная сталь; м – состаренный дуралюмин; н – бериллиевая бронза

В этих трех случаях имеет место K_{Δ} . В сплавах алюминия с магнием ($Al + \sim 10\% Mg$ и $Al + \sim 92\% Mg$) солидусы выпуклые в сторону расплава, что при монотонных ликвидусах означает K_{Δ} им отвечают одновременные максимумы δ и σ_B (рис. 6 *д, е*) [31]. Имеющие кардинально разную структуру литые в землю, или кокиль, или деформированные на 86% силумины (рис. 6 *жс*), как и модифицированные (рис. 6 *з*), имеют одновременные максимумы δ и σ_B [31], что отвечает эвтектической точке, т.е. K_{Δ} . Максимумы δ при росте σ_B у бериллиевой при 1,5% Be (рис. 6 *и*) и кремнистой при 3% Si (рис. 6 *и*) бронз отвечают изгибам солидуса, поскольку ликвидус меняется монотонно, это означает K_{Δ} . У дуралюмина состава конца эвтектической горизонтали ($\sim 6\% Cu$), где K_{Δ} самоочевидно максимумы σ_B и σ_0 , не отвечают минимумам пластичности, что свидетельствует о ее повышенных значениях (рис. 6 *м*). У литой отожженной стали с 0,53% C повышенное ψ при максимуме σ_S [31] (рис. 6 *к*). У нормализованной стали с 0,6 % C ψ и σ_S выше, чем у ближайших сталей с 0,49 и 0,69% C (рис. 6 *л*). Максимумы ψ и σ_S близки по составу к точкам *B* и *O* диаграммы железо-углерод, где имеет место K_{Δ} .

Аномалии свойств стали с $\sim 0,5\%$ C. Изгиб ликвидуса в точке *B* диаграммы железо-углерод самоочевиден, т.е. имеет место K_{Δ} (рис. 7).

При содержании углерода более 0,5%: мартенсит меняет морфологию от дислокационной к двойникованной, становится катастрофически хрупким, несмотря на то что является твердым раствором; становится тетрагональным во время закалочного охлаждения, почти не упрочняется углеродом; предел текучести феррито-цементитной смеси независимо от формы цементита начинает даже понижаться; модули Юнга и сдвига, как после закалки, так и после отжига имеют минимум; интервал мартенситного превращения начинает уменьшаться; феррит теряет способность быть видманштеттовым, что объясняют отсутствием в аустените «пакетов дислокационных плоскостей скольжения», облегчающих «возникновение зародышей феррита внутри аустенитных зерен». Максимумы твердости аустенита при 910 и 1000 °C [28, 30, 32] (рис. 7).

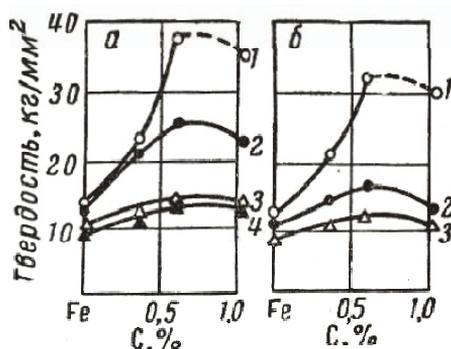


Рисунок 7 – Кривые твердости аустенита в зависимости от содержания углерода при 910 (*а*) и 1000°C (*б*). Время выдержки индентора 15 сек (1), 1 мин (2), 5 мин (3) и 10 мин (4) [12]

Энергия активации вязкого течения, кинематическая вязкость, плотность и поверхностное натяжение, электросопротивление расплава и аустенита имеют максимум при $\sim 0,5\%$ C [30]. Магнитная восприимчивость расплава и аустенита,

электронные характеристики (концентрация носителей и частота релаксации) имеют минимум при $\sim 0,5\% \text{ C}$ [30] (рис. 8).

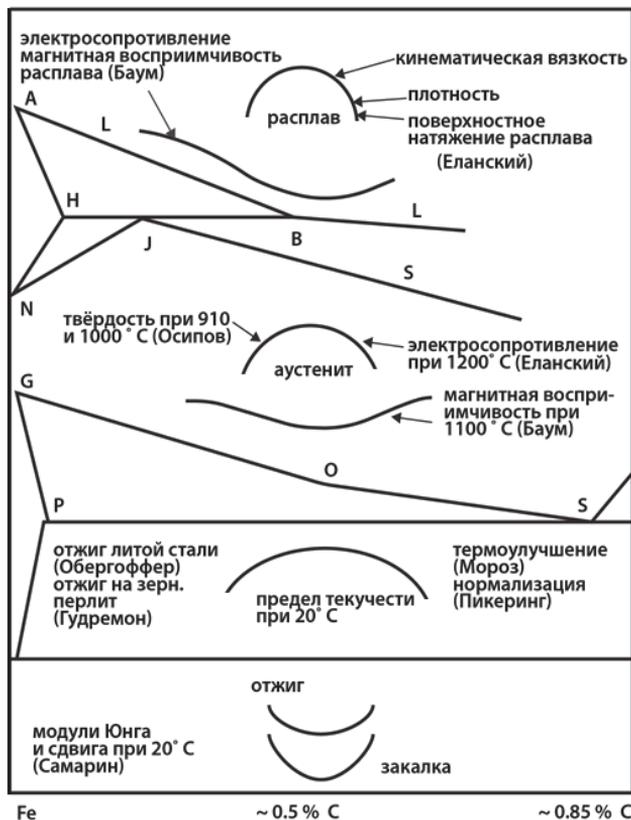


Рисунок 8 – Схематизированная часть диаграммы Fe – C и зависимость свойств от % C

В точке B ($0,5\% \text{ C}$) изгиб линии ликвидуса очевиден, что согласно Н.С. Курнакову свидетельствует о наличии соединений. Это подчеркивается названием работы 1901 г. «Нахождение состава определенных соединений по методу плавкости», т.е. по форме линии ликвидуса [15].

Признаки наличия промежуточной фазы $\sim \text{Fe}_4\text{C}$ ($\sim 0,5\% \text{ C}$), образующейся по перитектоидной реакции при $\sim 650^\circ \text{C}$. Первым признаком являются сингулярные точки – максимумы предела текучести отожженной, нормализованной или термоулучшенной [25, 29] сталей с $\sim 0,5\% \text{ C}$.

Второй признак – тепловые эффекты не только при A_3, A_2, A_1 , но и при $\sim 650^\circ \text{C}$, обнаруженные Робертсом-Аустеном, Осмондом, Роозебумом, Карпентером и Киллингом у сплавов системы Fe – C.

Аномалии свойств околоэвтектоидной стали ($\sim 0,8\% \text{ C}$). Для стали эвтектоидного состава качественное изменение интервала перекристаллизации в точке S ($\sim 0,8\% \text{ C}$) очевидно.

Состав точки S ($\sim 0,85\% \text{ C}$) – и только он – обладает яркой индивидуальностью. Его основной компонент (феррит перлита) при A_1 содержит $\sim 0,02\% \text{ C}$ (\sim

один атом углерода на ~ 1000 атомов железа). Тем не менее, трансформация феррита в аустенит происходит при ~ 725 °С, хотя это превращение в железе происходит при ~ 900 °С; для этого нужно допускать растворимость $\sim 0,85\%$ С в феррите. Обсуждать эту тему, включая умоглядные контактные явления на границе феррит – цементит, вряд ли стоит, поскольку само существование оцрешетки низкотемпературного феррита является уникальным среди металлов, т.е. аномальным, в отличие от δ -феррита.

Исходя из изложенного, есть формальные основания приписать феррито-цементитной смеси с $\sim 0,85\%$ С формулу $\sim \text{Fe}_{24}\text{C}$, которую предложил в 1885 г. Арнольд [25].

Но не только формальные: у зернистого и пластинчатого перлита с $0,85\%$ С абсолютные максимумы H и ρ среди не только доэвтектидных сталей [5, 21].

Родительская фаза перлита (гарденит – аустенит с $0,89\%$ С) находится под K_{Δ} , если принять немецкий вариант диаграммы Fe – С с провисающей линией солидуса JE [22], основанный на экспериментальных данных Н.В. Гутовского [22]. У этой линии достаточно хорошо виден изгиб (почти угол) с координатами $\sim 1200^{\circ}$, $\sim 0,9\%$ С. Этот изгиб (почти угол) при монотонной линии ликвидуса от ~ 1 до $4,3\%$ С означает K_{Δ} при $\sim 0,9\%$ С, т.е. над точкой S.

Поэтому у гарденита есть признаки промежуточной фазы, не говоря о качественном изменении интервала перекристаллизации в точке S. У гарденита (фазы Fe_{24}C) есть аналог: фаза Fe_3As_2 образуется, как и аустенит, по перитектической реакции и распадается по эвтектидной при 40 ат. % As. Вопрос только в выборе формулы: какую точку – E, J или S – выбрать для нее. Все три точки используются в других двойных системах с похожими на аустенитную областями высокотемпературных фаз.

Если исходить из феномена металлургической наследственности (она установлена экспериментально [16]), то индивид (аустенит с $\sim 0,85\%$ С) должен породить другой индивид – перлит с $\sim 0,85\%$ С.

Обсуждение металлургической наследственности вряд ли уместно, т.к. «механизм передачи наследственных признаков расплаву, их сохранение, зарождение в нем новых признаков и передача их твердому металлу – все это сложные, во многом неизученные вопросы» [16]. Поэтому ограничимся констатацией: при $0,5$ - $0,9\%$ С на кривой плотности расплавов есть площадка [1; см. данные Н.С. Косилова и Б.А. Баума]. Неизменность свойств согласно [1] свидетельствует о «расслоения в системе». Почти площадки свойств установлены Курнаковым вблизи весьма спорных фаз Cu_3Zn , Pb_3Na , FeAl_3 [15]. Такой, вероятно, может быть и $\sim \text{Fe}_{24}\text{C}$.

Для обоснования фазы $\sim \text{Fe}_{24}\text{C}$ важно следующее заключение: «из всех сплавов на основе железа лишь у чистого железа и стали эвтектидного состава ($\sim 0,8\%$ С) физический предел усталости отсутствует» [10], также и площадка на кривой предела текучести [10], что является подтверждением, индивидуальности этой фазы, как и железа. При $\sim 0,9\%$ С как для закаленного, так и отожженного состояний наблюдаются максимумы модулей Юнга и сдвига [3], что подтверждают наличие промежуточной фазы $\sim \text{Fe}_{24}\text{C}$.

Качественно одинаковый и очевидно немонотонный вид кривых модулей упругости антиподов по структуре (продуктов закалки и отжига) в работе [20] не

обсуждается, но вводится без раскрытия его сути понятие «другая дополнительная причина», созвучная «физическому состоянию вещества» [19]. Признанием промежуточных фаз $\sim\text{Fe}_{24}\text{C}$ и $\sim\text{Fe}_{42}\text{C}$ можно заменить вышеперечисленные довольно неопределенные понятия для чего есть основания: согласно [25, 29], упорядоченное распределение атомов углерода в α -твердом растворе возможно при $\% \text{C} > 0,004$, что в ~ 5 раз меньше, чем предельная растворимость углерода в феррите ($\sim 0,02\% \text{C}$). Поэтому между ферритом и мартенситом нет принципиальной разницы в способности к упорядоченному распределению атомов углерода по подрешеткам. Отсюда – качественно одинаковый ход кривых модулей упругости после закалки и отжига. При охлаждении от температуры последнего вполне возможно упорядочение атомов углерода. (Корнилов упоминает возможность упорядочения Ti_{98}C [12]).

У фазы $\sim\text{Fe}_{24}\text{C}$ есть формальный аналог – тетрагональная сверхструктура Pt_4Al с точкой Курнакова $\sim 1300^\circ\text{C}$, находящаяся под эвтектической точкой ($\sim 1500^\circ\text{C}$). «Эту фазу нельзя обнаружить термическим анализом» только она нанесена на диаграмму со значком «?»; всего в системе $\text{Al} - \text{Pt}$ 9 промежуточных фаз [23].

Можно оценить точки Курнакова предполагаемых фаз $\sim\text{Fe}_{24}\text{C}$ и $\sim\text{Fe}_{42}\text{C}$ по исчезновению при $\sim 600^\circ\text{C}$ изгиба при $\sim 0,5$ и максимума при $0,89\% \text{C}$ на кривых $\rho - \% \text{C}$ [28, 30, 32].

Косвенным доводом в пользу наличия фаз $\sim\text{Fe}_{42}\text{C}$ и $\sim\text{Fe}_{24}\text{C}$ являются качественные изменения морфологии мартенсита углеродистых сталей: при $\sim 0,5\% \text{C}$ начинается, а при $\sim 0,9\% \text{C}$ завершается трансформация дислакационного мартенсита в двойникованный. Подобные качественные изменения структуры мартенсита вряд ли можно обсуждать без учета известного влияния сверхструктур, например, Fe_3Pt , Fe_3Ni и Fe_3Al на мартенситное превращение. Г.В. Курдюмов с соавторами предупреждают о необходимости учета их влияния [14].

Однотипные максимумы модулей Юнга и сдвига и коэрцитивной силы, как закаленного, так и отожженного состояний, что исключает влияние структуры на сингулярную точку. Абсолютные максимумы теплоемкости и ее минимумы при 900 , 1000 и 1100°C [9]. Минимумы плотности аустенита и расплава [9]. Максимумы твердости и электросопротивления стали с $\sim 0,8\% \text{C}$ после обработки на зернистый и пластинчатый перлит. «В двух случаях – при содержании углерода $\sim 0,8\% \text{C}$ и у чистого железа площадка текучести отсутствует ...» [10]. (Таким образом, эвтектоидная сталь является яркой индивидуальностью, у которой, как и у железа нулевой интервал перекристаллизации). Более ста лет назад аустениту эвтектоидного состава были приписаны формула Fe_{24}C (подкарбид Арнольда) и название «гарденит» [30].

Аморфные сплавы

Система $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$

В данной системе области стеклообразования сплавов строго соответствуют эвтектическим точкам на диаграмме состояния, в которых K_{Δ} самоочевидно (рис. 9) [4].

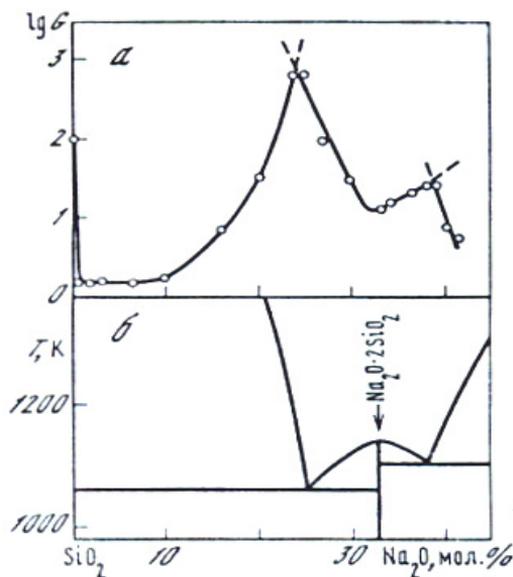


Рисунок 9 – Области стеклообразования в системе $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ (а);
диаграмма состояния $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$ (б) [4]

Система Ge – S

Области стеклообразования в этой системе [8] соответствуют сплавам близким к эвтектическому составу, а также изгибу линии ликвидус, что при монотонном солидусе (эвтектической горизонтали) означает K_Δ (рис. 10).

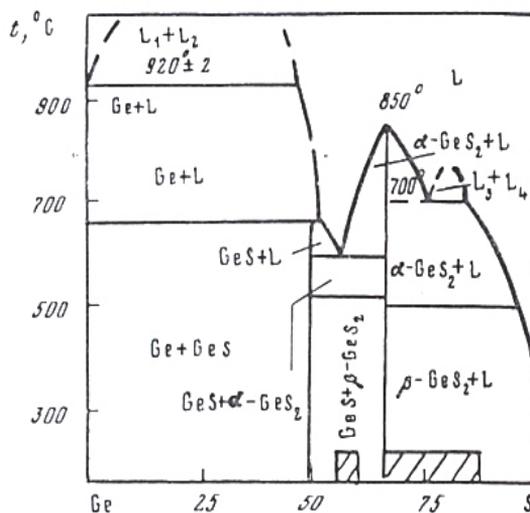


Рисунок 10 – Диаграмма состояния системы $\text{Ge} - \text{S}$ с нанесенными на нее областями
стеклообразования [8]

Система GeSe – Se

Качественное изменение интервала кристаллизации K_Δ (75 ат. % Se) в системе $\text{GeSe} - \text{Se}$ имеет место при изгибе ликвидуса, что соответствует началу

области стеклообразования (рис. 11) [8].

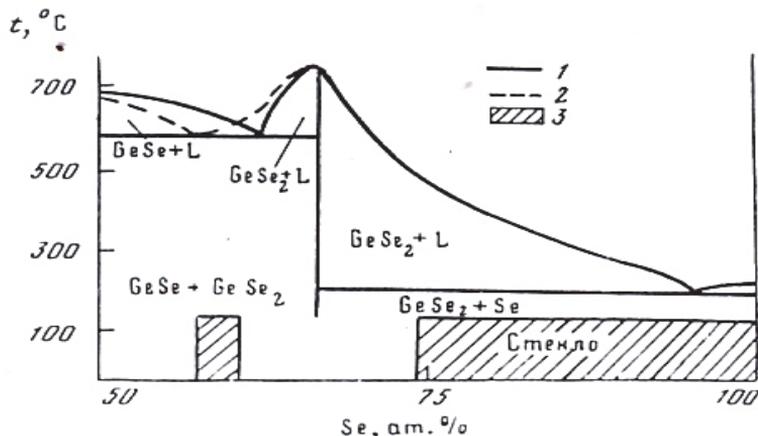


Рисунок 11 – Диаграмма состояния $GeSe - Se$ с областями стеклообразования [8]

Система S – Se

В системе S – Se концу эвтектической горизонтали (50 ат. % S), т.е. K_{Δ} строго соответствуют области где «образуются устойчивые стекла» [4, 26] (рис. 12).

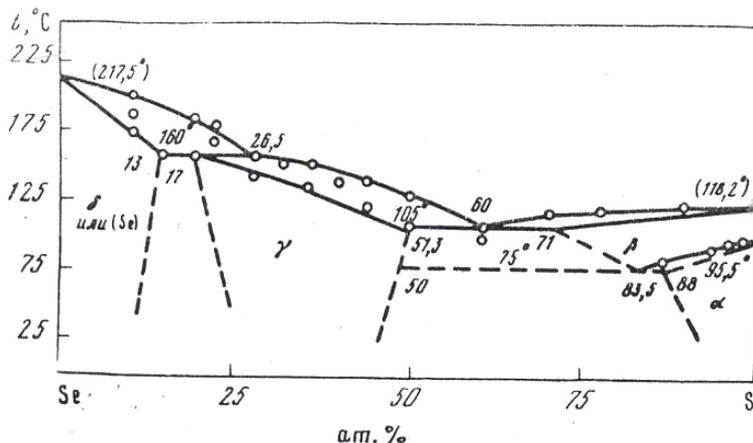


Рисунок 12 – Диаграмма состояния системы S – Se [4]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критерий K_{Δ} , разработанный в настоящем исследовании, дает объяснение аномалиям физико-механических свойств сталей и сплавов и может быть использован для прогнозирования свойств промышленно используемых сплавов по виду диаграмм фазового равновесия.

Литература

1. Баум Б.А. Жидкая сталь. М.: Металлургия, 1984. 208 с.
2. Бочвар А.А. Металловедение. 5-ое издание. М.: Металлургиздат, 1956. 496 с.

3. Вертман А.А. Структура расплавов железа. М.: Наука, 1969. 280 с.
4. Виноградова Г.З. Стеклообразование и фазовые равновесия в халькогенидных системах. М.: Наука. 1984. 176 с.
5. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Т.1. М.: Metallurgizdat, 1959. 952 с.
6. Гудцов Н.Т. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник под ред. Н.Т. Гудцова, М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. М.: Metallurgizdat, 1957. 1204 с.
7. Гуляев А.П. Металловедение. 5-ое издание. М.: Metallurgiya, 1986. 544 с.
8. Дембовский С.А. Стеклообразование. М.: Наука, 1990. 279 с.
9. Еланский Г.Н. Строение и свойства металлических расплавов. М.: Metallurgiya, 1991. 160 с.
10. Иванова В.С. Физическая природа и закономерности разрушения металлов Сб. Металловедение. Материалы симпозиума, посвященного 100-летию открытия Д.К. Черновым полиморфизма железа. М.: Наука, 1971. 542 с.
11. Корольков А.М. Литейные свойства металлов и сплавов. М.: Наука, 1967. 200 с.
12. Корнилов И.И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов. М.: Изд. АН СССР, 1961. 516 с.
13. Крушенко Г.Г. О некоторых особенностях структурно-чувствительных характеристик сплавов Al – Si // Изв. АН СССР Металлы. 1977. № 4. С. 204-207.
14. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
15. Курнаков Н.С. Избранные труды. В 3-х т. Т.2. М.: Изд. АН СССР, 1961. 612 с.
16. Никитин К.В., Никитин В.И. Управление качеством литых изделий из сплавов на основе явления структурной наследственности // Сб. докл. Девятого международного конгресса «Цветные металлы и минералы». Красноярск. 2017. С. 606-613.
17. Петров Д.А. Вопросы теории сплавов алюминия. М.: Metallurgizdat, 1951. 256 с.
18. Пряхин Е.И., Шаронов Н.И. Основные положения и проблемы технологии ЭЛС применительно к изготовлению конструкций из алюминий-магниевого сплава // Записки Горного института. 2020. Т. 229. С. 84-91.
19. Салдау П.Я. Особые свойства эвтектичной стали // ЖРМО. 1916. Ч. 1.(3). С. 112-148.
20. Самарин А.М. Структура и свойства сплавов железа с углеродом Сб. Металловедение. Материалы симпозиума, посвященного 100-летию открытия Д.К. Черновым полиморфизма железа. М.: Наука, 1971. 542 с.
21. Талуц С.Г., Смирнов А.Л и др. Теплофизические свойства сплавов на основе металлов подгруппы железа при высоких температурах: научная монография под ред. С.Г. Талуца. Изд-во УГГУ, 2013. 108 с.
22. Тыркель Е. История развития диаграммы железо – углерод. М.: Машиностроение, 1968. 280 с.
23. Хансен М. Структура бинарных сплавов. М.Л.: Metallurgizdat, 1941. В 2-х т. Т 1. 640 с.
24. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. М.: Metallurgiya, 1973. 759 с.

25. Шахназаров К.Ю. Аномалии свойств стальных нелегированных доэвтектоидных расплавов при $\sim 0,5\%$ C как следствие наличия промежуточной фазы $Fe_{42}C$ // Сталь. 2020. № 4. С. 26-29.
26. Шахназаров К.Ю., Михайлов А.В., Цуканов Д.В. Связь аномалий свойств сплавов с компонентом-полупроводником и особенностей стеклообразования с диаграммами состояния // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 4. С. 67-76. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-4-00-00.
27. Шахназаров К.Ю., Михайлов А.В. Связь физико-механических и технологических свойств двойных сплавов с качественными изменениями интервалов кристаллизации // Информационно-технологический вестник. 2020. № 4(26). С. 134-144.
28. Шахназаров К.Ю., Пряхин Е.И. Площадки на кривых твердости отожженных доэвтектоидных сталей при $\sim 0,5\%$ C как следствие наличия промежуточной фазы $\sim Fe_{42}C$ // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 724-29.
29. Шахназаров К.Ю. Хрупкость, тетрагональность, изменение морфологии мартенсита, дестабилизация аустенита углеродом, если его больше $\sim 0,5\%$, как следствие наличия промежуточной фазы $\sim Fe_{42}C$ // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016. Т. 9(6). С. 912-917.
30. Шахназаров К.Ю. Диаграмма железо – углерод Д.К. Чернова, структура и свойства стали // МиТОМ. 2009. № 1. С. 6-9.
31. Шахназаров К.Ю., Косников Г.А. Связь аномального повышения пластичности при росте прочности с качественными изменениями интервала кристаллизации в литых сплавах Cu – Zn, Cu – Sn, Al – Si, Cu – Si, Al – Zn, Zn – Al, Al – Mg, Mg – Al и Fe – C // Литейщик России. 2008. № 10. С. 43.
32. Шахназаров К.Ю. Новая версия объяснения аномальных свойств сталей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 1. С. 134-137.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site:www. unitech-mo.ru

Подписано в печать 20.03.2023
Формат В5
Печать офсетная. Усл.печ.л. 13,2
Тираж 500 экз.
Заказ № 95-01
Отпечатано
в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва
Хорошевское шоссе, 35, корп.2
Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77
E-mail :keyneslab@gmail.com
Site:www.n-ko.ru