

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) Издаётся 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:

05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкций и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)

05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ, 05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная безопасность], (не входит в Перечень ВАК)

05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы, 05.16.08 Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям), 05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62191

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

Над выпуском работали  
Паршина Ю.С.  
Пирогова Е.В.  
Багдасарян А.А.  
Харитоновна 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

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Аббасов Э.М.

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ ПРИЕМА  
СОВРЕМЕННЫМИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИМИ  
СРЕДСТВАМИ ПРИ ПУСКАХ ИЗДЕЛИЙ  
С КОСМОДРОМОВ.....3**

Алфёров М.В., Усачёв Д.В., Сосунов М.В.

**АНАЛИЗ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ,  
ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ СИСТЕМ  
ОБРАЗОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫХОДОВ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ  
СРЕДСТВ И ДЕТОНИРУЮЩИХ УДЛИНЕННЫХ  
ЗАРЯДОВ.....13**

Артюшенко В.М., Воловач В.И.

**ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ПАРАМЕТРА СИГНАЛА В АВИАЦИОННЫХ  
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ РАДИОСИСТЕМАХ ПРИ  
НАЛИЧИИ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ  
ПОМЕХ С НИЗКИМ УРОВНЕМ. ЧАСТЬ 1.....24**

Байков С.В., Зинина А.И.

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА  
СООТВЕТСТВИЯ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ  
ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ.....35**

Бершадский В.А.

**ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА  
К БЕЗОПАСНОСТИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ  
ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ЖИДКОСТНЫХ  
РАКЕТ.....40**

Пушкарёв Д.О.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ЭКСПЕРТНЫХ  
СИСТЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ  
И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....51**

Серёгин Н.Г., Пудовченко П.Ю.

**ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ  
К ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ.....60**

Сидорова Н.П., Сидоров Ю.Ю.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ  
МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА  
И ДИАГНОСТИКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....67**

Теодорович Н.Н., Ковалев И.И., Семенов А.Б.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ  
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ.....75**

## 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. **Аббасова Т.С.**, к.т.н., доцент
2. **Бухаров С.В.**, д.т.н., профессор
3. **Воловач В.И.**, д.т.н., профессор
4. **Логачева А.И.**, д.т.н., профессор
5. **Макаров М.И.**, д.т.н., профессор
6. **Матвиенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор
7. **Разумовский И.М.**, д.ф.-м.н., профессор
8. **Рудаков В.Б.**, д.т.н., профессор
9. **Смердов А.А.**, д.т.н., профессор
10. **Стрелянок Ю.В.**, д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.09.2020

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 11.0

Тираж 500 экз.

Заказ №82-12

Отпечатано в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

## **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Аббасова Т.С., Шмелев А.В.

**РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К СРЕДСТВАМ  
ПОДДЕРЖКИ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ  
ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ  
И НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....88**

Воловач В.И., Яницкая Т.С., Иванов В.В., Васильева А.С.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ.....98**

Истратова Е.Е., Астапчук В.А.

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ  
ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ УСЛУГ В НОВОСИБИРСКОЙ  
ОБЛАСТИ.....110**

Рудометкин В.А.

**ПОВЫШЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ  
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ.....118**

Самаров Е.К.

**СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И СПОСОБОВ  
ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НА ГРАФИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ АЛГОРИТМОВ  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ,  
ПОСТУПАЮЩЕЙ ОТ БОРТОВЫХ СЪЕМОЧНЫХ  
СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....124**

Суркова Л.Е., Суркова Е.К.

**ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕРРИТОРИЙ И ОЦЕНКИ  
ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ  
ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА.....134**

Яковлев С.Ю., Маслобоев А.В., Шемякин А.С.

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕГИОНАЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ  
БЕЗОПАСНОСТЬЮ.....142**

## **МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Поярков М.С., Скрыбин М.Л.

**ОСОБЕННОСТИ ОРИЕНТИРОВАННОЙ  
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТЕРЖНЯХ  
ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ.....159**

Сергеенко С.Н., Васильев А.Н., Василенко Д.В.

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА РВ-С  
И УГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ.....166**

УДК 629.78

## **Методика оценки дальности приема современными телеметрическими средствами при пусках изделий с космодромов**

**Э.М. Аббасов**, кандидат технических наук, доцент,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Проведен анализ места размещения измерительного пункта с точки зрения получения полного объема телеметрической информации при пусках изделий с заданного космодрома. Методика оценки дальности приема основана на расчёте зон радиовидимости стационарных измерительных пунктов по трассе выведения с учетом угловой ориентации изделия в ходе полета, расчёте энергетического запаса радиолиний для существующих и перебазировуемых средств приёма телеметрической информации, оценке потерь уровня сигнала в радиолинии, проверке отсутствия экранирования радиолинии факелом двигателя.*

Измерительный пункт, бортовая система, двигательная установка.

## **Methodology for assessing the range of reception by modern telemetric means when launching products from cosmodromes**

**E.M. Abbasov**, Ph.D. assistant 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 analysis of the location of the measuring point from the point of view of obtaining the full volume of telemetric information when launching products from a given cosmodrome is carried out. The method for assessing the reception range is based on calculating the radio visibility zones of stationary measuring points along the injection route, taking into account the angular orientation of the product during flight, calculating the energy reserve of radio lines for existing and relocatable means of receiving telemetry information, assessing the signal level loss in the radio line, checking the absence of shielding of the radio line by the engine torch.*

Measuring point, onboard system, propulsion system.

### **Введение**

Получение телеметрической информации (ТМИ) о полете ракеты является обязательным условием проведения пусков ракетно-космических изделий. Без информации о работе бортовых систем ракеты невозможно сделать выводы о причинах возможных аварийных ситуаций. Антенная система должна обеспечить не только заданную дальность связи, но также поиск и сопровождение по

углу места и азимуту по одному заранее заданному источнику телеметрического сигнала. При оценке дальности приема ТМИ актуальна проверка отсутствия экранирования радиолинии факелом двигательной установки изделия и определение ее энергетического запаса.

### Результаты исследования

Краткий обзор основных тактико-технических характеристик ретроспективных и современных наземных радиотехнических и радиотелеметрических средств высокоточных внешнетраекторных измерений, используемых на научно-исследовательских испытательных полигонах, космодромах, лабораторно-испытательных базах, измерительных пунктах и площадках полигонов при обработке образцов ракетно-космической и авиационной техники показал, что телеметрическая аппаратура имеет существенное значение для контроля и анализа функционирования бортового оборудования на ракетно-космической технике и получения достоверных и точных данных от датчиков различного типа [4, С.24]. Современные телеметрические средства имеют в своём составе стационарные и мобильные (перебазируемые) измерительные пункты (ИП). Мобильные ИП предназначены для приема и передачи в Центр управления полетами в режиме реального времени данных по транспортировке космических изделий с орбиты искусственного спутника Земли, включая процесс разделения отсеков корабля при движении по траектории, проходящей вне зон связи (зон радиовидимости, ЗРВ) со станциями слежения на территории Российской Федерации [1. С. 56; 2, С.92;3 С. 19]. Методика оценки дальности приема современными телеметрическими средствами при пусках изделий с космодромов должна, по сравнению с существующими методиками, учитывать параметры для обеспечения уверенного приема ТМИ на протяжении всего полета изделия для заданного измерительного пункта (ИП).

Для проведения расчетов по данной методике собираются следующие исходные данные:

- по бортовой системе телеметрических измерений: тип бортовой телеметрической аппаратуры, информативность, частотная литера, фактическая излучаемая мощность полезного сигнала, расположение, циклограммы работы бортовых телеметрических антенн и их диаграммы направленности;
- параметры стартовой системы координат (СК) изделия и измерительной системы координат, связанной с антенно-фидерным устройством (АФУ) ИП;
- циклограмма работы двигательных установок изделия;
- траектория изделия и углы его ориентации в ходе полета.

Выбираются участки полета изделия, пригодные для проведения измерений.

Дальность приема ТМИ оценивается по следующей формуле:

$$D = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot S_r}{4\pi P_r}}, \quad (1)$$

где  $D$  – дальность приема, км;  $P_t$  – мощность передатчика, Вт;  $G_t$  – коэффициент усиления бортовой антенны;  $S_r$  – эффективная площадь приемной антенны, м<sup>2</sup>;  $P_r$  – чувствительность приемника, Вт.

Чувствительность приемника для заданного диапазона, а также при заданной вероятности ошибки на символ  $10^{-6}$  составляет 10 мкВ.

По формуле (1) проводится расчет дальности приема антенной системы для Д2 диапазона. В качестве исходных принимаются следующие данные:

- эффективная площадь – 6 м<sup>2</sup>;
- мощность передатчика – 15...40 Вт;
- район размещения;
- коэффициент усиления бортовой антенны – 1.

В таблице 1 приведены типовые значения мощностей передатчиков ТМИ и соответствующие им значения дальности связи.

**Таблица 1 – Максимальная гарантированная дальность приема для данной антенной системы**

Мощность передатчика	15 Вт	40 Вт
Дальность связи	946 км	1545 км

Энергетический запас радиолинии определяется

$$\eta = 10Lg \frac{S_{эф} P_{п} K_{у} K_{п}}{4\pi R^2 P_0}, \quad (2)$$

где  $S_{эф}$  – эффективная площадь АФУ в направлении на изделие, с которого ведется прием телеметрической информации;  $P_{п}$  – фактическая мощность излучаемого с борта изделия телеметрического сигнала;  $K_{у}$  – коэффициент усиления бортовой телеметрической антенны;  $K_{п}$  – суммарный коэффициент потери мощности телеметрического сигнала в радиолинии (порядок его расчета приведен ниже);  $R$  – наклонная дальность между изделием и АФУ;  $P_0$  – минимальная мощность на входе малошумящего усилителя (МШУ) при отношении сигнал/шум 0 дБ.

Расчет фактической мощности осуществляется по исходным данным, выданным разработчиком изделия, включающим мощность излучения бортового передатчика и коэффициенты потерь в различных элементах бортового АФУ.

Коэффициент потери мощности телеметрического сигнала при его распространении в свободном пространстве

$$K_{п} = 1/4\pi R^2, \quad (3)$$

$R$  определяется согласно соотношению

$$R = \sqrt{X_{изм}^2 + Y_{изм}^2 + Z_{изм}^2}, \quad (4)$$

где  $X_{изм}^2$ ,  $Y_{изм}^2$ ,  $Z_{изм}^2$  – положение изделия в измерительной системе координат, связанной с АФУ ИП.

Известно, что при распространении радиоволн в радиолиниях наблюдается значительное ослабление излучаемого сигнала вследствие поглощения и рассеивания радиоволн в атмосфере  $L_A$ ; поляризационных потерь  $L_{п}$  (вращение плоскости поляризации излученного сигнала).

Под потерями понимается отношение мощности, излучаемой передающим устройством  $P_u$ , к мощности, принимаемой приемной антенной и выделяющейся на входе приемника  $P_c$ , то есть

$$L = \frac{P_u}{P_c}, \quad (5)$$

или в децибелах

$$L_{\text{дБ/Вт}} = 10 \lg \frac{P_u}{P_c}. \quad (6)$$

Общие потери в радиолинии, выраженные в децибелах, равны сумме всех составляющих потерь:

$$L_{\Sigma} = L_A + L_{\Pi}. \quad (7)$$

Анализ влияния атмосферы на распространение радиоволн метрового и дециметрового диапазонов показывает, что суммарное ослабление энергии сигнала при прохождении через атмосферу  $L_A$  для объектов с большим углом места не превышает 2...3 дБ.

Приём телеметрических сигналов с объектов при малых углах места резко увеличивает воздействие атмосферы на качество прохождения сигналов. В частности, Международным консультативным комитетом по радиосвязи приняты рекомендации, ограничивающие минимальные углы места значениями  $3^\circ \dots 5^\circ$  в диапазонах до 6 ГГц и  $10^\circ \dots 15^\circ$  в диапазонах выше 10 ГГц. Учёт факторов воздействия атмосферы при малых углах места свидетельствует, что потери энергии радиосигнала в этом случае могут составлять от 6 до 10...15 дБ при линейной поляризации и до 6 дБ при круговой поляризации.

При прохождении радиоволн через ионосферу продольная составляющая магнитного поля Земли вызывает вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея). Это явление приводит к медленным замираниям линейно поляризованных сигналов, что эквивалентно потерям энергии радиоволн при приёме. Потери, обусловленные эффектом Фарадея, при линейной поляризации могут достигать 5 дБ на частотах меньше 2 ГГц. При использовании антенн круговой поляризации на обоих концах радиолинии потери  $L_{\Pi}$  не превышают 2...3 дБ. Таким образом, общие потери сигнала в радиолинии при распространении составляют  $\sim 4,2 \dots 6,4$  дБ.

Анализ участков, пригодных для приема ТМИ, проводится исходя из выполнения трех условий:

- угол места изделия, по которому ведется прием ТМИ, должен превышать  $30^\circ$  измерительной СК, связанной с АФУ;
- с целью исключения экранирования линии радиосвязи факелом двигателя на участках работы ступеней, угол между факелом двигателя и вектором, направленным на измерительный пункт, должен превышать  $100^\circ$ ;
- расчетный энергетический запас должен быть более 20 дБ относительно уровня шумов на входе МШУ.

Проверка выполнения условия по углу места изделия проводится в следующей последовательности:

- выполняется расчет положения изделия в измерительной СК связанной с АФУ;
- проводится расчет угла места изделия согласно соотношению

$$Um_{\text{изд}} = \text{ArcTan} \left( \frac{Y_{\text{изм}}}{\sqrt{X_{\text{изм}}^2 + Z_{\text{изм}}^2}} \right), \quad (8)$$

где  $X_{\text{изм}}^2$ ,  $Y_{\text{изм}}^2$ ,  $Z_{\text{изм}}^2$  – положение изделия в измерительной СК на момент расчета;

- выполняется проверка условия  $Um_{\text{изд}} \geq 3^\circ$ .

Проверка отсутствия экранирования радиолинии факелом двигателя проводится в следующей последовательности:

- согласно фактической циклограмме полета изделия проверяется наличие работающего двигателя на момент расчета, если нет работающего двигателя, то условие выполнено, иначе проводятся дальнейшие вычисления;
- определяются параметры положения изделия в стартовой замороженной СК;
- определяются углы ориентации изделия на момент расчета по данным траектории;
- определяются координаты точки отсчета измерительной СК в связанной СК;
- угол между факелом двигателя и вектором, направленным на измерительный пункт, определяется согласно следующей формуле:

$$U_{дв} = \text{ArcCos} \left( \frac{-X_{ССК}}{\sqrt{X_{ССК}^2 + Y_{ССК}^2 + Z_{ССК}^2}} \right), \quad (9)$$

где  $X_{ССК}$ ,  $Y_{ССК}$ ,  $Z_{ССК}$  – координаты измерительного пункта в связанной СК изделия;

- на участке работы двигателей проводится проверка выполнения условия  $U_{дв} \geq 10^\circ$ .

Проверка на нахождение уровня полезного сигнала в диапазоне, пригодном для анализа, осуществляется в следующей последовательности:

Ориентация связанной СК изделия определяется тремя эйлеровыми углами вращения, например, тангаж  $Q$ , рысканье  $P$ , крен  $G$ . Изменение углов в ходе полета определяется по данным телеметрии и представляется в виде таблицы 2.

**Таблица 2 – Угловая ориентация изделия в ходе полета**

№ п/п	Время, с	$Q$ , гр	$P$ , гр	$G$ , гр
1	$t_1$	$Q_1$	$P_1$	$G_1$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$i$	$t_i$	$Q_i$	$P_i$	$G_i$
$i+1$	$t_{i+1}$	$Q_{i+1}$	$P_{i+1}$	$G_{i+1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$n$	$t_n$	$Q_n$	$P_n$	$G_n$

Угловая ориентация на момент расчета  $t$  определяется по данным таблицы 2 методом линейной интерполяции:

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} Q_{i+1} + \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} Q_i; \\ G(t) &= \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} G_{i+1} + \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} G_i; \\ P(t) &= \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} P_{i+1} + \frac{t_{i+1}-t}{t_{i+1}-t_i} P_i \end{aligned} \quad (10)$$

где  $t_i, t_{i+1}$  – моменты записи углового положения такие, что  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ .

При известных углах ориентации и положении изделия пересчет координат из замороженной стартовой СК в связанную СК проводится согласно формуле:

$$\begin{bmatrix} X_{ССК} \\ Y_{ССК} \\ Z_{ССК} \end{bmatrix} = MP_{ССК}^{ЗСК}(Q, P, G) * \left( \begin{bmatrix} X_{ЗСК} \\ Y_{ЗСК} \\ Z_{ЗСК} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{ЗСК}^{изд} \\ Y_{ЗСК}^{изд} \\ Z_{ЗСК}^{изд} \end{bmatrix} \right), \quad (11)$$

где  $MP_{ССК}^{ЗСК}(Q, P, G)$  – матрица перехода от замороженной СК к связанной СК, рассчитывается как функция углов ориентации изделия и должна быть предоставлена разработчиком;  $X_{ЗСК}^{изд}$ ,  $Y_{ЗСК}^{изд}$ ,  $Z_{ЗСК}^{изд}$  – координаты изделия в замороженной стартовой СК.

Используемые при проведении расчетов системы координат и параметры перехода между ними.

В ходе проведения расчетов используются следующие системы координат и переходы между ними:

- геоцентрическая относительная система координат;
- стартовая система координат;
- измерительная система координат;
- измерительная замороженная система координат.

Начало геоцентрической относительной системы координат (ГОСК) находится в центре связанного с ней эллипсоида Земли. Ось ОУ направлена в сторону Северного полюса, ось ОХ – проходит через точку пересечения начального меридиана с плоскостью экватора, ось ОZ дополняет систему до правой. ГОСК может быть определена как на общеземном эллипсоиде (ПЗ-90, ПЗ-90.02, WGS84) так и на референц-эллипсоиде, оптимально описывающем территорию Российской Федерации (СК-42, СК-95).

Параметры перехода между различными реализациями ГОСК и параметры Земных эллипсоидов в методике осуществляется согласно ГОСТ Р 51794-2001 «Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек».

Центр измерительной системы координат находится в точке расположения измерительного средства. Ось ОУ направлена вверх по линии отвеса, направление оси ОХ определяется азимутом, отсчитываемым от плоскости меридиана по часовой стрелки, направление на север соответствует нулевому азимуту, ось ОZ дополняет систему до правой.

Стартовая СК определяется аналогично измерительной СК, за исключением того, что ее точка отсчета находится в точке старта изделия.

Центр стартовой замороженной системы координат совпадает с центром стартовой СК, а ее оси совпадают с осями стартовой СК в момент выставки гироскопов  $t_{отп}$ , после чего они перестают вращаться вместе с Землей.

Пересчет координат из измерительной СК в геоцентрическую относительную СК и обратно осуществляется согласно следующим формулам:



$$\begin{bmatrix} X_{ГСК} \\ Y_{ГСК} \\ Z_{ГСК} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & u_x & 0 \\ -u_x & 1 & u_z \\ 0 & -u_z & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{ИЗМ} \\ Y_{ИЗМ} \\ Z_{ИЗМ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} X_{ИЗМ} \\ Y_{ИЗМ} \\ Z_{ИЗМ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -u_x & 0 \\ u_x & 1 & -u_z \\ 0 & u_z & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} * \left( \begin{bmatrix} X_{ГСК} \\ Y_{ГСК} \\ Z_{ГСК} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \right) \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\sin(L) \sin(Az) - \cos(L) \sin(B) \cos(Az) \\ a_{21} &= \cos(L) * \sin(Az) - \sin(L) \sin(B) \cos(Az) \\ a_{31} &= \cos(B) \cos(Az) \\ a_{12} &= \cos(L) \cos(B) \\ a_{22} &= \sin(L) \cos(B) \\ a_{32} &= \sin(B) \\ a_{13} &= -\sin(L) \cos(Az) + \cos(L) \sin(B) \sin(Az) \\ a_{23} &= \cos(L) * \cos(Az) + \sin(L) \sin(B) \sin(Az) \\ a_{33} &= \sin(B) \\ V_1 &= (N + H) \cos(L) \cos(B) \\ V_2 &= (N + H) \sin(L) \cos(B) \\ V_3 &= (N(1 - e^2) + H) \sin(B) \\ N &= a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2(B)} \\ u_x &= \xi \cos(Az) + \eta \sin(Az) \\ u_y &= \xi \sin(Az) + \eta \cos(Az) \end{aligned}$$

$A_z, B, L$  – азимут, широта, долгота измерительной системы координат;  $H$  – высота точки отсчета измерительной СК над эллипсоидом Земли;  $\xi, \eta$  – уклонения в меридиане и плоскости первого вертикала;  $a, e$  – большая полуось и первый эксцентриситет земного эллипсоида.

Пересчет из стартовой СК в геоцентрическую относительную СК и обратно осуществляется согласно формулам (12) и (13).

Переход из геоцентрической относительной СК в стартовую замороженную СК осуществляется в следующей последовательности:

Осуществляется учет вращения Земли, согласно выражению

$$\begin{bmatrix} X_{ГСК}^{зам} \\ Y_{ГСК}^{зам} \\ Z_{ГСК}^{зам} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(w_3(t - t_{отп})) & -\sin(w_3(t - t_{отп})) & 0 \\ \sin(w_3(t - t_{отп})) & \cos(w_3(t - t_{отп})) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{ГСК} \\ Y_{ГСК} \\ Z_{ГСК} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $t$  – время на момент расчета;  $t_{отп}$  – момент выставки осей гироскопа;  $w_3$  – скорость вращения Земли.

На участках анализа проводится расчет энергетического запаса радиолонии «Изделие – ИП».

Высота полета изделия на активном участке выведения на промежуточную орбиту лежит в пределах от 190 км до 550 км, при выведении на переходные

орбиты не превышает 1200 км, а при входе в зону радиовидимости российских стационарных измерительных пунктов составит 2...3 тыс. км.

Скорость передачи ТМИ с изделия не превышает 256 кбит/с. При достижении высоты несколько тысяч километров скорость передачи по программе изменяется на 32 кбит/с.

После сброса головного обтекателя ТМИ передается через малонаправленные антенны (МНА), коэффициент усиления  $G$  которых в зависимости от изменения угла между линией связи «изделие – приемная станция» и направлением максимума диаграммы направленности бортовой антенны в пределах  $0^\circ \dots 90^\circ$  изменяется от 2 до 0,05.

При номинальном полете принимается  $G=0,7$ , при неориентированном полете изделия  $G$  может падать до 0,05. Во время программных переворотов или при вращении изделия  $G$  может находиться в пределах 0,05...2.

На борту изделия могут устанавливаться радиопередатчики мощностью 6 Вт или  $15 \pm 1$  Вт. Передача ТМИ ведется на двух частотах диапазона Д2 (1018,5 МГц и 1020,5 МГц) через две антенны, установленные на изделии диаметрально противоположно.

Будем полагать, что телеметрические средства приёма, установленные в районе трассы, соответствующей контролируемому участку траектории полета изделия, принимают ТМИ во всей зоне радиовидимости данного пункта (от радиогоризонта при входе изделия в ЗРВ до радиогоризонта при выходе изделия из ЗРВ).

Дальность до радиогоризонта представляет собой длину прямой линии, соединяющей наблюдателя ММИИ и объект наблюдения (изделие) при минимально допустимом угле места диаграммы направленности антенны.

Дальность до радиогоризонта  $D$  в диапазоне высот 200...3000 км для углов места  $\varepsilon = 0^\circ$  и  $\varepsilon = 7^\circ$  приведена в таблице 3.

**Таблица 3 – Дальности до радиогоризонта**

Высота полета (км)	Дальность до радиогоризонта (км)	
	угол места $0^\circ$	угол места $7^\circ$
200	1130	1010
300	1980	1350
400	2300	1700
500	2573	1910
600	2900	2100
700	3070	2390
1000	3710	3010
2000	5430	4710
3000	6872	6140

Энергетика радиотелеметрического канала, определяющая вероятность ошибки на символ  $P_{ош}$  принимаемой ТМИ при известных характеристиках бортовых антенн  $G$  мощности бортового передатчика  $P_b$  для заданной дальности приёма  $R$  определяется чувствительностью приёмника, зависящей от шумовой

температуры приёмной системы, полосы частот сигнала, эффективной поверхностью приёмной системы и возможными потерями в радиолинии.

В соответствии с методикой, для выбранного ИП проведён расчёт параметров геометрических ЗРВ по исходным данным. По результатам расчетов построены графические зависимости.

На рисунке 1 показаны в виде графика результаты расчета наклонной дальности от времени полета изделия в пределах ЗРВ.

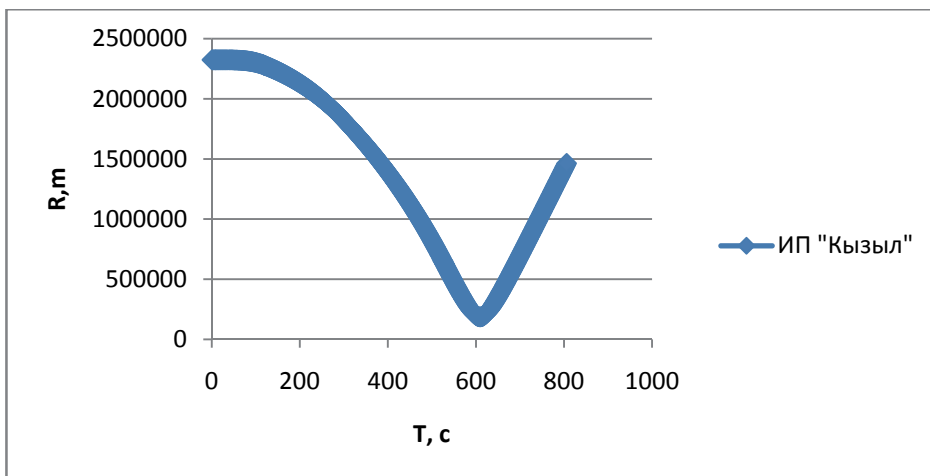


Рисунок 1 – Зависимость наклонной дальности от времени полёта изделия в пределах геометрических зон радиовидимости

Угол места для ИП показан на рисунке 2.

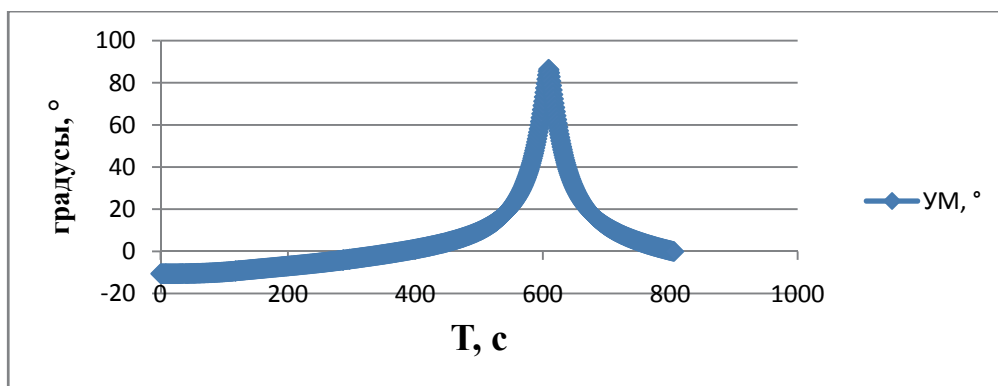


Рисунок 2 – Зависимость угла места абонентской станции от времени полёта изделия для измерительных пунктов в пределах их геометрических зон радиовидимости

3. Результаты расчета азимута для ИП приведены в виде графика на рисунке

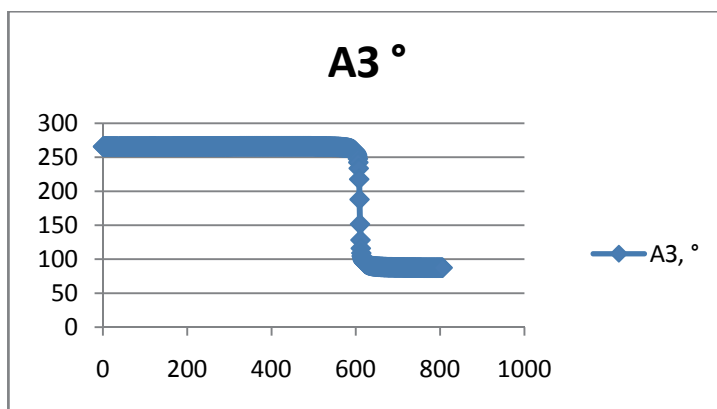


Рисунок 3 – Азимут

Исходя из полученных расчетных данных, можно вести уверенный прием ТМИ на протяжении всего полета изделия для заданного ИП.

#### **Выводы**

На основании разработанной методики определена траектория полета изделия, осуществлён выбор места расположения измерительного комплекса. Проведен расчёт геометрических зон радиовидимости стационарного измерительного пункта, построен график зависимости наклонной дальности от времени полёта изделия.

#### *Литература*

1. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический Вестник. № 2(04). 2015. С. 55-64.
2. Андрейко А.Н., Кравец В.Г., Кучеров М.А., Лучинский В.П. Портативный комплекс приема телеметрической информации для передачи в центр управления полетами данных по спуску пилотируемых транспортных кораблей // Космическая техника и технологии. 2016. № 1 (12). С. 90-98.
3. Артюшенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании / Сборник – Королев МО: Изд-во «Канцлер». Финансово-технологическая академия. ФТА. 2014. С. 17-22 (426 с.).
4. Додонов А.Г., Путьятин В.Г. Радиотехнические средства внешнетраекторных измерений // Математические машины и системы. 2018. № 1. С. 3-30.

УДК 629.7.047.2

**Анализ отличительных особенностей, преимуществ и недостатков систем образования аварийных выходов, выполненных на основе пиротехнических средств и детонирующих удлиненных зарядов**

**М.В. Алфёров**, инженер-испытатель,  
**Д.В. Усачёв**, старший инженер-испытатель,  
**М.В. Сосунов**, кандидат технических наук, начальник отделения,  
Войсковая часть 15650-16, г. Щёлково-4, Московская область

*В статье проводится сравнительный анализ систем образования аварийных выходов, выполненных на основе пиротехнических средств и детонирующих удлиненных зарядов, применяемых на отечественных летательных аппаратах. Рассматриваются их основные отличительные особенности, преимущества и недостатки.*

Система образования аварийного выхода, пиротехническая система, детонирующий удлиненный заряд.

**Analysis of distinctive features, advantages and disadvantages of emergency outputs formation systems, performed on the basis of pyrotechnical means and detonating long charges**

**M.V. Alferov**, test engineer,  
**D.V. Usachov**, senior test engineer,  
**M.V. Sosunov**, Ph.D (Tech.), department director,  
Army part 15650-16, Shchelkovo-4, Moscow region

*The article provides a comparative analysis of emergency exit systems based on pyrotechnics and elongated detonating charges used on domestic aircraft. Their main distinctive features, advantages and disadvantages are considered.*

Emergency exit education system, pyrotechnic system, detonating elongated charge.

Основным направлением улучшения характеристик комплексов средств принудительного аварийного покидания (СПАП) является сокращение времени работы комплекса. Общее время работы комплекса СПАП зависит от временных характеристик систем образования аварийных выходов (СОАВ), системы управления (СУ), катапультных установок или ракетно-парашютных систем, а также зависит от параметров полета летального аппарата (ЛА) в момент применения СПАП. По данным статистики время работы СОАВ, выполненных по «традиционной» схеме, обеспечивающих сброс откидной части фонаря (ОЧФ), составляет до 60% от общего времени работы СПАП.

К «традиционным» относятся СОАВ сконструированные на пиротехнических принципах. Они состоят из схожих по конструкции элементов, так как при катапультировании алгоритмы работы указанных систем на различных типах

ЛА в целом совпадают. Данные системы построены на однотипной элементной базе и имеют схожие законы управления, имеют одни и те же недостатки.

За последние два десятилетия с целью снижения общего времени работы комплексов СПАП были разработаны принципиально новые СОАВ, выполненные на базе детонирующих удлинённых зарядов (ДУЗ). Данные СОАВ обеспечивают образование аварийного выхода путём разрушения остекления фонаря кабины. ОЧФ при этом не сбрасывается. Такие системы начинают находить своё применение наряду с СОАВ, выполненными по «традиционной» схеме, и были внедрены на некоторые отечественные серийные ЛА, например, на самолёте Як-130 и вертолёте Ка-52.

Независимо от принципа работы и конструктивного исполнения СОАВ, основными параметрами, характеризующими эффективность СОАВ, являются диапазоны высот и скоростей полета ЛА, на которых обеспечивается безопасное для членов экипажа образование аварийного выхода.

Пиротехнические СОАВ, как и СОАВ, выполненные на базе ДУЗ, обладают своими преимуществами и недостатками, оказывающими влияние на безопасность покидания ЛА экипажем и эффективность комплексов СПАП в целом.

Рассмотрим некоторые типовые схемы СОАВ и их разрешающие характеристики [1 С.2].

Основными разрешающими характеристиками пиротехнических СОАВ являются:

- диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для членов экипажа должен обеспечиваться во всём диапазоне скоростей полёта;
- диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для ЛА должен обеспечиваться в диапазоне скоростей полёта, заданном для каждого конкретного ЛА;
- время срабатывания основной разблокировки катапультного кресла (КК) (как правило, осуществляется с помощью фала, присоединенного к ОЧФ).

Безопасность сброса ОЧФ для членов экипажа зависит от прочностных характеристик и параметров движения ОЧФ на начальном участке траектории, а также от дополнительных устройств, конструктивно размещенных на ОЧФ (шторки слепого полета, перископы и др.). Критерием безопасности сброса ОЧФ для члена экипажа является отсутствие контакта между ОЧФ или ее частями и КК с членами экипажа при катапультировании. Время срабатывания основной разблокировки КК зависит от скорости освобождения откидной частью фонаря зоны свободного выхода КК из кабины ЛА при катапультировании (удаления ОЧФ на безопасное расстояние – длину фала разблокировки), скорости полета ЛА, а также от величины импульса энергодатчиков и усилий со стороны толкателей подброса ОЧФ.

Диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для ЛА зависит от начального импульса энергодатчиков СОАВ, аэродинамических характеристик ОЧФ и ее прочности. Критерием безопасности сброса ОЧФ для ЛА является величина зазора над килем.

Типовая пиротехническая СОАВ, например, самолётов фирмы «Сухой», состоит из систем аварийного открытия замков ОЧФ и подброса ОЧФ, энергодатчиков и коммуникаций. СОАВ выполняются дублированными и состоят из двух систем: основной – пиротехнической и дублирующей – пневматической.

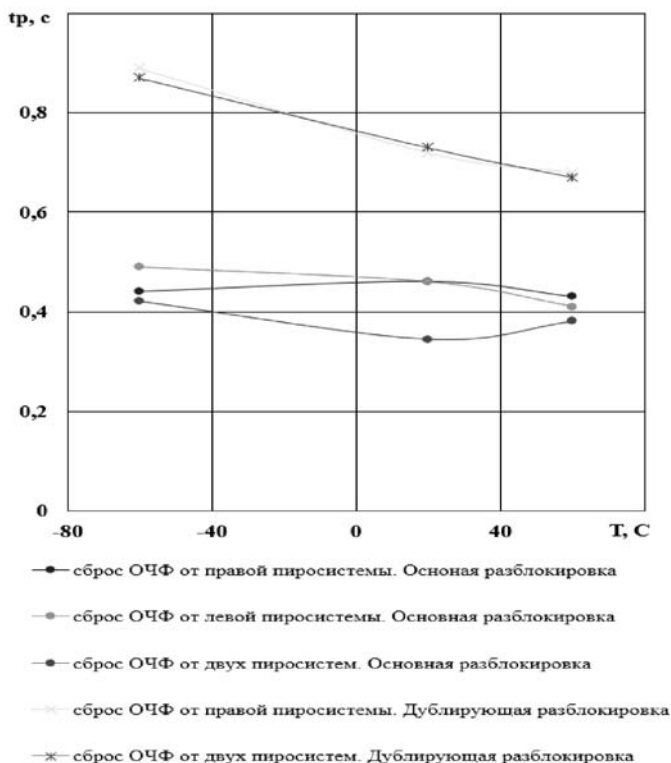
Типовые конструкции СОАВ обеспечивают нахождение ОЧФ в закрытом

положении с фиксацией в нескольких точках на подфонарной раме при помощи системы замков. Эксплуатационное закрытие/открытие ОЧФ осуществляется при помощи пневмосистем. Приведение в действие СОАВ осуществляется от поручней катапультирования КК или от ручек автономного сброса ОЧФ, расположенных на борту кабины. При приведении в действие любого привода через систему тяг и качалок происходит срабатывание основной (пиротехнической) системы или дублирующей (пневматической), если произошёл отказ основной.

Под действием давления пиро- или пневмогазов происходит открытие замков и сброс ОЧФ. После удаления ОЧФ на безопасное для члена экипажа расстояние происходит разблокировка катапультиного кресла.

Современные «пиротехнические» СОАВ обеспечивает безопасное для членов экипажа образование аварийного выхода в диапазоне скоростей от 0 до 1300 км/ч при температурах от минус 60 до 60 °С. Диапазоны безопасного сброса ОЧФ для ЛА, как правило, находятся в пределах скоростей полёта от 300 до 600 км/ч. Однако, временные характеристики СОАВ не всегда соответствуют предъявляемым требованиям. Как правило, этот недостаток проявляется на двухместных ЛА, имеющих одну общую для экипажа ОЧФ, а также при нулевой скорости, при малых скоростях полёта и при низких температурах.

Примеры зависимостей временных характеристик СОАВ и зазоров между ОЧФ и килем ЛА от температуры воздуха и скорости полёта представлены на рисунках 1-4.



**Рисунок 1 – Пример зависимости времени образования аварийного выхода (tr) от температуры воздуха (T) при применении пиротехнической СОАВ**

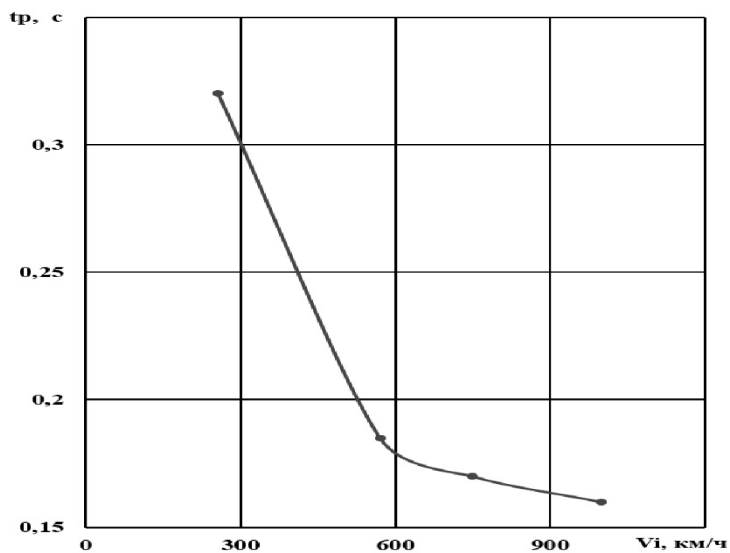


Рисунок 2 – Пример зависимости времени образования аварийного выхода ( $t_p$ ) от скорости полёта ( $V_i$ ) при применении пиротехнической СОАВ

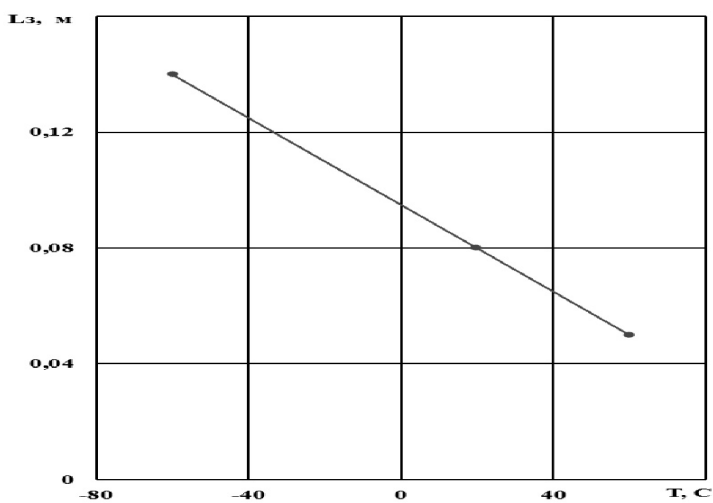


Рисунок 3 – Пример зависимости величины зазора между ОЧФ и килем ЛА ( $L_z$ ) от температуры воздуха ( $T$ ) при применении пиротехнической СОАВ



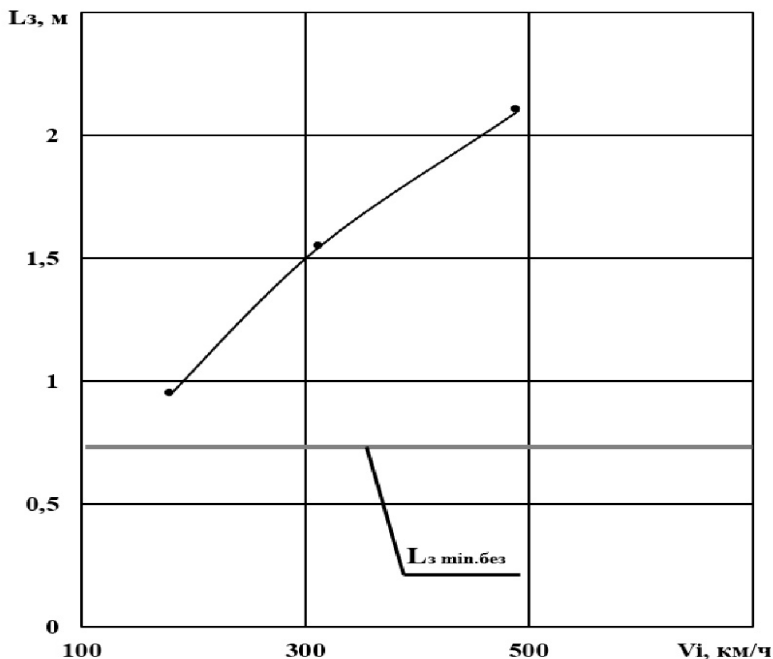


Рисунок 4 – Пример зависимости величины зазора между ОЧФ и килем ЛА ( $L_z$ ) от скорости полёта ( $V_i$ ) при применении пиротехнической СОАВ

В состав типовой СОАВ, выполненной на базе ДУЗ, как правило, входят следующие основные элементы:

- иницирующее устройство (ИУ);
- ДУЗ;
- клеевой материал.

Пример функциональной схемы комплекса СПАП с СОАВ, выполненной на базе ДУЗ, представлен на рисунке 5.

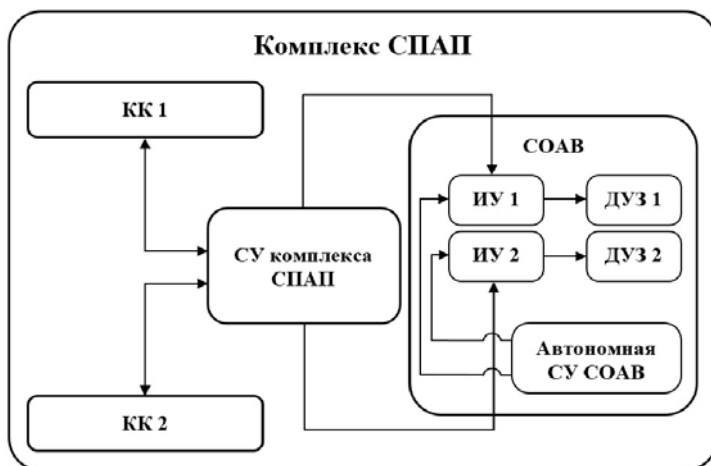


Рисунок 5 – Пример функциональной схемы СОАВ, выполненной на базе ДУЗ

ИУ предназначен для приведения в действие (подрыва) ДУЗ по команде системы управления. ИУ, в зависимости от конструктивного исполнения, может быть электрическим, механическим или электромеханическим. ДУЗ является исполнительным элементом СОАВ, обеспечивающий образование аварийного выхода путём принудительного разрушения остекления фонаря кабины ЛА. В зависимости от состава и конструкции комплекса СПАП ЛА в состав СОАВ может входить один или несколько ДУЗ. Конструктивно ДУЗ представляет собой шнуровой заряд (взрывчатое вещество в виде единого шнура), помещённый в оболочку. В качестве материала оболочки могут применяться: ткань, металл, резина и др. Состав взрывчатого вещества в ДУЗ так же может быть различным. На остеклении фонаря кабины ЛА ДУЗ монтируется, как правило, при помощи специального клеевого состава.

Геометрия укладки ДУЗ на остеклении фонаря может быть различная. ДУЗ может размещаться на остеклении в один или несколько рядов (контуров), иметь изгибы (рисунок 6). Так, например, на самолёте Як-130 в состав СОАВ входят два ДУЗ – передней и задней кабин самолёта. Укладка ДУЗ на остеклении выполнена в виде сложной замкнутой геометрической фигуры, имеющей изгибы с различными углами (рисунок 6б).

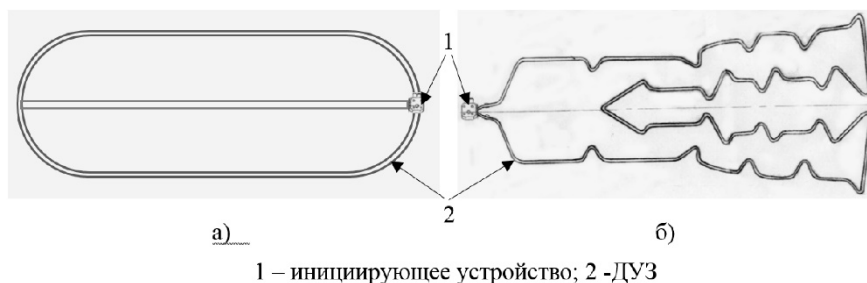
При создании первых СОАВ на базе ДУЗ предлагались простые схемы укладки ДУЗ на остеклении фонаря с расположением шнура по периметру остекления ОЧФ с дополнительной линией шнурового заряда, располагающейся вдоль продольной линии симметрии остекления (рисунок 6а). Однако после ряда испытательных работ выяснилось, что такая схема расположения шнурового заряда не обеспечивает разрушение остекления фонаря кабины надлежащим образом. При срабатывании ДУЗ происходило вырезание двух фрагментов остекления по контуру укладки шнура. При этом энергии направленного взрыва оказывалось недостаточно для удаления больших, тяжёлых фрагментов остекления на безопасное от лётчика расстояние. Стало очевидным, что для обеспечения безопасного образования аварийного выхода необходима система обеспечивающая разрушение остекления на более мелкие фрагменты. Принцип разрушения части остекления фонаря кабины с формированием более мелких фрагментов был реализован только в начале 2000-х годов на самолёте Як-130. Геометрия укладки ДУЗ на остеклении фонаря кабины была выполнена таким образом, чтобы при разрушении остекления обеспечивалось формирование незначительных по размеру фрагментов, и они удалялись на безопасное расстояние от лётчика энергией направленного взрыва. Реализация такого принципа была достигнута за счёт сложной геометрии укладки шнурового заряда и достаточного количества взрывчатого вещества на единице площади.

Как уже отмечалось выше, основными разрешающими характеристиками СОАВ являются:

- диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для членов экипажа;
- диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для ЛА;
- время срабатывания основной разблокировки КК (как правило, осуществляется с помощью фала, присоединенного к ОЧФ).

Рассматривая диапазон скоростей безопасного сброса ОЧФ для членов экипажа, в первую очередь следует отметить, что при применении СОАВ, вы-

полненных на основе ДУЗ, ОЧФ не сбрасывается. Поэтому в данном случае правильной будет говорить не про диапазон безопасного сброса, а про диапазон безопасного применения СОАВ для членов экипажа [2, С.8].



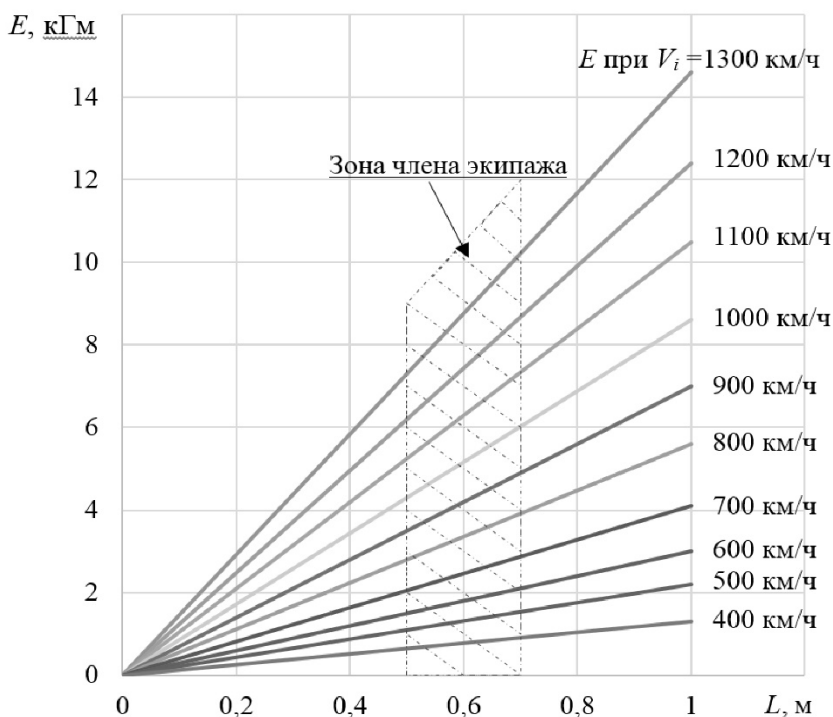
**Рисунок 6 – Примеры геометрии ДУЗ при расположении на остеклении фонаря кабины ЛА**

На начальном этапе разработки данных систем наиболее существенным недостатком, препятствующим принятию СОАВ данного типа на вооружение, являлось наличие достаточно крупных осколков остекления, образующихся при срабатывании системы. Как показали соответствующие исследования и испытания на скоростях катапультирования, близких к скорости звука, энергии направленного взрыва бывает недостаточно для создания безопасной траектории пролета осколков. Кроме того, несмотря на принимаемые меры по минимизации их величины, осколки могли иметь различную площадь и, как следствие, обладать различной кинетической энергией. При этом часть осколков имеет возможность попадать в кабину и, вследствие этого, может привести к полному или частичному нарушению работоспособности члена экипажа. Поэтому диапазон безопасного применения СОАВ для членов экипажа в первую очередь зависит от скорости полёта ЛА и величины осколков остекления, образующихся при срабатывании системы.

ЛИИ им. М.М.Громова была проведена предварительная оценка безопасности лётчика при применении данных СОАВ [3, С.5]. На рисунке 7 представлены уровни кинетической энергии осколка площадью  $100 \text{ см}^2$  в затормаживающемся потоке в диапазоне скоростей полёта от 400 до 1300 км/ч (по материалам ЛИИ им. М.М. Громова). Осколки со столь высокими уровнями  $E$  могут представлять определенную опасность для лётчика и снаряжения, поэтому процесс разрушения остекления следует организовывать таким образом, чтобы в максимальной степени исключалась возможность контактов осколков с лётчиком [3, С.6].

Рассмотрение диапазона скоростей безопасного применения СОАВ для ЛА, является не актуальным для данных систем. Так как при их применении на ЛА автономное срабатывание допускается только при аварийной эвакуации на земле. Причиной этому являются осколки, образующиеся после срабатывания ДУЗ, и осколков, остающихся в раме фонаря кабины. Эти осколки могут быть вырваны из рамы скоростным напором и повредить члена экипажа и его снаряжение.

Рассматривать вопрос времени срабатывания основной разблокировки СМ КК так же не актуально. При применении данных систем в целом нет необходимости блокировать КК. Время срабатывания СОАВ может составлять от 0,005 с (реально получено в испытаниях) до 0,2 с, не более (по некоторым предъявляемым требованиям). Т.е. это время меньше или равно времени подготовительных операций, выполняемых на современных отечественных КК перед катапультированием.



**Рисунок 7 – Уровни кинетической энергии осколка площадью 100 см<sup>2</sup> в затормаживающемся потоке при различных скоростях в диапазоне скоростей полёта  $V_i$  от 400 до 1300 км/ч**

А учитывая тот факт, что после срабатывания ДУЗ часть образующиеся осколки и осколки, остающихся в раме фонаря кабины, способны под действием скоростного напора попадать в кабину, целесообразно производить срабатывание СОАВ одновременно с катапультированием КК.

Такая схема покидания реализована на самолёте Як-130 – срабатывание СОАВ происходит при движении КК по направляющим рельсам, тем самым минимизируется возможность контактирования осколков остекления с членом экипажа.

Таким образом, проведя краткий анализ, пиротехнических СОАВ и СОАВ, выполненных на базе ДУЗ, рассмотрим их основные отличительные особенности, преимущества и недостатки.

Основные отличительные особенности СОАВ, выполненных на основе

пиротехнических средств и ДУЗ, вытекают, в первую очередь, из принципа действия и конструкции (рисунок 8). Как видно из рисунка 8 в состав СОАВ пиротехнической и СОАВ, выполненной на базе ДУЗ входят абсолютно различные элементы, за исключением электрожгутов и электроразъёмов. Номенклатура конструктивных элементов пиротехнической СОАВ гораздо более широкая – в неё входят различные элементы, изготавливающиеся из металлических материалов, что в свою очередь сказывается на габаритных и, главное, массовых характеристиках СОАВ.

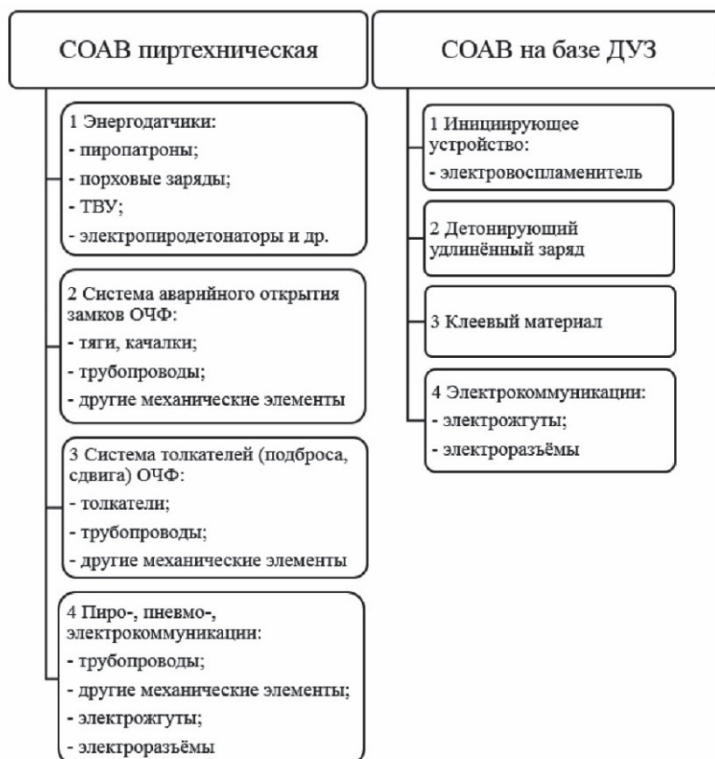


Рисунок 8 – Основные элементы, входящие в состав СОАВ

СОАВ современных ЛА, сконструированные на пиротехнических принципах, в целом удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, в том числе и по безопасности их применения для членов экипажа. Однако такие СОАВ имеют ряд существенных недостатков. Они могут не удовлетворять требованиям по основному техническому параметру, характеризующему эффективность и техническое совершенство СОАВ – времени, необходимому для безопасного образования аварийного выхода. Особенно этот недостаток усугубляется на многоместных ЛА, где фонарь состоит из нескольких откидных частей.

Анализируя временные характеристики СОАВ, можно сделать вывод, что оптимальное время образования аварийного выхода для одноместных ЛА достигается на скоростях более 600 км/ч. А для ЛА, имеющих общую откидную часть фонаря на две кабины, время образования аварийного выхода не может достиг-

нуть оптимального значения во всем диапазоне скоростей, но достигает минимального значения на скоростях более 800 км/ч.

На режимах взлета, посадки и околонулевых скоростях движения ЛА отход ОЧФ от самолёта вследствие малой энергии набегающего потока не интенсивен, что приводит к увеличению времени, необходимого для безопасного образования аварийного выхода. Это ведет к увеличению вероятности трагического исхода при аварийном покидании ЛА.

У СОАВ, выполненных на базе ДУЗ, масса системы и время образования аварийного напротив является главным преимуществом. Время образования аварийного выхода практически не зависит от скорости и высоты полета и составляет, как правило, около 0,05 с. Наличие такого времени образования аварийного выхода при возникновении аварийных ситуаций на малых скоростях и высотах полёта, на режимах взлёта и посадки, при рулении по ВПП и стоянке (при всех этих режимах развитие аварийной ситуации происходит наиболее скоротечно) значительно повышает вероятность спасения экипажа и эффективность всего комплекса СПАП.

Однако, при использовании ДУЗ в конструкции СОАВ возникает ряд неблагоприятных факторов, воздействие которых может нанести существенный вред здоровью человека.

При применении ДУЗ могут возникать такие негативные факторы как:

- 1) избыточное давление, возникающее при подрыве ДУЗ, которое может привести к повреждениям органов слуха и зрения;
- 2) акустический импульсный шум большой интенсивности, который может привести к необратимым изменениям в органе слуха летчика;
- 3) токсичные газы, возникающие при сгорании веществ, применяемых в ДУЗ, данный фактор не значительно воздействует на организм летчика;
- 4) образование осколков остекления фонаря, имеющих острые края, которые могут нанести дополнительные повреждения летчику и вызвать порезы полетного обмундирования и защитного снаряжения.

Вместе с тем, опыт проведения испытаний СОАВ, выполненных на базе ДУЗ, показывает, что факторы, перечисленные в п. 1-3, или не превышают допустимых норм, или вполне устраняются за счёт применения рациональной конструкции и соответствующего защитного снаряжения лётчика.

Главным недостатком таких СОАВ является наличие осколков остекления при образовании аварийного выхода. Данный недостаток в большей степени начинает проявляться на больших скоростях полёта. По некоторым исследованиям на скоростях выше 500 км/ч.

### **Выводы**

Таким образом, подводя итог анализу отличительных особенностей, преимуществ, недостатков СОАВ, выполненных на основе пиротехнических средств и ДУЗ можно отметить следующие основные моменты:

- основными отличительными особенностями рассматриваемых СОАВ являются конструктивное исполнение и масса. Так, например, масса пиротехнических СОАВ может составлять несколько десятков килограмм, а СОАВ, выполненной на базе ДУЗ, всего лишь несколько килограмм.

- основным преимуществом пиротехнических СОАВ является безопасность образования аварийного выхода для членов экипажа во всём диапазоне полёта ЛА;

- основным недостатком пиротехнических СОАВ является время образования аварийного выхода, которое может превышать требуемые несколько десятых долей секунды;

- основным преимуществом СОАВ, выполненных на базе ДУЗ, является время образования аварийного выхода, которое практически не зависит от скорости полета ЛА и составляет, как правило, около 0,05 с;

- основным недостатком СОАВ, выполненных на базе ДУЗ, является наличие осколков остекления, способных травмировать члена экипажа или повредить защитное снаряжение. Данный недостаток в большей степени начинает проявляться на больших скоростях полёта;

- при разработке новых комплексов СПАП ЛА наиболее рациональным будет применение в их составе комбинированных СОАВ, обеспечивающих:

а) образование аварийных выходов при полёте ЛА на малых скоростях и высотах – без сброса фонаря (при помощи ДУЗ);

б) образование аварийных выходов при полёте на больших скоростях – со сбросом ОЧФ.

#### *Литература*

1. Алфёров М.В., Сосунов М.В. Анализ отличительных особенностей, преимуществ и недостатков систем образования аварийных выходов, выполненных на основе пиротехнических средств и детонирующих удлинённых зарядов // Отчёт. Войсковая часть 15650-16. 2020 год. 39с.
2. Алфёров М.В., Сосунов М.В. Оценка влияния воздействующих факторов на технические характеристики систем образования аварийных выходов, выполненных на основе детонирующих удлинённых зарядов // Отчёт. Войсковая часть 15650-16. 2020 год. 38с.
3. Африканов Е.А., Виноградов Н.Н. Расчётная оценка кинетической энергии осколков остекления фонаря кабины, образующихся при разрушении остекления фонаря с целью образования аварийного выхода для кресла с лётчиком при катапультировании // Отчёт. ГНЦ РФ «ЛИИ имени М.М. Громова». 2003 год. 25с.

УДК 621.396.96:621.26

**Точность измерения информационного параметра сигнала  
в авиационных и ракетно-космических радиосистемах при наличии  
аддитивных и мультипликативных помех с низким уровнем.  
Часть 1**

**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,

**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

*Рассмотрено и проанализировано влияние флуктуационных стационарных мультипликативных помех, действующих одновременно с аддитивными помехами, на точность измерения неэнергетических параметров информационных сигналов. Показано, что при низком уровне мультипликативных и аддитивных помех оценка одного параметра полезного сигнала оказывается несмещенной, а ее дисперсия представляет сумму двух слагаемых, первое учитывает влияние аддитивных помех, второе – мультипликативных. Наиболее опасными являются медленные мультипликативные помехи.*

Радиотехническое приемное устройство, аддитивные и мультипликативные помехи, «низкий» уровень помех, условная вероятность правильного измерения информационного параметра.

**Accuracy of measurement of the signal information parameter  
in aviation and space-rocket radio systems in the presence of additive  
and multiplicative interference with a low level.  
Part 1**

**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,

**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

*The influence of fluctuating stationary multiplicative interference acting simultaneously with additive interference on the accuracy of measurement of non-energy parameters of information signals is considered and analyzed. It is shown that at a low*



*level of multiplicative and additive interference, the estimation of one parameter of the useful signal is unbiased, and its dispersion is the sum of two terms, the first takes into account the influence of additive interference, the second – multiplicative. Slow multiplicative interference is the most dangerous.*

Radio-technical receiving device, additive and multiplicative interference, «low» level of interference, conditional probability of correct measurement of the information parameter.

**Введение.** Проведем анализ влияния флуктуационных стационарных мультипликативных (модулирующих) помех (МП), при одновременном воздействии аддитивных помех (АП), на точность измерения неэнергетических параметров сигналов, при их низком уровне, когда оценочное значение параметров с вероятностью, близкой к единице, лежит вблизи его истинного значения.

При анализе предполагаем, что радиотехническое приемное устройство рассчитано на прием неискаженного МП сигнала на фоне АП, а факт наличия сигнала, параметры которого измеряются, достоверно известен.

Как известно, термин «низкий» уровень для АП определяется величиной отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности АП

$$\rho^2 = 2E/N_0,$$

где  $E$  – энергия информационного сигнала;  $N_0$  – спектральная плотность мощности аддитивной помехи.

Если величина  $\rho^2 \gg 1$ , то принято считать, что уровень АП низкий, в противном случае – высокий.

Заметим, что при совместном действии МП и АП указанные термины нуждаются в уточнении.

При низком уровне АП и МП ошибки измерения невелики. В этом случае помехи приводят лишь к искажению формы выходного сигнала приемного устройства, смещая его максимум. При наличии МП малые искажения формы выходного сигнала могут иметь место в двух случаях:

- при медленных МП, когда интервал корреляции функции помеховой модуляции соизмерим с длительностью принимаемого сигнала;

- при произвольном интервале корреляции функции помеховой модуляции, если мощность неискаженной части сигнала много больше мощности флуктуаций, обусловленных МП, мощности помеховой составляющей на выходе линейной части приемного устройства в точке  $l = l_0$ , где  $l_0$  – истинное значение параметра принимаемого информационного сигнала.

С учетом [4], последнее условие можно записать как:

$$\frac{\alpha_0^2 E^2 C^2}{\sigma_s^2(l_0)} \gg 1,$$

где  $\alpha_0$  – относительный уровень неискаженной части сигнала на выходе фильтра;  $\sigma_s^2(l_0)$  – дисперсия помеховой составляющей сигнала на выходе фильтра;  $C^2$  – постоянный коэффициент, пропорциональный коэффициенту усиления приемного устройства.

Заметим, что в дальнейшем для простоты анализа, с соблюдением получаемых результатов, примем  $C = 1$ .

Сформулированное условие малости МП является достаточно наглядным, близким по смыслу к условию малости АП, и оно будет использоваться в дальнейшем при анализе влияния МП на ошибки единичных измерений информационного параметра (не следящий измеритель).

Условие малости АП в присутствии МП естественно записать в виде  $\alpha_0^2 \rho^2 \gg 1$ .

Таким образом, здесь учитывается уменьшение уровня неискаженной части сигнала за счет действия МП.

В качестве характеристик точности измерения параметров при низком уровне помех примем математическое ожидание, смещение, ошибки измерения  $\Delta l$  и дисперсию ошибки  $\sigma_l^2$ . Влияние МП на точность измерения параметра будем оценивать отношением дисперсии ошибок измерения при наличии МП  $\sigma_l^2$  к дисперсии ошибок измерения в их отсутствие  $\sigma_{l,0}^2$ .

При высоком уровне помех существенно изменяется характер возможных ошибок. За счет помеховой составляющей сигнала, искаженного МП, и за счет АП могут появляться большие «выбросы» выходного сигнала приемного устройства при значениях измеряемого параметра  $l$ , существенно отличающихся от истинного значения. В этом случае первой и основной задачей измерения является задача различения выброса, соответствующего истинному значению параметра, от ложных выбросов.

**Точность измерения информационного параметра при низком уровне аддитивных и мультипликативных помех.** Рассмотрим радиотехническое приемное устройство, оптимальное при оценке одного неизвестного неэнергетического информационного параметра  $l_0$  полезного сигнала  $s(t, l_0)$  со случайной начальной фазой  $\varphi_0$ , распределенной равномерно на интервале  $(0, 2\pi)$ , на фоне нормального белого шума  $n(t)$  с комплексной огибающей  $\dot{N}(t)$ .

Согласно [2, 5], такое приемное устройство по принятой реализации  $y_{\text{вх}}(t) = s(t, l_0) + n(t)$

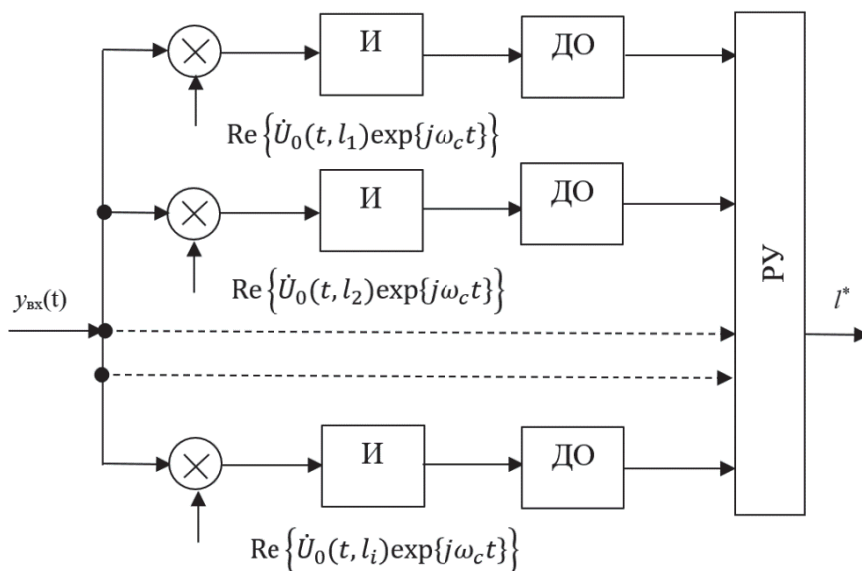
образует функцию  $\Lambda(l)$ , равную логарифму функции правдоподобия  $\Lambda(l) = \ln I_0[Z(l)]$ , (1)

где  $I_0(x)$  – функция Бесселя нулевого порядка мнимого аргумента;  $Z(l)$  – огибающая сигнала на выходе линейной части оптимального измерителя по параметру  $l$ , которая записывается в виде:

$$Z(l) = \frac{1}{2} \left| \int_0^{T_n} \dot{N}(t) U_0(t, l) \exp\{-j\Phi(t, l)\} dt + \exp\{j\varphi_0\} \times \int_0^{T_n} U(t, l_0) U_0(t, l) \exp\{j[\Phi(t, l_0) - \Phi(t, l)]\} dt \right|, \quad (2)$$

где  $T_n$  – интервал наблюдения;  $U(t, l_0)$  – информационный сигнал;  $U_0(t, l)$  – опорный сигнал;  $\Phi(t, l_0)$  – закон фазовой модуляции информационного сигнала;  $\Phi(t, l)$  – закон фазовой модуляции опорного сигнала.

Выражения (1), (2) описывают структуру оптимального приемного устройства для измерения одного информационного параметра сигнала со случайной начальной фазой на фоне АП (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Структурная схема оптимального приемного устройства, измеряющего информационный параметр сигнала со случайной начальной фазой на фоне АП, где И – интегратор; ДО – детектор огибающей; РУ – решающее устройство**

Поступающая на вход многоканального приемного устройства аддитивная смесь сигнала и помехи умножается на опорный сигнал с комплексной огибающей  $\dot{U}_0(t, l)$  со всеми возможными значениями параметра  $l$  и интегрируется линейной системой в течении времени наблюдения  $T_n$ .

После каждой линейной системы стоит детектор огибающей с характеристикой  $\ln I_0(Z)$ . Решающее устройство выбирает канал с тем значением параметра  $l$ , при котором функция  $\Lambda(l)$  достигает максимума.

Поскольку при наличии помех сигнал  $\Lambda(l)$  на выходе решающего устройства может иметь несколько пиков, в качестве оценочного значения параметра принимается значение, соответствующее наибольшему из них. При низком уровне помех, надежном измерении параметра, пики, обусловленные наличием помех, с высокой вероятностью будут существенно меньше основного пика функции  $\Lambda(l)$ , сигнала на входе решающего устройства, и поэтому не могут быть приняты за истинный сигнал. При этом влияние помех сведется лишь к искажению формы основного пика.

В данном случае оценочное значение параметра  $l^*$  определяется как решение уравнения правдоподобия относительно параметра  $l$  [5]:

$$\frac{d}{dl} \Lambda(l) = \frac{d}{dl} Z(l) = 0. \tag{3}$$

Решение уравнения (3) при наличии АП и указанные выше статистические характеристики ошибок измерения параметра, среднее значение и дисперсия, полученные, в частности, в работе [5].

В данной статье методика и результаты этой работы обобщаются на случай, когда измерение параметра происходит при одновременном воздействии на сигнал аддитивных и мультипликативных помех.

Представим сигнал, искаженный МП, в виде двух аддитивных составляющих

$$\begin{aligned} u_m(t) &= \operatorname{Re} \left\{ \dot{M}(t) \dot{U}(t) \exp\{j(\omega_c t + \varphi_0)\} \right\} = \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \alpha_0 \sqrt{E} \dot{U}_0(t) \exp\{j(\beta_0 + \varphi_0 + \omega_c t)\} \right\} + \\ &+ \operatorname{Re} \left\{ \dot{V}(t) \sqrt{E} \dot{U}_0(t) \exp\{j(\omega_c t + \varphi_0)\} \right\}, \end{aligned}$$

где амплитуда принимаемого сигнала относительно опорного в отсутствии МП принята численно равной  $\sqrt{E}$ .

Здесь  $\dot{M}(t)$  – функция помеховой модуляции (ФПМ);  $\alpha_0 = \left| \overline{\dot{M}(t)} \right|$ ;  $\beta_0 = \arg \overline{\dot{M}}$ ;  $\overline{\dot{M}}$  – математическое ожидание ФПМ;  $\dot{V}(t)$  – комплексная огибающая помеховой составляющей сигнала, искаженного МП;  $\omega_c$  – несущая частота сигнала.

С учетом этого представления для огибающей суммы сигнала, искаженного МП, и нормального белого шума на выходе линейной части приемного устройства вместо (2) имеем:

$$\begin{aligned} Z(l) &= \left| \exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} \dot{W}_1(l - l_0) + \right. \\ &+ \left. \exp\{j\varphi_0\} \dot{W}_2(l - l_0) + \dot{n}_1(l) \right|, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\dot{W}_1(l - l_0) = \frac{\alpha_0}{2} \int_0^{T_H} \dot{U}(t, l_0) U_0^*(t, l) dt; \quad (5)$$

$$\dot{W}_2(l - l_0) = \frac{1}{2} \int_0^{T_H} \dot{V}(t) \dot{U}(t, l_0) U_0^*(t, l) dt; \quad (6)$$

$$\dot{n}_1(l) = \frac{1}{2} \int_0^{T_H} \dot{N}(t) U_0^*(t, l) dt. \quad (7)$$

В выражениях (4) – (7)  $\dot{W}_1(l - l_0)$  определяет комплексную огибающую преобразованной линейной частью приемника неискаженной части сигнала;  $\dot{W}_2(l - l_0)$  – комплексную огибающую помеховой составляющей сигнала на выходе линейной части, появившейся за счет наличия МП;  $\dot{n}_1(l)$  – комплексную огибающую преобразованного аддитивного шума.

Функция  $\dot{W}_1(l - l_0)$  пропорциональна функции автокорреляции сигнала  $\dot{\rho}(l - l_0)$  по параметру  $l$ , и обладает следующими свойствами, которые будут использованы в дальнейшем:

$$\begin{aligned} \dot{W}_1(l - l_0) &= \dot{W}_1^*(l_0 - l); \\ \dot{W}_1(0) &= \alpha_0 W(0) \geq \left| \dot{W}_1(l - l_0) \right|. \end{aligned}$$

То есть, действительная часть функции  $\dot{W}_1(l - l_0)$  обладает четной, а мнимая – нечетной симметрией относительно точки  $l = l_0$ . В точке  $l = l_0$  функция  $\dot{W}_1(l - l_0)$  становится действительной, а ее модуль достигает максимума.

Для рассматриваемого в данной статье случая, низкого уровня АП и МП отношение мощности неискаженной части сигнала на выходе линейной части приемника  $\dot{W}_1(l - l_0)$  в точке  $l = l_0$  к мощности суммы аддитивных флуктуаций  $\dot{n}_1(l)$  и флуктуаций сигнала, возникающих за счет наличия МП  $\dot{W}_2(l - l_0)$ , в этой же точке много больше единицы. При этом огибающую сигнала (4) можно представить в виде

$$Z(l) \simeq \alpha_0 W(l - l_0) \left[ 1 + 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\exp\{j\beta_0\} W_2^*(l - l_0) \dot{W}_1(l - l_0)}{\alpha_0^2 W^2(l - l_0)} + \frac{\exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l) \dot{W}_1(l - l_0)}{\alpha_0^2 W^2(l - l_0)} \right\} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

В последнем выражении отброшен член

$$\frac{|W_2^*(l - l_0) \dot{W}_1(l - l_0) + \exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l) \dot{W}_1(l - l_0)|^2}{\alpha_0^2 W^4(l - l_0)}$$

ввиду его малости при низком уровне АП и МП.

Разложим полученное выражение для  $Z(l)$  в ряд по степеням функции:

$$[\alpha_0 W(l - l_0)]^{-2} \operatorname{Re}\{\exp\{j\beta_0\} W_2^*(l - l_0) \dot{W}_1(l - l_0) + \exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l) \dot{W}_1(l - l_0)\}, \quad (9)$$

которая при низком уровне помех в среднем квадратическом смысле много меньше единицы.

Ограничиваясь двумя членами указанного степенного ряда, получим

$$\begin{aligned} Z(l) &\simeq \alpha_0 W(l - l_0) + \frac{\operatorname{Re}\{\exp\{j\beta_0\} W_2^*(l - l_0) \dot{W}_1(l - l_0)\}}{\alpha_0 W(l - l_0)} + \\ &\frac{\operatorname{Re}\{\exp\{j(\varphi_0 + \beta_0)\} n_1^*(l) \dot{W}_1(l - l_0)\}}{\alpha_0 W(l - l_0)} = \\ &= \alpha_0 W(l - l_0) + n_m(l - l_0) + n_a(l). \end{aligned} \quad (10)$$

Выражение (10) тем точнее описывает огибающую  $Z(l)$ , чем меньше функция (9), средний квадрат которой равен отношению суммы мощностей аддитивных помех и флуктуаций, обусловленных МП, помеховой составляющей сигнала, к мощности неискаженной части сигнала на выходе согласованного фильтра.

Первые два слагаемых в (10) определяют искаженную МП огибающую выходного сигнала, третье – флуктуации огибающей, обусловленные АП.

Как видно из выражения (10), использование представления сигнала, искаженного МП, в виде двух аддитивных составляющих позволяет в первом приближении свести эффект действия МП на процесс измерения параметров к появлению дополнительных аддитивных флуктуаций.

При низком уровне помех для решения уравнения правдоподобия (5) можно воспользоваться широко известным методом, основанным на разложении сигнальных членов в выражении для огибающей (10) в ряд Тейлора по степеням разности  $l - l_0$ . В силу малости ошибок измерения в разложениях функции  $W(l - l_0)$ ,  $n_m(l - l_0)$  можно ограничиться тремя первыми членами.

Подставляя разложения функций  $W(l - l_0)$ ,  $n_m(l - l_0)$  в ряд Тейлора в выражение (3) и учитывая, что

$$\frac{d}{dl}W(l-l_0)|_{l=l_0} = 0,$$

получим следующее выражение для ошибки измерения параметра при наличии АП и МП:

$$\Delta l = l^* - l_0 = -\frac{\frac{d}{dl}[n_m(l-l_0)+n_a(l)]|_{l=l_0}}{\frac{d^2}{dl^2}[\alpha_0 W(l-l_0)+n_m(l-l_0)]|_{l=l_0}}. \quad (11)$$

Как следовало ожидать, в отсутствие МП полученное выражение совпадает с первым приближением для ошибки измерения, найденном в [5] с использованием так называемого метода малого параметра.

При низком уровне МП второе слагаемое в знаменателе (11) в среднеквадратическом смысле много меньше первого, поэтому в дальнейшем мы им пренебрегаем по сравнению с  $\alpha_0 W(l-l_0)$ .

Учитывая, что функции  $n_m(l-l_0)$ ,  $n_a(l)$  (10) не коррелированы и имеют нулевые средние имеют нулевые средние, и пренебрегая в знаменателе (11) вторым слагаемым по сравнению с первым, видим, что среднее значение ошибок измерения определяется выражением

$$\begin{aligned} \sigma_l^2 = \overline{\Delta l^2} &= \sigma_{l,a}^2 + \sigma_{l,m}^2 = \left[ \alpha_0 \frac{d^2}{dl^2} W(l-l_0) \right]_{l=l_0}^{-2} \times \\ &\times \left[ \frac{d^2}{dl_1 dl_2} \overline{n_a(l_1)n_a(l_2)} + \right. \\ &\left. + \frac{d^2}{dl_1 dl_2} \overline{n_m(l_1-l_0)n_m(l_2-l_0)} \right]_{l_1=l_2=l=l_0}. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, при низком уровне МП и АП оценка одного параметра полезного сигнала оказывается несмещенной, а ее дисперсия представляет сумму двух слагаемых, первое из которых  $\sigma_{l,a}^2$  с точностью до постоянного множителя  $\alpha_0^2$  повторяет выражение для дисперсии оценки параметра на фоне АП, а второе,  $\sigma_{l,m}^2$  учитывает влияние МП.

С учетом результатов работы [5] выражение для  $\sigma_{l,a}^2$  может быть записано в виде

$$\sigma_{l,a}^2 = \frac{\sigma_{l_0}^2}{\alpha_0^2} = - \left[ q^2 \alpha_0^2 \frac{d^2}{dl^2} |\rho(l-l_0)|_{l=l_0} \right]^{-1}, \quad (13)$$

где  $q^2 = 2E/N_0$ ;  $\sigma_{l_0}^2$  – дисперсия ошибки измерения параметра в отсутствие МП.

Для вычисления величины  $\sigma_{l,m}^2$  необходимо определить корреляционную функцию флуктуационной составляющей  $n_m(l_2-l_0)$  по параметру  $l$ :

$$\begin{aligned} \overline{n_m(l_1-l_0)n_m(l_2-l_0)} &= \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \exp\{j2\beta_0\} W_2^*(l_1-l_0) \dot{W}_1(l_2-l_0) \times \right. \\ &\times \exp\{j[\beta(l_1-l_0) + \beta(l_2-l_0)]\} + \\ &+ W_2^*(l_1-l_0) \dot{W}_1(l_2-l_0) \times \\ &\left. \times \exp\{j[\beta(l_1-l_0) - \beta(l_2-l_0)]\} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Как видно из выражения (14), корреляционная функция  $n_m(l_1 - l_0)n_m(l_2 - l_0)$  зависит не только от  $l_1$  и  $l_2$ , но и от  $\beta_0$  – аргумента среднего значения комплексной ФПМ  $\dot{M}(t)$ .

В тех случаях, когда плотность вероятностей фазовых искажений сигнала – симметричная функция, а амплитудные искажения либо функционально связаны с фазовыми и также имеют симметричную плотность вероятностей, либо независимы от фазовых искажений, аргумент постоянной составляющей ФПМ  $\beta_0$  равен нулю. При этом в (14) зависимость от  $\beta_0$  отсутствует.

Рассмотрим второе слагаемое в выражении (14), обозначив его  $K_{m,1}$ :

$$K_{m,1}(l_1, l_2) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \overline{W_2^*(l_1 - l_0)W_2(l_2 - l_0)} \times \right. \\ \left. \times \exp\{j[\beta(l_1 - l_0) - \beta(l_2 - l_0)]\} \right\}.$$

Второй смешанный момент функции  $W_2(l - l_0)$  совпадает с корреляционной функцией сигнала, искаженного МП, на выходе линейного фильтра по параметру  $l$  и будет равен

$$\overline{W_2^*(l_1 - l_0)W_2(l_2 - l_0)} = \\ = \frac{E}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \rho^*(l_1 - l_0, \Omega) \dot{\rho}(l_2 - l_0, \Omega) = \\ = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) W(l_1 - l_0, \Omega) W(l_2 - l_0, \Omega) \times \\ \times \exp\{j[\beta(l_2 - l_0, \Omega) - \beta(l_1 - l_0, \Omega)]\} d\Omega, \quad (15)$$

где  $G_V(\Omega)$  – энергетический спектр флуктуаций ФПМ;  $\sqrt{E}\dot{\rho}(l - l_0, \Omega)$  – отклик линейной части приемного устройства на неискаженный сигнал, сдвинутый по частоте относительно ожидаемого на  $\Omega$ .

С учетом (15)

$$K_{m,1}(l_1, l_2) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) W(l_1 - l_0, \Omega) W(l_2 - l_0, \Omega) \times \\ \times \cos[\beta(l_1 - l_0) - \beta(l_2 - l_0) - \\ - \beta(l_1 - l_0, \Omega) + \beta(l_2 - l_0, \Omega)] d\Omega. \quad (16)$$

После аналогичных преобразований для первого сигнала в (14) получим

$$K_{m,1}(l_1, l_2) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) W(l_1 - l_0, \Omega) W(l_2 - l_0, \Omega) \times \\ \times \cos[\beta(l_1 - l_0) - \beta(l_2 - l_0) - \\ - \beta(l_1 - l_0, \Omega) + \beta(l_2 - l_0, \Omega)] d\Omega, \quad (17)$$

где  $G_D(\Omega)$  – преобразование Фурье от

$$G_V(t_1 - t_2) = [\dot{M}(t_1) - \alpha_0 \exp\{j\beta_0\}] [\dot{M}(t_2) - \alpha_0 \exp\{j\beta_0\}].$$

Для вычисления  $\sigma_{l,m}^2$  в соответствии с (12) необходимо определить вторую смешанную производную от  $n_m(l_1 - l_0)n_m(l_2 - l_0)$  в точке  $l_1 = l_2 = l = l_0$ .

После дифференцирования в (16) и (17), производимого независимо от интегрирования, и несложных преобразований получим

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial l_1 \partial l_2} K_{M.1}(l_1, l_2)|_{l_1=l_2=l_0} = K''_{M.1}(0,0) = \\ & = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \{ [W'(0, \Omega)]^2 + \\ & + W^2(0, \Omega) [\beta'(0) - \beta'(0, \Omega)]^2 \} d\Omega, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} K''_{M.2}(0,0) & = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \{ ([W'(0, \Omega)]^2 - W^2(0, \Omega) \times \\ & \times [\beta'(0) - \beta'(0, \Omega)]^2 \} \cos 2[\beta(0) - \beta(0, \Omega)] - \\ & - 2W'(0, \Omega)W(0, \Omega)[\beta'(0) - \beta'(0, \Omega)] \times \\ & \times \sin 2[\beta(0) - \beta(0, \Omega)] \} d\Omega. \end{aligned} \quad (19)$$

Подстановка (18), (19) в (12) дает искомое выражение для дисперсии оценки параметра с учетом действия МП и АП.

Выражения (18), (19) весьма сложны, однако в некоторых случаях они могут быть значительно упрощены.

1. Пусть  $\beta(0) = \beta(0, \Omega) = 0$ , что имеет место, например, при измерении частоты немодулированного радиоимпульса. С учетом принятого условия

$$\sigma_{l.M}^2 = \frac{1}{4\pi} [\alpha_0 W''(0)]^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} W'(0, \Omega) [G_V(\Omega) + G_D(\Omega)] d\Omega. \quad (20)$$

2. Пусть  $W(l, \Omega) = p(l)r(\Omega)$ ,  $\frac{d}{dt}p(l)|_{l=0} = 0$ .

Представление  $W(l, \Omega)$  в форме  $W(l, \Omega) = p(l)r(\Omega)$  имеет место, как будет видно далее, например, при измерении времени прихода радиоимпульсов с постоянной частотой заполнения, а также фазокодовоманипулированных сигналов и сигналов с шумовой модуляцией на фоне белого шума [1, 3, 6]. Для рассматриваемого случая

$$\begin{aligned} \sigma_{l.M}^2 & = \frac{1}{4\pi} [\alpha_0 W''(0)]^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} \{ G_V(\Omega) W^2(0, \Omega) [\beta'(0) - \beta'(0, \Omega)]^2 - \\ & - G_D(\Omega) W^2(0, \Omega) [\beta'(0) - \beta'(0, \Omega)]^2 \times \\ & \times \cos 2[\beta(0) - \beta(0, \Omega)] \} d\Omega. \end{aligned} \quad (21)$$

3. Пусть  $\beta(l, \Omega) = \mu l \Omega$ , то есть аргумент  $\beta(l, \Omega)$  пропорционален ( $\mu$  – коэффициент пропорциональности) измеряемому параметру  $l$  и частоте  $\Omega$ , тогда  $\beta(0) = \beta(0, \Omega) = 0$  и

$$\begin{aligned} \sigma_{l.M}^2 & = \frac{1}{4\pi} [\alpha_0 W''(0)]^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} G_V(\Omega) \{ [W'(0, \Omega)]^2 + \\ & + W^2(0, \Omega) [\beta'(0, \Omega)]^2 \} d\Omega + \frac{1}{4\pi} [\alpha_0 W''(0)]^{-2} \int_{-\infty}^{\infty} G_D(\Omega) \times \\ & \times \{ [W'(0, \Omega)]^2 - W^2(0, \Omega) [\beta'(0, \Omega)]^2 \} d\Omega. \end{aligned} \quad (22)$$

Выражения (20)-(22) показывают, что дисперсия ошибок, обусловленная наличием МП, существенно зависит от спектральных характеристик ФПМ.

Как видно из (20), наибольшие ошибки измерения параметра, обусловленные МП низкого уровня, имеют место в случае, когда ширина энергетического спектра флуктуаций ФПМ соизмерима с шириной огибающей выходного сиг-



нала по частотной оси (с шириной функции  $|\dot{\rho}(0, \Omega)|$ ).

Таким образом, наиболее опасными являются сравнительно медленные МП. Аналогичный вывод можно сделать также для примеров 2 и 3 (формулы (21), (22)) при условии, что функции  $W^2(0, \Omega)$  и  $[W'(0, \Omega)]^2$  убывают с ростом частоты гораздо быстрее, чем  $[\beta'(0, \Omega)]^2$ .

Общие соотношения для дисперсии ошибок измерения параметра при наличии МП, как уже было указано ранее, справедливы при условии малости функции (9). В среднеквадратическом смысле это условие имеет вид

$$[\alpha_0 W(l - l_0)]^{-2} \{0,5|\dot{n}_1|^2 + [n_m(l - l_0)]^2\} \ll 1. \quad (23)$$

Учитывая, что

$$|\dot{n}_1(l)|^2 = N_0;$$

$$[n_m(l - l_0)]^2 = K_{m.1}(l_1, l_2) + K_{m.2}(l_1, l_2), \quad l_1 = l_2 = l, \quad (24)$$

вместо (23) имеем

$$[\alpha_0 W(l - l_0)]^{-2} \left[ \frac{N_0}{2} + K_{m.1}(l_1, l_2) + K_{m.2}(l_1, l_2) \right]_{l_1=l_2=l} \ll 1. \quad (25)$$

Поскольку решение уравнения правдоподобия (5) при малых ошибках ищется в окрестностях точки  $l = l_0$ , в выражении (25) для ориентировочных оценок может быть принято  $l = l_0$ , тогда условие применимости полученных соотношений записывается в виде

$$\begin{aligned} & \frac{1}{q^2} + \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{\rho}(0, \Omega)|^2 \{G_V(\Omega) + \\ & + G_D(\Omega) \cos 2[\beta(0, \Omega)]\} d\Omega \ll \alpha_0^2, \end{aligned} \quad (26)$$

где учтено, что  $\beta(0) = 0$ .

**Выводы.** Таким образом, рассмотрена и проанализирована точность измерения информационного параметра сигнала в авиационных и ракетно-космических радиосистемах при наличии аддитивных и мультипликативных помех с низким уровнем. Получены общие выражения для измерения частоты и времени прихода полезного сигнала.

Показано, что при низком уровне мультипликативных и аддитивных помех оценка одного параметра полезного сигнала оказывается несмещенной, а ее дисперсия представляет сумму двух слагаемых, первое из которых с точностью до постоянного множителя повторяет выражение для дисперсии оценки параметра на фоне аддитивных помех, а второе, учитывает влияние мультипликативных помех.

Показано, что наиболее опасными являются сравнительно медленные мультипликативные помехи.

#### Литература

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Герасимов Б.М. и др. Вопросы статистической теории радиолокации. Под ред. Г.П. Тартаковского. Т.1 и 2 // М.: Советское радио. 1963 и 1964. 424 с.

2. Гуткин Л.С. Потенциальная точность измерения в одноканальных и многоканальных измерителях параметров сигналов // Радиотехника. 1964. Т.19. № 3,4.
3. Докторов А.Л. Спектры и совместная корреляционная функция модуляции сигналов с фазовой манипуляцией // Электросвязь. 1966. № 7.
4. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпухин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов // М.: Советское радио. 1972. 480 с.
5. Куликов Е.И. Вопросы оценок параметров сигналов при наличии помех // М.: Советское радио. 1969. 244 с.
6. Фалькович С.Е. Прием радиолокационных сигналов на фоне флуктуационных помех // М.: Советское радио. 1961. 310 с.

УДК 629.635.017.1.004.58:006.354

## **Перспективные методы доказательства соответствия топливных систем требованиям Нормативной документации**

**С.В. Байков**, ведущий инженер,  
КБ Инженерного центра ПАО «Корпорация «Иркут», г. Москва,  
**А.И. Зинина**, техник,  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), ФГБОУ ВО Московский Авиационный Институт (Научно-исследовательский университет), (МАИ), г. Москва

*В статье рассмотрены перспективные методы доказательства соответствия топливных систем требованиям Нормативной документации. Сертификация это одна из важнейших форм обеспечения качества создаваемых самолетов и вертолетов. Для успешной реализации процесса сертификации необходимо проведение большого количества как наземных, так и летных испытаний. В данной статье описаны методы математического моделирования, с помощью которых можно сократить как сроки, так и стоимость реализации не только топливной системы, но и вертолета в целом.*

Сертификация, математическая модель, топливная система, вертолет.

## **Promising methods of proving the compliance of fuel systems with the requirements of the Regulatory Documentation**

**S.V. Bajkov**, lead engineer, Design Bureau of the Engineering Center of PJSC «Corporation «Irkut», Moscow,  
**A.I. Zinina**, technician,  
Moscow Aviation Institute (National Research University) (MAI), Moscow

*The article considers promising methods of proving the compliance of fuel systems with the requirements of the Regulatory Documentation. Certification is one of the most important forms of quality assurance for aircraft and helicopters being built. For the successful implementation of the certification process, a large number of both ground and flight tests are required. This article describes the methods of mathematical modeling that can be used to reduce both the terms and the cost of implementing not only the fuel system, but also the helicopter as a whole.*

Certification, mathematical model, fuel system, helicopter.

### **1. Введение.**

Одним из важных этапов создания современной авиационной техники является получение воздушным судном соответствующих сертификатов, позволяющих перейти к его коммерческой эксплуатации.

В настоящее время сертификация является одной из наиболее эффективных форм обеспечения качества создаваемых самолетов и вертолетов, а также подтвер-

ждением возможности их эксплуатации на внутреннем и внешнем рынках [1].

Для успешной реализации процесса сертификации необходимо проведение большого количества как наземных, так и летных испытаний.

При этом необходимо учитывать, что при создании современного воздушного судна в целом, его систем и агрегатов в частности, все большую роль занимает процесс создания их цифровой модели [2].

Цифровая модель современных систем авиационной техники начинает создаваться на самых ранних этапах проектирования. Она совершенствуется с каждым этапом и по сути, сопровождает весь жизненный цикл изделия [3-5].

При этом также активно рассматривается вопрос замены натуральных испытаний на цифровые испытания. С помощью цифровых можно промоделировать как поведение всего самолета, так и его систем. Выявить первичные причины отказа, провести наблюдение за моделью в нештатной ситуации [6].

Одной из важнейших систем современного вертолета является топливная система. От ее безотказной и надежной работы зависит безопасная эксплуатация воздушного судна.

Соответственно, необходимо обеспечить процессы проектирования и сертификации таким образом, чтобы минимизировать вероятность ошибок и необходимость их исправления на этапе проведения наземных и летных испытаний.

Одним из способов добиться указанных выше результатов является создание математической модели системы в целом и ее отдельных узлов и агрегатов. Модель позволит симитировать полет во всем эксплуатационном диапазоне, в том числе и с учетом отказных ситуаций [7].

С целью оптимизации процессов проектирования и сертификации при создании топливной системы современного вертолета МАИ и АО «ОКБ «Кристалл» в рамках реализации постановления Правительства РФ от 09.04.2010 N 218 (ред. от 21.07.2016) ведут работы по созданию комплекса средств математического моделирования в совокупности с испытательной установкой.

Топливная система современного вертолета, помимо соответствия требованиям технического задания и отраслевых стандартов, должна отвечать требованиям соответствующих разделов авиационных правил (АП-27 (Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории) и АП-29 (Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории) [8, 9].

При сертификации вертолетов в Европе и Америке необходимо руководствоваться соответствующими стандартами данных регионов: Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Small Rotorcraft CS-27, Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Rotorcraft CS-29, Авиационные правила (Нормы летной годности самолетов транспортной категории). Часть 25 и другие [10-13].

В настоящей работе рассматриваются возможные методы подтверждения соответствия требованиям сертификационного базиса, предлагаются пути снижения финансовых и временных затрат при сертификации топливной системы за счет использования методов математического моделирования.

## **2. Аналитический обзор**

На топливную систему в соответствии с АП-27 и АП-29 распространяются требования разделов «Топливная система», «Агрегаты и элементы топливной сис-

темы», «Оборудование».

К наиболее существенным пунктам авиационных правил, влияющих на формирование облика топливной системы вертолета, относятся: 29.29 (a)(b), 29.301(a), 29.603 (a)(b)(c), 29.605 (a), 29.611 (a), 29.951 (a)(b)(c), 29.952(a)(b)(2)(c)(d)(f)(g), 29.953 (a), 29.955(a)(1)(2)(3)(5)(6)(c), 29.957 (a)(b), 29.959, 29.961, 29.963(a)(b)(d), 29.965(a)(c)(d), 29.967(a), 29.969, 29.971(a)(b)(c)(d), 29.973(a)(b), 29.975(a)(2)(3)(4)(5), 29.977(a)(2)(b)(c)(d), 29.979(a)(b)(c)(d), 29.991 (a)(b), 29.993 (a)(b)(c)(d), 29.995 (b), 29.997 (a)(b)(c)(d), 29.999 (a)(b), 29.1001 (a)(b)(c)(d)(e), 29.1183 (a), 29.1189 (a)(b)(c)(e)(f), 29.1301(a)(b)(c)(d)(a\*), 29.1309 (a)(b)(2)(c)(d)(e)(1)(2)(3)(i)(f)(g)(h), 29.1337 (b)(1), 29.1353 (a)(b), 29.1357 (a)(b)(c)(d)(e), 29.1431 (a), 29.1529, 29.1541, 29.1553, 29.1557 (c)(1) и т.д.

Данный список не является исчерпывающим и может дополняться и/или сокращаться в процессе проектирования и сертификации, в том числе и соответствующими пунктами Европейской и Американской нормативной документации (при ориентации продукции на рынки указанных регионов).

При доказательстве соответствия разрабатывается таблица соответствия требованиям сертификационного базиса с указанием так называемых МОС (методов определения соответствия).

Основными методами определения соответствия являются: инженерная оценка (коды МОС: 0-3), испытания (коды МОС: 4-8), опыт эксплуатации (коды МОС: 9).

В настоящей статье рассматривается возможность использования материалов по коду МОС «2» (моделирование) для уменьшения объема испытаний по кодам МОС «4», «5», «6» (стендовые, наземные и летные испытания, соответственно).

Получение доказательного материала по кодам МОС «5», «6» предполагает собой наземные и летные испытания штатной системы объекта.

Для топливной системы, стендовые испытания представляют собой испытания комплектующих изделий (по оценке работоспособности и по оценке на воздействующие факторы) с использованием полноразмерных стендов системы изделия, максимально приближенный к штатной схеме.

Соответствие схем стенда реальному объекту, является одной из важнейших задач при его создании.

Даже небольшие отклонения параметров трубопроводов, высотности установки, неточности в расположении агрегатов являются факторами, уменьшающими достоверность стендовых исследований. Также нужно отметить, что реальные нагрузки на систему и состояния работы (перегрузки, пространственные положения), практически невозможно реализовать в условиях стендовых испытаний.

Таким образом необходимо понимать, что проведение максимального количества натурных (как стендовых, так и естественно наземных и летных испытаний) является весьма трудоемкой и ресурсозатратной задачей.

Согласование с сертификационными органами возможностей использования методов моделирования, при условии адекватности модели и ее корректной верификации и валидации, даст возможность сокращения натурных испытаний. Из этого следует, что возможно сократить как сроки, так и стоимость реализации не только топливной системы но и вертолета в целом.

### 3. Инженерный анализ

В рамках создания комплекса средств математического моделирования в совокупности с испытательной установкой, был проведен анализ требований, предъявляемых к топливной системе со стороны производителя вертолета. Также был проведен анализ требований нормативной документации, в частности Авиационных правил, который показал, что при создании точной математической модели агрегатов системы и соответственно модели самой системы в целом, а так же при валидации данных моделей с помощью минимально необходимого набора испытаний на испытательной установке, возможна подготовка материалов для вынесения их на рассмотрение экспертами сертификационных органов для частичной замены натуральных испытаний на результаты моделирования.

Примером подобного подхода могут являться предложения по изменению МОС при закрытии пункта АП 29.951 (а). В данном примере вместо проведения натуральных испытаний, доказывающих обеспеченность питания двигателей топливом, на различных режимах работы двигателя и переходных режимах, во всех ожидаемых условиях эксплуатации (при нормальном функционировании топливной системы; при неработающих насосах подкачки и т.п.) демонстрируется работоспособность на всех заявляемых режимах работы вертолета. Имитируемые режимы содержат все маневры на которые запрашивается сертификат типа. Проводимое моделирование демонстрирует обеспеченность топливом двигателей (потребный расход) на всех допустимых режимах работы, с учетом ограничений, во всех пространственных положениях вертолета (крен, тангаж), чем подтверждается работоспособность системы в процессе установившихся маневров (постоянно действующие нормальная, продольная и боковая перегрузки, в отдельности и сочетания). Затем, совместно с экспертами сертификационных властей выбирается ряд наиболее критичных случаев (существенно меньший чем полная летная программа) на которых демонстрируется адекватность и точность представленных моделей.

Аналогичным образом рассматривается возможность замены натуральных испытаний на математическое моделирование для пункта 29.951 (с) для которого создается модель учитывающая насыщение топлива водой и его использование в различных температурных диапазонах.

### 4. Выводы

Использование такого метода подтверждения соответствия как моделирование, при сертификации, является перспективным в плане сокращения объема испытаний, объема средств на испытания, а также сроков проведения испытаний.

Известен опыт использования данных моделирования при сертификации авиационной техники, например Airbus-350XWB, Airbus-380, Boeing-787, SSJ-100 и ряда других проектов.

#### *Литература*

1. Ахметшин Т.Ф. Сертификация авиационной техники // Vestnik UGATU. 2013. ISSN 2225-2789.
2. Smagin D.I., Savelev R.S. and Satin A.A. Methods for the Design of Modern On-Board Systems of Advanced Aircraft, 2019 IEEE 10th International Conference on

- Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE) // Brussels. Belgium. 2019. pp. 97-101, doi:10.1109/ICMAE.2019.8880986.
3. Strelets D.Y., Serebryanskii S.A., Shkurin M.V. Approach to the life cycle control of aeronautical engineering products using digital technologies // Management of Large-Scale System Development. Moscow. 2019. P 717-719 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41750004>.
  4. Smagin D.I., Savelev R.S., Satin A.A., Starostin K.I., Suzdaltseva D.S., Serebryansky S.A. The concept of creating a complex mathematical model of the aircraft, including the main onboard systems // Journal «Quality and life». Moscow. 4 (20).
  5. Коротков С.А. О цифровой трансформации процесса создания авиационной техники // Журнал «АвиаСоюз». Август 2019г. С. 12.
  6. Smagin D.I., Savelev R.S., Satin A.A., Starostin K.I., Kobrinec T.A. Применение программного комплекса Simintech для математического моделирования различных бортовых систем летательных аппаратов // Computational nanotechnology. 3-218. ISSN 2313-223X [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35367476>.
  7. Межгосударственный авиационный комитет авиационные правила часть 27. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов нормальной категории [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293795/4293795747.pdf>.
  8. Межгосударственный авиационный комитет авиационные правила часть 29. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории [Электронный ресурс]. URL: [https://armakiac.org/upload/iblock/e48/%D0%90%D0%9F\\_29\\_iss\\_3\\_2018.pdf](https://armakiac.org/upload/iblock/e48/%D0%90%D0%9F_29_iss_3_2018.pdf).
  9. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Small Rotorcraft CS-27 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/cs-27\\_amendment\\_7.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/cs-27_amendment_7.pdf).
  10. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Rotorcraft CS-29 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-29%20Amendment%208.pdf>.
  11. Межгосударственный авиационный комитет авиационные правила часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://armak-iac.org/upload/iblock/06a/ap25rev8.pdf>.
  12. Руководство по предотвращению авиационных происшествий ИКАО, 1984. 150 с.
  13. Шумилов И.С. Применение авиационных правил АП25 при создании гидравлических систем управления стационарными и мобильными объектами // Инженерный вестник. 2014. УДК: 629.039.58 [Электронный ресурс]. URL: <http://ainjournal.ru/doc/747685.html>.

УДК 629.7.036

**Особенности системного подхода к безопасности  
стендовых испытаний двигательных установок жидкостных ракет**

**В.А. Бершадский**, доктор технических наук, профессор кафедры  
«Техника и технологии»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

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

*Пояснена необходимость разработки и реализации специальных мероприятий при применении системного подхода к безопасности стендовых испытаний двигательных установок ракет. Определена основная концепция промышленной безопасности при стендовых испытаниях кислородно-водородных двигательных установок. Изложено и обосновано содержание специальных мероприятий по безопасности испытаний. Предложена функциональная модель безаварийного проведения испытаний и определены мероприятия для её эффективного применения.*

Безопасность испытаний, двигательная установка, системный подход, риск аварии, аварийная ситуация.

**Features of the system approach to safety stand tests of liquid rocket  
propulsion systems**

**V.A. Bershadskiy**, doctor of technical Sciences, Professor at 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

*It explains the need to develop and implement special measures for a systematic approach to the safety of stand tests of rocket propulsion systems. The basic concept of industrial safety during stand tests of oxygen-hydrogen propulsion systems is defined. The content of special measures for test safety is described and justified. A functional model of trouble-free testing is proposed and measures for effective application are defined.*

Safety tests, propulsion system, systematic approach, risk of accident, emergency situation.

**Предварительное пояснение**

Наземные испытания двигательных установок (ДУ) жидкостных ракет в период времени их экспериментальной отработки (ЭО) проводят на специально оборудованных стендах испытательного комплекса (ИК). Технологический процесс получения информации о надежности и безопасности созданной или усо-



вершенствованной конструкции ДУ осуществляют на натуральных компонентах топлива (КТ) при режимах, максимально приближенных к условиям функционирования ДУ на старте и в полете.

Опыт подготовки и проведения испытаний ДУ на ИК показывает, что при нештатных ситуациях (НШС), вызванных отказами в работе агрегатов и систем ДУ, нарушениями условий эксплуатации ДУ и ИК или внешними воздействиями, могут возникнуть аварийные ситуации (АС) с разгерметизацией топливных систем и выбросами КТ в окружающее пространство. В ряде случаев это приводит к возникновению аварии с реализацией значительных разрушений не только в промышленной зоне, но и в окружающей среде [ 4 ].

Системный подход к безопасному функционированию ДУ и ИК на современном уровне техники необходимо рассматривать как совокупность опасных факторов и мероприятий по уменьшению их влияния на объект испытаний, системы испытательного комплекса и окружающую среду. Цель системного подхода – выявление причин опасности и разработка мероприятий, снижающих уровень риска проведения испытаний.

Согласно требованиям официальных общепромышленных документов, например [1, 2, 3], устойчивое состояние безопасности может быть получено в результате использования рекомендаций, сформулированных в этих документах. При проведении анализа опасных факторов и выполнении рекомендаций, предусмотренных в соответствующих нормативных документах по эксплуатации пневмогидравлических, электрических и механических систем и по применению компонентов топлива, вероятность аварии из-за воздействия наиболее опасных факторов может быть уменьшена.

Однако, при стендовых испытаниях ДУ соблюдение указанных требований и рекомендаций на практике оказывается недостаточным. Это связано с тем, что они не учитывают особенностей конструктивного исполнения и режимов функционирования конкретных систем ДУ и ИК.

Поэтому для уменьшения опасности выполнения конкретных программ ЭО ДУ на практике в дополнение к существующим требованиям официальных документов общепромышленного назначения приходится разрабатывать и реализовать специальные организационно-технические мероприятия по безопасности испытаний ДУ. Создание таких мероприятий основано на тщательном анализе возможных НШС с учётом энергетического потенциала пожаро-взрывоопасности КТ и на решении задач на концептуальном, оперативном и детальном уровнях по уменьшению их опасности [5].

В настоящей статье изложены особенности решения этих задач на основе опыта испытаний кислородно-водородных ДУ, проводившихся в разные годы на ИК Научно-испытательного центра ракетно-космической промышленности (НИЦ РКП), который частично был рассмотрен автором в работах [5,6,7]. Основное внимание в статье обращено на ключевые мероприятия по безопасности испытаний, требующие дальнейших исследований и трудоёмких научно-технических разработок. Важность решения этих задач связана с применением жидкого водорода, который рассматривается в перспективных проектах в качестве энергоносителя для различных технических производственных и транспортных средств.

### Основная концепция уменьшения опасности испытаний

Согласно Федеральному закону [1] результаты оценки риска аварии являются ключевым моментом для декларирования промышленной безопасности. Допустимый риск потенциальной аварии можно считать мерой уменьшения или исключения вероятности аварии.

При испытаниях на ИК НИЦ РКП кислородно-водородных ДУ блоков верхних ступеней ракет допустимый риск аварии определяла специальная группа экспертов. При подготовке решения по этому вопросу учитывались следующие обстоятельства:

- проведение холодных и огневых испытаний ДУ (ХСИ и ОСИ ДУ) на кислороде и водороде может быть осуществлено на единственном, подготовленном для этого стенде ИК НИЦ РКП, который расположен на расстоянии  $R \approx 1$  км от жилого массива;

- программа стендовой ЭО в отличие от натуральных условий эксплуатации предусматривает неоднократное функционирование элементов конструкции ДУ для подтверждения её надёжной и безопасной работы;

- результаты анализа событий, например перечисленных в работе [6] и имевших место в 20 веке, которые привели к большим разрушениям и гибели людей в связи с высоким энергетическим потенциалом взрывоопасности смесей водорода с воздухом или кислородом.

В первом приближении для оценки допустимого риска аварии –  $P_{\text{доп}}$  рассматривалась зависимость вида (1)

$$P_{\text{доп}} < P = B \cdot Y, \quad (1)$$

где  $P$  – оценка вероятности потенциального риска аварии,  $B$  – вероятность аварийного исхода испытаний,  $Y$  – потенциальный ущерб при реализации аварии.

Проведение стендовых испытаний кислородно-водородных ДУ ракетных блоков являются редкими явлениями. Ограниченное количество информации в мировой практике об аварийных исходах такого вида испытаний не позволяют обосновать количественную оценку вероятности аварии или возможную частоту её возникновения при планируемой продолжительности выполнения программы испытаний. Поэтому группой экспертов в качестве решающего фактора для определения меры опасности была принята количественная оценка в виде потенциального ущерба при аварийном выбросе жидкого водорода.

При испытаниях ДУ аварийные выбросы КТ могут происходить в результате следующих случаев различного уровня опасности (с точки зрения массы выброса): разгерметизации стыков трубопроводов, разрушения трубопроводов систем топливоподдачи, разрушения наиболее напряжённых агрегатов, разрушения топливных баков ДУ [6].

Появление опасных взрывных волн в указанных ситуациях при горении газовых смесей ожидается при скорости движения фронта горения порядка 150-200 м/с. Заранее предсказать скорость взрывного превращения в газовом или гетерогенном облаке невозможно из-за необходимости учёта многих факторов, влияющих на образование, форму и состав взрывоопасной смеси. Поэтому приходится переопределять степень ожидаемой опасности и использовать максимальные оценки [9].

В качестве наиболее опасной ситуации при ХСИ и ОСИ ДУ было принято разрушение топливных баков. Расчётная модель развития аварийной ситуации предполагала мгновенное развитие происходящих процессов: механического разрушения топливных баков водорода и кислорода, испарения и смешения КТ, воспламенения и взрыва облака стехиометрической газовой смеси КТ [6].

В общем случае механические последствия столкновения взрывной волны с сооружением зависят от амплитуды и импульса действия давления на него. Согласно принятой гипотетической модели и расчётного определения допустимого аварийного выброса водорода была установлена величина допустимого избыточного давления  $\Delta p$  во фронте ударной волны (над атмосферным давлением) на расстоянии расположения жилого массива ( $R = 1$  км) от стенда ИК.

В качестве допустимого ущерба принималась расчётная величина избыточного давления  $\Delta p \leq 0,02$  кг/см<sup>2</sup>, приводящая к частичной потере остекления жилых зданий (до 15%).

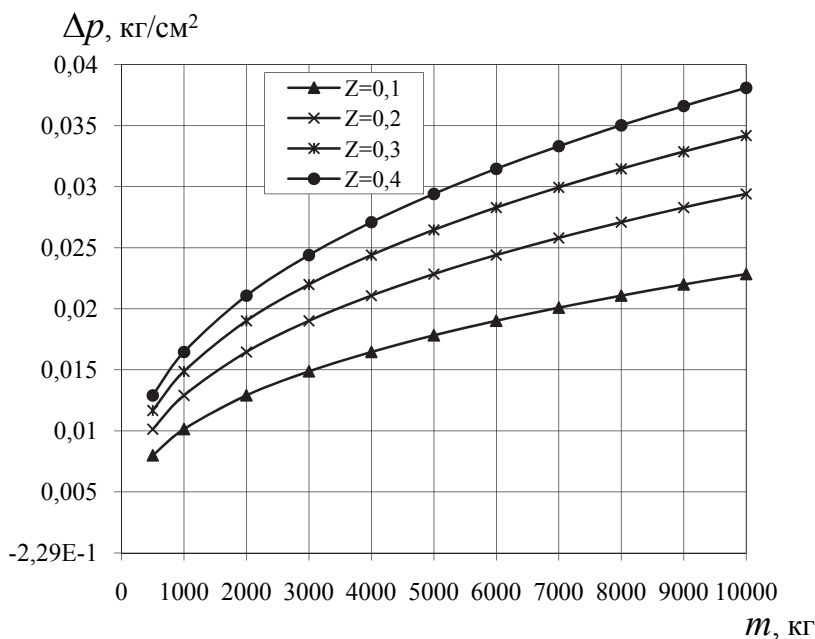
Для иллюстрации на рисунке 1 показаны результаты такого расчёта в виде зависимости  $\Delta p$  от массы выброса водорода –  $m$  и коэффициента участия её во взрыве –  $z$ . На основе аналогичных расчётов группой экспертов для допустимого значения  $\Delta p$  была ограничена допустимая масса горючего, заправляемая в топливный бак ДУ при проведении ХСИ и ОСИ ДУ. Она составляла величину  $M = 2,7 \pm 0,2$  тонны жидкого водорода [6].

Следует обратить внимание на то, что научно обоснованных рекомендаций по расчётному определению потенциального ущерба при взрыве парогазовых смесей с водородом, учитывающих конкретные физические явления и характер их реализации в условиях эксплуатации ДУ на стенде, на старте и в полёте, не существует.

Проведенные для определения риска аварии при стендовых испытаниях кислородно-водородных ДУ расчёты базировались на известных эмпирических зависимостях, полученных на основе анализа взрыва бомб во время войны [8] и экспериментов при атомных взрывах [10]. Эти зависимости сформированы на основе подобия распространения волн давления в неограниченном пространстве без учёта особенности действия импульса давления при газовом взрыве.

А коэффициент участия массы аварийного выброса водорода и доля энергии при сгорании этой массы, переходящей в энергию взрыва, выбирались на основе субъективной логики в виде конкретных постоянных значений коэффициентов. При этом расчётное значение тротилового эквивалента для смеси водорода с воздухом и кислородом составляло 10,4 и 11,7 кг ТНТ / кг водорода, соответственно [6].

Однако в работе [9] в результате проведенных исследований показано, что фугасные факторы газового взрыва, оказывающие разрушающее воздействие (давление во фронте ударной волны и её импульс), по-разному зависят от массы выброса, энергии взрыва и обстановки в окружающем пространстве, а тротильный эквивалент газового взрыва по давлению и импульсу не является постоянной величиной.



**Рисунок 1 – Результаты расчета избыточного давления во фронте ударной волны**

В связи с использованием гипотетической модели развития аварийных процессов и существованием указанных недостатков в части определения давления и импульса действия ударной волны решение задачи по формированию концептуального уровня безопасности при стендовых испытаниях кислородно-водородных ДУ нельзя считать завершённой.

### **Комплекс мероприятий для уменьшения опасности испытаний**

При разработке и реализации комплекса организационно-технических мероприятий для уменьшения опасности испытаний считалось, что абсолютной безопасности совместного функционирования таких сложных технических устройств, как стенд ИК и ДУ ракетного блока, не существует. Возможность проведения испытаний с рекомендованной массой жидкого водорода в баке допускалась при реализации специально разработанных организационно-технических мероприятий, учитывающих специфику физических свойств водорода и кислорода. К таким свойствам, отличающих водород и кислород от других КТ, относятся:

- малая энергия – 0,017 мДж, необходимая для воспламенения водорода;
- широкие диапазоны концентрационных пределов пожароопасности и взрывоопасности смесей водорода с воздухом и с кислородом;
- высокая скорость распространения пламени водорода  $\geq 3$  м/с и вероятность реализации взрывного режима (дефларгационного или детонационного) в диапазоне от 3 до 300 м/с;
- снижение температуры воспламенения конструкционных материалов с

выделением значительного количества тепла при разрушении деталей и появлении механических частиц в кислородной среде.

Поэтому в результате предварительного анализа устанавливались виды и последствия появления критичных элементов и технологических процессов, а также потенциальных отказов на всех этапах и режимах проведения испытаний. На основе такого анализа разработан комплекс мероприятий, который в первом приближении может быть представлен в виде схемы на рисунке 2. Комплекс разработанных мероприятий содержит независимые блоки, включающие основные направления оперативных действий и детальны разработок для уменьшения вероятности возникновения аварии объекта испытаний (ОИ).

Ключевыми моментами являются блоки А, Б, и В, содержащие основные направления разрабатываемых организационно-технических мероприятий в части: уменьшения вероятности возникновения АС, распознавания и парирования АС при испытаниях, уменьшения ущерба в результате испытаний [5].

**Комплекс мероприятий А** должен способствовать повышению устойчивости функционирования сложной технической системы в результате работ по подготовке к испытаниям, предварительного анализа НШС и реализации следующих технических решений, уменьшающих вероятность отказов:

- обеспечения высокого уровня надежности агрегатов и систем до начала испытаний ДУ с вероятностью её безотказной работы  $> 0,95$ ;
- ужесточения контроля состава и чистоты применяемых жидких и газообразных рабочих тел на соответствие предусмотренных требований;
- защиты систем ДУ и ИК от возможной потери герметичности с использованием пассивных и активных способов;
- применения технических решений по предотвращению образования и воспламенения смеси компонентов опасной концентрации;
- формирования программы холодных и огневых испытаний по их проведению с постепенным усложнением.

Необходимость этих мероприятий обусловлена невозможностью 100% диагностирования дефектов и отказов при функционировании ДУ, а также существующей инерционностью агрегатов автоматики при парировании НШС в процессе испытаний. Практическая реализация вышеперечисленных способов уменьшения опасности связана с большой трудоемкостью и стоимостью работ, проводимых на этапах создания и отработки агрегатов и систем, входящих в состав ДУ и ИК.

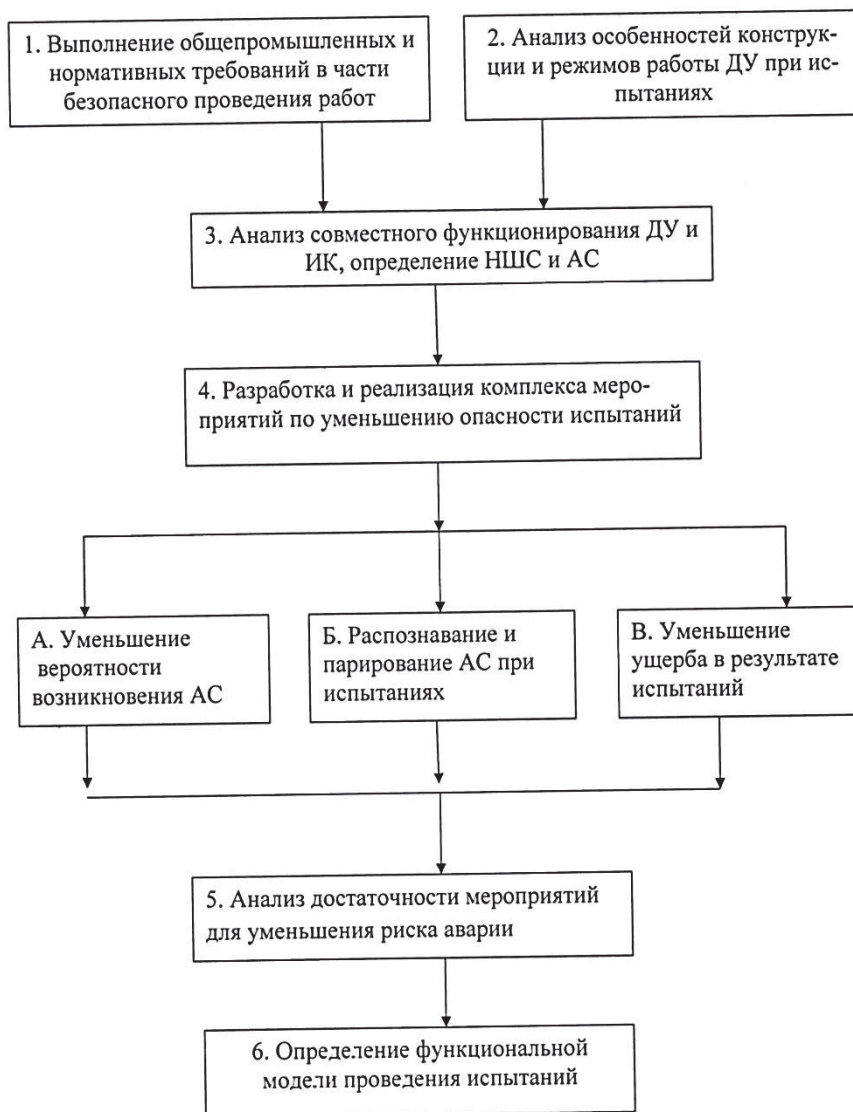


Рисунок 2 – Структурная схема системы безопасности испытаний

**Комплекс мероприятий Б** направлен на предотвращение возникновения и развития процессов, которые могут привести к аварии из-за недостаточного совершенства на современном уровне техники в части упреждающего диагностирования АС и управления процессами при ее развитии. Реализации этих мероприятий содержит:

- определение вида НШС, способов и технических средств их парирования;
- определение вида и допустимых границ изменений контролируемых параметров;
- применение быстродействующих алгоритмов диагностирования и пари-

рования АС;

- применение технических средств флегматизации смеси опасной концентрации и прекращения пожара;

- быстрая эвакуация компонентов из топливных баков при АС.

**Комплекс мероприятий В.** Недостаточное совершенство средств диагностики определения начала аварии и незавершенность исследований динамики аварийных процессов после разгерметизации системы топливоподачи не позволяют в настоящее время управлять этими явлениями. Из-за невозможности управлять явлениями, происходящих на разных стадиях развития аварии и выхода ее за пределы промышленной территории, комплекс мероприятий В направлен на минимизацию материальных потерь и исключение гибели людей. К этим мероприятиям относятся:

- оценка потенциального ущерба при аварии;

- регламентирование запасов пожаро-взрывоопасных и токсичных компонентов на территории ИК;

- применение технических средств, специально предусмотренных для уменьшения последствий аварии;

- регламентирование действий персонала на ИК и в промышленной зоне;

- регламентирование действий людей и технических средств в населенной местности.

В соответствии с изложенной системой уменьшения опасности испытаний автором настоящей статьи в работе [7] на основе опыта работ в НИЦ РКП предложена функциональная модель проведения наземных испытаний ДУ ракетного блока, установленного на стенд ИК.

Согласно этой модели, приведенной на рисунке 3, нарушение нормального совместного функционирования сложных технических устройств – стенда ИК и ДУ ракеты происходит из-за логических (ЛНШС) и физических (ФНШС) нештатных ситуаций, что может привести к аварийной ситуации (АС).

ЛНШС – это невыполнение требований проектно-технической и нормативной документации и дополнительных организационно-технических мероприятий, предусмотренных для подготовки и проведения испытаний конкретной ДУ.

ФНШС – это отклонения при испытаниях от допустимых значений основных контролируемых параметров термодинамических, механических и электрических процессов в системах ДУ и ИК.

АС – это определяемая с помощью средств диагностики угроза разгерметизации или разрушения конструкции с аварийным выбросом КТ. Невозможность парирования АС с помощью автоматической системы аварийной защиты от разрушения элементов ДУ или в результате оперативных действий инженера, ведущего испытания, приводит к необходимости прекращения испытаний для исключения аварии.

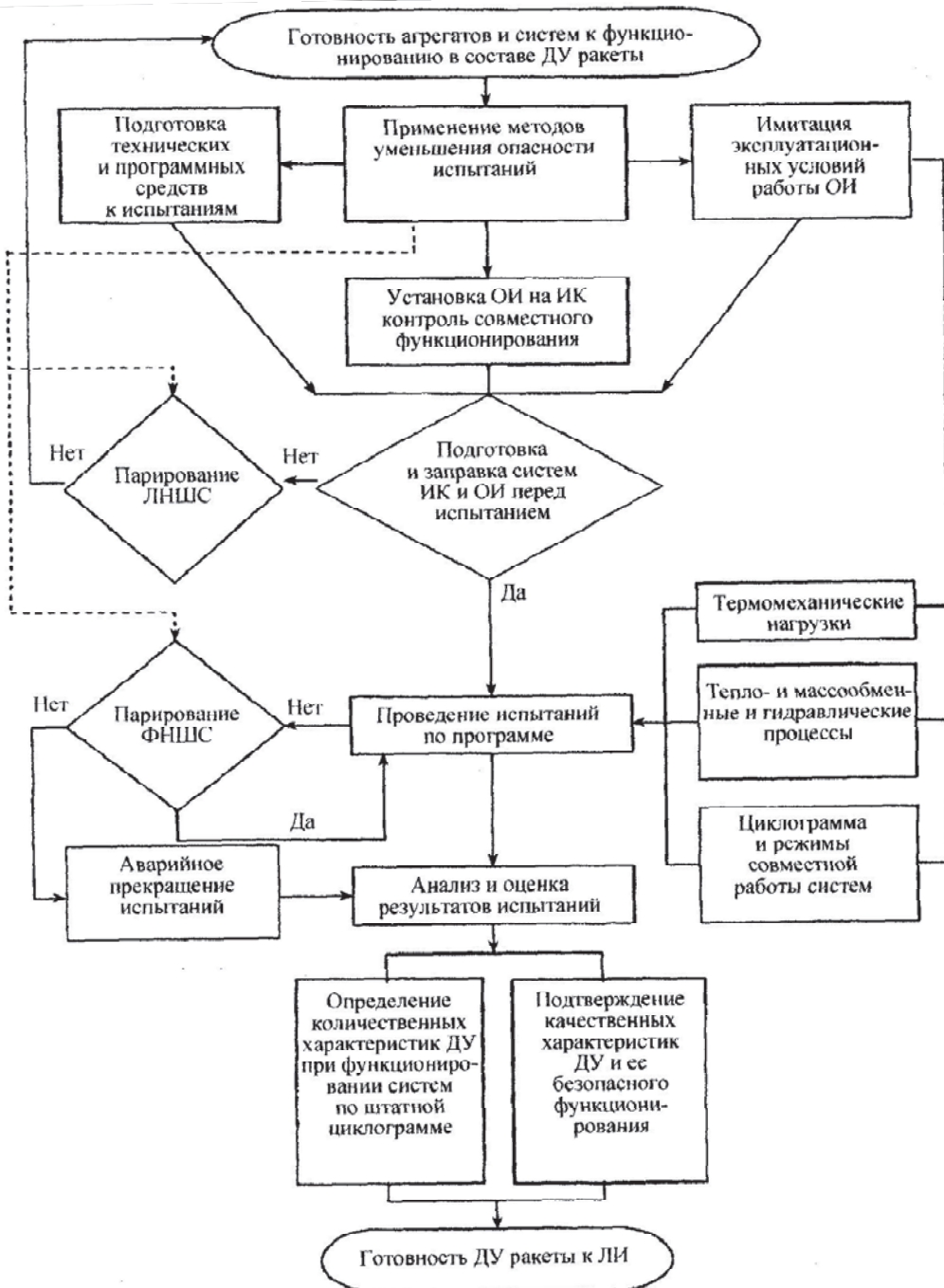


Рисунок 3 – Функциональная модель безопасного проведения стендовых испытаний

Функциональная модель уменьшения вероятности аварийного исхода стендовых испытаний, приведенная на рисунке 3, рекомендована в работе [7] для



практического применения при стендовых испытаниях при отработке перспективных кислородно-водородных ДУ разгонного ракетного блока или космического буксира.

При этом обращено внимание на ряд наиболее важных мероприятий, для успешного проведения испытаний, которые требуют продолжения научно-технических разработок. В числе этих мероприятий в первую очередь необходимо создание аттестованных систем:

- определения концентрации опасных накоплений водорода и кислорода в воздушной и инертной среде, обладающих малой инерционностью <1-2 секунд и способностью формировать достоверный сигнал о превышении допустимого уровня концентрации смеси;

- функциональной диагностики и быстродействующей автоматической аварийной защиты от разрушения в течение времени <1 секунды наиболее напряжённых (или критичных) агрегатов ДУ с коэффициентом охвата АС  $\geq 0,9$ .

### **Заключение**

В результате рассмотрения особенностей системного подхода к безопасности стендовых холодных и огневых испытаний кислородно-водородной двигательной установки ракетного блока:

- определена основная концепция уменьшения опасности испытаний при совместном функционировании систем объекта испытаний и испытательного комплекса;

- сформулированы основные положения для разработки специальных организационно-технических мероприятий по безопасности проведения испытаний;

- обозначены существующие проблемы решения задач безопасности испытаний на концептуальном и оперативном уровне, опережающее решение которых позволит эффективно использовать приобретённый опыт для успешного проведения испытаний перспективных изделий.

### *Литература*

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 // Собрание законодательства РФ. 2013. № 30, ст. 3588.61 с.
2. ГОСТ 27.310-95 Надёжность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Введён 01.01.1997 // Надёжность в технике: сборник ГОСТов // М: ИПК Издательство стандартов. 2002. 22 с.
3. СП 162.13330610.2014 Свод правил. Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода: приложение к приказу руководителя Федерального космического агентства № 299 от 24.11.2011. 178 с.
4. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: справочное издание / под общей редакцией В.В. Адушкина, С.И. Козлова, А.В. Петрова // М: Анкил. 2000. 311 с.

5. Бершадский В.А. Методика уменьшения опасности при функционировании на водороде сложных технических устройств // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал. 2009. № 3 (71). С. 75-83.
6. Бершадский В.А., Гусев Ю.Г., Петров В.И. Анализ методологии определения риска аварии при стендовых испытаниях кислородно-водородных двигательных установок с целью его уменьшения // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 4 (77). С.151-158.
7. Бершадский В.А., Алексеев В.А., Прохоров Н.С. Определение условий безопасного проведения стендовых испытаний кислородно-водородных разгонных блоков // Научно-технические разработки КБ «Салют»: сборник 2012-2013 г / под общей редакцией Ю.О. Бахвалова // М: Машиностроение. 2014. Вып. 4. С. 246-253.
8. Бесчастнов М.В. Оценка и обеспечение взрывобезопасности промышленных объектов // Безопасность труда в промышленности. 1988. № 1. С. 52-57.
9. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва // М: Физматлит. 2008. 288 с.
10. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва: сборник работ // М: АН СССР. 1952. № 1. С. 20-111.

УДК 004.891.3

**Применение нейросетевых экспертных систем для контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния авиационных двигателей**

**Д.О. Пушкарёв**, инженер-конструктор, АО «Агрегат»,  
г. Самара, Самарская область

*Рассматривается применение нейросетевых экспертных систем в области контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния авиационных ГТД на основе нечеткой логики. Показана методика для решения таких задач в области технической эксплуатации авиационной техники совместно с использованием фаззи-интерференсной системы программы MATLAB. Используя статистические данные о работе двигателя формируется экспертная система на основе нейронной сети позволяющая осуществлять контроль и диагностику ГТД, а также прогнозировать дальнейшее техническое состояния анализируемого двигателя.*

Нейронная сеть; ГТД; диагностика; техническое состояние; экспертная система; нечеткая логика.

**Application of neural network expert systems for monitoring, diagnostics and forecasting of technical condition of aircraft engines**

**D.O. Pushkarev**, design engineer, in Joint Stock Company «Агрегат»,  
Samara, Samara region

*The application of neural network expert systems in the field of monitoring, diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation gas turbine engines based on fuzzy logic is considered. The technique for solving such problems in the field of technical operation of aircraft and using the fuzzy-interference system of the MATLAB program is shown. Using statistical data on the operation of the engine, an expert system is based on the fundamental of a neural network that provide monitoring and diagnostics of gas turbine engines, as well as predicting the further technical condition of the analyzed engine.*

Neural network; Gas turbine engine; diagnostics; technical condition; expert system; fuzzy logic.

**Введение**

Авиационный двигатель является сложным динамическим объектом требующим в течении всего срока службы постоянного контроля технического состояния, качество и трудоемкость которого зависит от уровня используемых технологий и совершенства методов мониторинга состояния двигателя [4, 8].

Нейро-нечеткие экспертные системы представляют собой новый виток в области технической эксплуатации авиационной техники. Они совершенствуют и дополняют существующие методы контроля, диагностики и прогнозирования

технического состояния. Эта технология и используются в данной работе для совершенствования существующей системы по проведению технической эксплуатации авиационного газотурбинного двигателя.

### Применение нейро-нечетких экспертных систем для решения задач контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния авиационных двигателей

Для практического использования экспертных систем на основе нечеткой логики для технической диагностики и контроля авиационных ГТД, необходимо применять совместно с количественными моделями, т.е. моделями учитывающими все физические процессы происходящие в двигателе, качественные модели которые основываются на индивидуальных характеристиках авиационных двигателей. Таким образом, объединение этих двух моделей позволит повысить точность НС, а также ее достоверность. В итоге, развивая дальше такие системы, и накапливая практический опыт по эксплуатации авиационных двигателей, можно разработать универсальную систему по контролю, диагностике, и прогнозированию технического состояния любого ГТД, создав тем самым новую систему технического обслуживания и ремонта наподобие применяемых сейчас ТОСКП, ТОСКН или ТОНАР, но в отличие от имеющихся систем, нейро-нечеткая экспертная система будет более точная и достоверная, тем самым повышая качество принятых решений при практической эксплуатации [7, 9, 11, 13]. Данный метод применялся при разработке проектной нейросетевой экспертной системы.

Экспертная база знаний учитывает количественную составляющую процесса контроля и диагностики состояния авиационного двигателя, а нейросетевая база знаний – его качественную (неформальную) часть.

Экспертные системы на основе нейросетевых алгоритмов обладают рядом особенностей, а именно: открытость (позволяет проследить весь процесс формирования решения в НС экспертной системе); модульное строение (позволяет добавлять или убирать элементы системы, позволяя тем самым применять нейросетевую экспертную систему для любого авиационного двигателя).



Рисунок 1 – Структура нейро-нечеткой экспертной системы

Данные обучающей выборки берутся из протоколов испытаний, формуляров, руководств по эксплуатации, затем вся информация заносится в нейро-нечеткую экспертную систему и обрабатывается, после система, в зависимости

от вида анализируемой задачи по осуществлению контроля, диагностики или прогнозирования технического состояния двигателя, выбирает и использует определенный модуль нейросетевой экспертной системы.

Общая методология работы с нейросетевой экспертной системой для авиационного двигателя [10] заключается в выполнении следующей последовательности этапов:

- формирования базовой математической модели для выбранного двигателя;
- разработке базовой концепции для базы знаний (понятий, уравнений, матриц, таблиц, связей, графов);
- построение экспертной базы знаний для описания функционирования двигателя (семантические фреймы, продукционные правила, семантические сети);
- создание функций нечеткой правил с помощью которых будут выбираться те или иные условия для работы нейронной сети (функций активации нейронов);
- описание базы знаний событий (различные виды работы двигателя, нетипичные условия работы, причинно-следственные связи, таблиц неисправностей и т.д.);
- формирование нейросетевой базы знаний;
- настройка нейросетевой экспертной системы на базы знаний и создания нейронной сети;
- подбор оптимальной структуры НС, а также подбор оптимального алгоритма обучения (структура и алгоритмы обучения подбираются опытным путем, т.к. не существует универсальной методики выбора);
- выполнение тестирования НС и принятие решения о готовности нейросетевой экспертной системы к работе;
- создание типовых запросов к нейросетевой экспертной системе для создания оптимального взаимодействия при выполнении прогнозирования технического состояния авиационного двигателя, а также осуществления его оперативной диагностики и решения задачи по контролю за авиационным ГТД;
- оценка качества решений, формируемых нейросетевой экспертной системой.

### **Постановка задачи**

Нейронную сеть будем создавать в программе MATLAB с помощью расширения Neuro-Fuzzy Designer. Данная нейронная сеть позволит проводить контроль, диагностику и прогнозирования технического состояния двигателя ТВ2-117. Neuro-Fuzzy Designer основана на адаптивных нейро-нечетких сетях и приспособлены для описания сложных динамических объектов [5, 12].

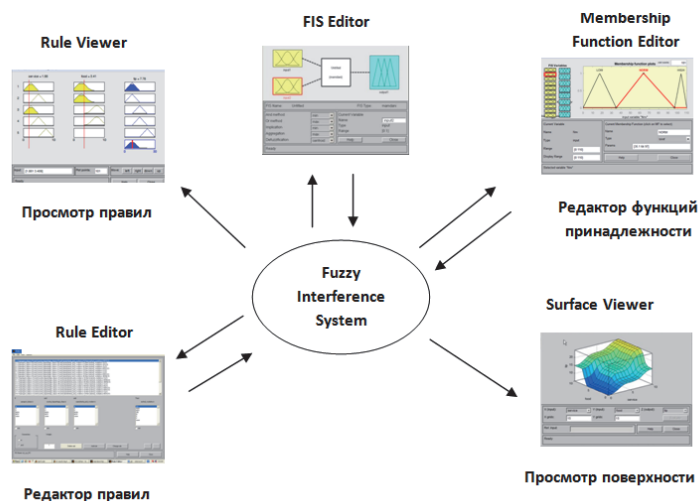


Рисунок 2 – Структура фаззи-инференционной системы (FIS)

Построим нейронную сеть реализующую отображение:

$$y^r = F(X^r) = F(x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r), (r = 1, 2, \dots, R),$$

При наличии обучающей выборки  $\{(X^1, d^1), \dots, (X^r, d^r)\}$ . Нам известная система правил, по которым функционирует двигатель и относительно которых выполняется диагностика, контроль технического состояния двигателя ТВ2-117. Поэтому представляем их в переменных  $x$  и  $y$ :

- Если  $x_1 = L_1$  И  $x_2 = L_2$  И ...  $x_n = L_n$ , ТО  $y = y_1$ ;
- Если  $x_1 = L_1$  И  $x_2 = H_2$  И ...  $x_n = H_n$ , ТО  $y = y_2$ ;
- .....;
- Если  $x_1 = H_1$  И  $x_2 = H_2$  И ...  $x_n = H_n$ , ТО  $y = y_n$ ;

Где  $L, H$  – нечеткие множества для входных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  заданные с помощью соответствующих функций принадлежности;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – вещественные числа, вычисляемые в соответствии с механизмом нечеткого вывода.

$$y = c_{i1}x_1 + c_{i2}x_2 + \dots + c_{ij}x_n,$$

где  $c_{ij}, (i, j = 1, 2, \dots, n)$  – некоторые константы.

Тогда выход нейронной сети формируется по формуле:

$$y = \frac{\beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n},$$

где  $\beta_n, (n = 1, 2, \dots, n)$  – уровни активности приведенных выше правил данных значений параметров на входе  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Общий вид структуры нейронной сети приведен на рисунке 3. Каждый слой данной НС выполняет определенные задачи [6, 1, 2, 3].

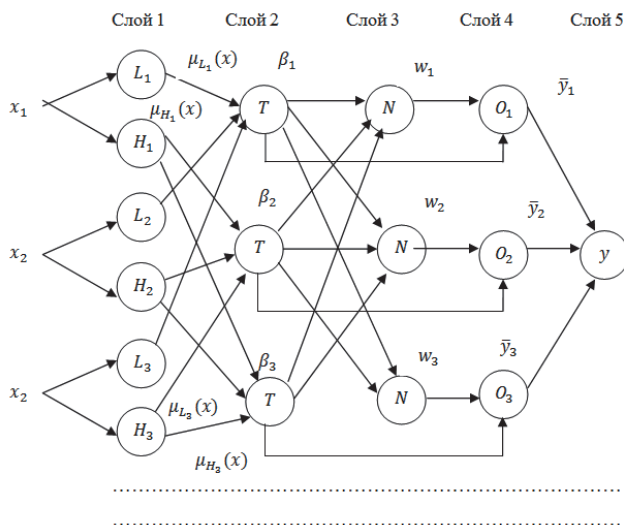


Рисунок 3 – Структура сети

Слой 1 – используя значения параметров на входе, осуществляет вычисление функций принадлежности. В качестве функций активации нейронов этого слоя могут приниматься гауссовские, пи-подобные, сигмовидные, произведение двух сигмовидных функций, трапецевидные, s-подобные, z-подобные, треугольные функции.

Слой 2 – определяет степень активности, т.е. на сколько истинна левая часть используемого правила, это осуществляется заменой логической связкой «И» на произведение:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \mu_{L_1}(x)\mu_{L_2}(x) \dots \mu_{L_n}(x); \\ \beta_2 &= \mu_{H_1}(x)\mu_{H_2}(x) \dots \mu_{H_n}(x); \\ \beta_n &= \mu_{N_1}(x)\mu_{N_2}(x) \dots \mu_{N_n}(x); \end{aligned}$$

В этом слое нейроны обозначенные буквой «Т» могут использовать для моделирования операции «И» произвольную Т-норму, например,  $T = \min$ .

Слой 3 – в этом слое нейронные (обозначенные как «N») выполняют для каждого правила нормирование значений уровней активности:

$$w = \frac{\beta_i}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n}, (i = 1, 2, \dots, n).$$

Слой 4 – формирует значения взвешенных компонент выхода ( $O_i$ ):

$$\bar{y}_i = w_i y_1 = w_i (c_{i1}x_1 + c_{i2}x_2 + \dots + c_{ij}x_n), (i = 1, 2, \dots, n).$$

Целью обучения нейронной сети является максимальное уменьшение ошибки обучения, т.е. необходимо подобрать такие параметры функции принадлежности, при которых значение ошибки будет равно нули или значение ошибки зафиксируется на каком-то значении (допускаемом при решении задачи) и перестанет изменяться при увеличении числа эпох обучения:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^R (y^r - d^r)^2,$$

где  $y^r$  – ответное воздействие нейронной сети на вектор входных пара-

метров

$$X^r = (x_1^r, x_2^r, \dots, x_n^r)^2;$$

$d^r$  – значение параметра, которое мы хотим получить на выходе из нейронной сети;  $R$  – размер выборки с помощью которой происходит обучение нейронной сети. В качестве настраиваемых параметров здесь могут выступать коэффициенты сигмоидных функций активации  $a_i > 0$ ;  $b_i > 0$ , описываемые выражениями:

$$\mu_{L_1}(x) = \frac{1}{1 + \exp(a_i(x - b_i))};$$

$$\mu_{H_1}(x) = \frac{1}{1 + \exp(a_i(x - b_i))};$$

где  $L_i(x) + H_i(x) = 1$  для всех  $i = 1, 2, \dots, n$  (рисунок 4).

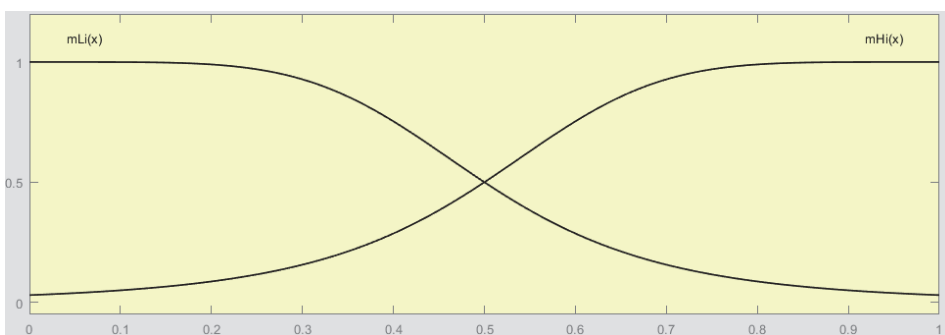


Рисунок 4 – Функции принадлежности нечетких множеств

Обучение сети осуществляется до тех пор пока ошибка обучения не станет равна нулю или не перестанет уменьшаться, также можно задать ограничение на время обучения.

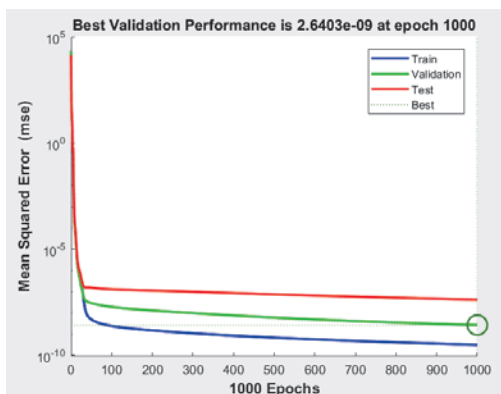


Рисунок 5 – Пример обучения сети

Определившись со структурой, переходим к созданию рабочей нейронечеткой экспертной системы.



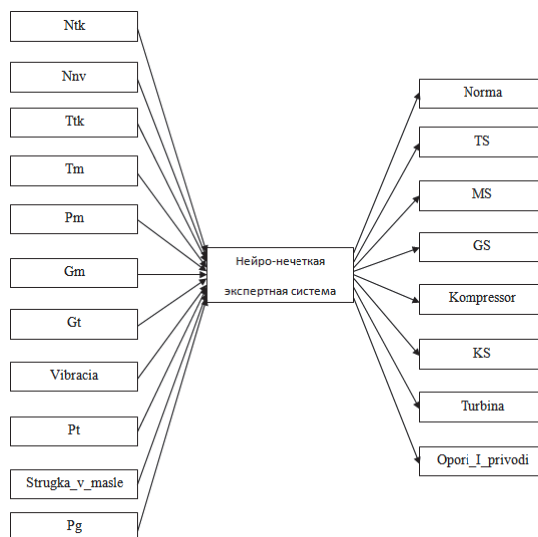


Рисунок 6 – Структура созданной нейро-нечеткой экспертной системы

Выберем выходные параметры, по которым хотим осуществлять контроль и диагностирование двигателя, у нас это будут обороты турбокомпрессора (Ntk), обороты несущего винта (Nnv), температура газа перед турбиной компрессора (Ttk), температура масла (Tm), давление масла (Pm), расход масла (Gm), расход топлива (Gt), вибрация (Vibracia), давление топлива (Pt), стружка в масле (Strugka\_v\_masle), давление в гидросистеме (Pg). После выберем выходные параметры, по которым будем делать заключение о техническом состоянии двигателя. Будем использовать классификацию по системам двигателя, поэтому в качестве выходных переменных примем: нормальную эксплуатацию (Norma), неисправность топливной системы (TS), неисправность масляной системы (MS), неисправность гидросистемы (GS), неисправности в компрессоре (Компрессор), неисправности в камере сгорания (KS), неисправности в турбине (Turbina), неисправности в опорах и приводах (Опор\_1\_приводи).

В результате экспертная система будет выводить значения технического состояния двигателя ТВ2-117, основываясь на введенных данных (рис. 7).

Задавая числовые значения параметров или передвигая ползунки, на рисунке 7, можно выставлять параметры двигателя, тем самым осуществляя контроль технического состояния двигателя.

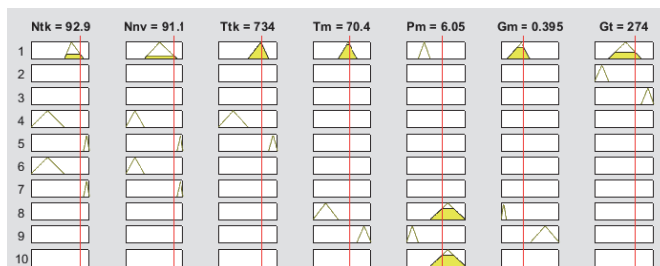
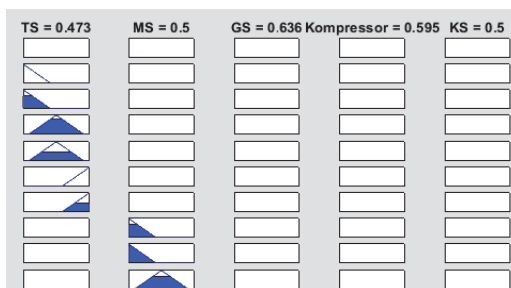


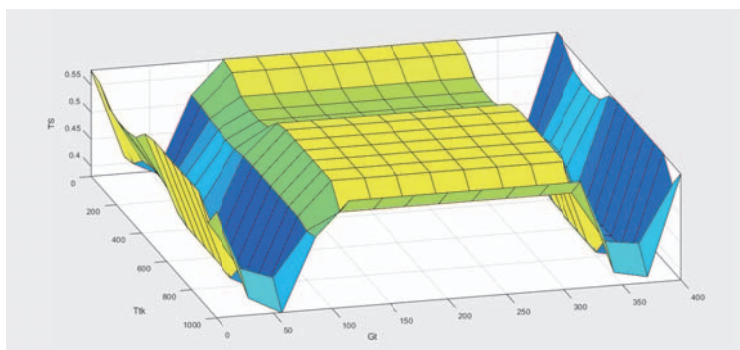
Рисунок 7 – Окно ввода параметров системы (фрагмент)

Для осуществления контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния двигателя используется окно результатов (рис. 8). В нем отражается отклик на заданные параметры из окна ввода параметров (рис. 7). Изменяя значения входных параметров, мы сможем сразу же видеть результаты, причем в реальном времени. Таким образом, с помощью данной нейронной сети можно не только проводить контроль и диагностику технического состояния двигателя, но и осуществлять его диагностику.



**Рисунок 8 – Окно вывода результатов о техническом состоянии двигателя (фрагмент)**

По завершению ввода параметров, полученные результаты можно спроецировать на трехмерный график (рис. 9) на котором отобразятся зависимости параметров от технического состояния двигателя ТВ2-117, параметры можно настраивать по трем осям, выбирая необходимые для конкретного исследования.



**Рисунок 9 – Окно просмотра поверхности**

### Заключение

Созданная модель экспертной системы на основе нейро-нечеткой адаптивной нейронной сети для двигателя ТВ2-117 позволяет решать задачи контроля и диагностики технического состояния с помощью фаззи-инференционного метода и правил нечеткой логики. Разработана инженерная методика для реализации данных методов для создания гибридных баз знаний в экспертной системе контроля и диагностики. Применение аппарата НС для решения плохо формализуемых задач является эффективным, особенно для задач для авиационных ГТД в целях обеспечения диагностики, контроля и прогнозирования технического состояния. Данная нейро-нечеткая экспертная система дает возможность по

обеспечению контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния авиационного ГТД с точностью до узла, а также является предпосылкой к созданию новой системы технического обслуживания основанной на нечеткой логике.

*Литература*

1. Hopfield J.J. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities // In Proc National Academy of Sciences. 1982. Vol. 79. № 8. P. 2554-2558.
2. Kohonen T. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps // Biological. Cybernetics. 1982. Vol. 43. № 1. P. 59-69.
3. Zadeh L.A. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing // Communications of the ACM. 1994. Vol. 37. № 3. P. 77-84.
4. Августинovich В.Г. [и др.]. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / под ред. Дедеша В.Т. // М.: Машиностроение. 1984. 200 с.
5. Васильев А.Н. Matlab. Самоучитель. Практический подход. Изд. 2-е // СПб.: Наука и Техника. 2015. 368 с.
6. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. Пособие // М.: Радиотехника. 2009. 393 с.
7. Васильев В.И., Валеев С.С. и др. Применение нейросетевых моделей реального времени в системах управления ГТД. Труды 2-й Всероссийской научно-технической конференции. Нейроинформатика-2000. Ч. 1 // М.: МИФИ. 2000. С. 236-242.
8. Васильев С.Н., Мунасыпов Р.А., Распопов Е.В. [и др.]. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей // М.: Машиностроение. 2008. 550 с.
9. Васильев С.Н. Интеллектуальное управление динамическими системами // М.: Физико-математическая литература. 2000. 352 с.
10. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. Кн. 1: Учеб. пособие для вузов / под общ. ред. А.И. Галушкина // М.: ИПРЖР. 2000. 416 с.
11. Жернаков С.В. Комбинированные модели нейросетей для диагностики и прогнозирования ГТД. Всероссийская научно-техническая конференция. Нейроинформатика-99 // М.: МИФИ. 1999. С. 115-122.
12. Медведев В.С., Потёмкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под ред. В.Г.Потёмкина // М.: Диалог-МИФИ. 2002. 496 с.
13. Надежность и техническая диагностика. Контроль и диагностирование авиационных силовых установок: учебное пособие / Горский А.И., Коршенко В.Н., Евдокимов А.И. [и др.] // М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2007. 116 с.

УДК 629.735.33

## Формирование требований к летательным аппаратам

**Н.Г. Серёгин**, кандидат технических наук, доцент,  
заместитель директора завода «Импульс»,  
Акционерное Общество «Научно-Производственное Объединение  
Измерительной Техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев, Московская область,  
**П.Ю. Пудовченко**, студентка 4 курса,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Рассмотрены вопросы формирования требований и природы возникновения этих требований к летательным аппаратам. Также раскрыта важность сертификации на каждом этапе формирования требований и проанализированы различные источники технической литературы по летной авиации. На основе современных тенденций была выявлена схема, позволяющая сократить издержки на этапе эксплуатации, и выбран оптимальный путь развития дальнейших рекомендаций в области самолетостроения.*

Авиастроение, сертификация, техника, технологии, летательные аппараты.

## Formation of requirements for flying machines

**N.G. Seregin**, candidate of technical Sciences, associate Professor, deputy director of the plant «Impulse» of the joint-Stock company «Scientific and Production Association of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region,  
**P.Y. Pudovchenko**, student,  
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 issues of forming requirements and the nature of these requirements for passenger ships are considered. The importance of certification at each stage of requirements formation is also revealed and various sources of technical literature on flight aviation are analyzed. Based on current trends, a scheme was identified that allows reducing costs at the operational stage, and the optimal way to develop further recommendations in the field of aircraft construction was chosen.*

Aircraft industry, certification, equipment, technologies, aircraft.

## Премет исследования

При разработке любого летательного аппарата в независимости от его функционального назначения возникает потребность в таких характеристиках летательных аппаратов, которые могут обеспечить соответствие изделия всем

условиям технического задания заказчика. Это ставит перед ними задачу формирования и анализа списка требований к авиационной и ракетно-космической технике.

Грамотный, взвешенный подход при составлении списка требований позволит подобрать оптимальный подход к формированию требований для конкретного летательного аппарата и создать наиболее конкурентоспособный авиационный комплекс. При этом немаловажную роль играют задачи экономии, конкурентоспособности, национальной безопасности и импортозамещения [1].

### **Требования к изделиям и задачи исследования**

Требования, предъявляемые ко всем летательным аппаратам условно можно разделить на два крупных блока: общие технические требования и технические требования к конкретному типу летательного аппарата.

Общие требования можно разделить на следующие: технические, специальные, производственные (технологические) и эксплуатационные.

Основными техническими требованиями, характеризуют выполнение технического задания в части реализации потребностей летательного аппарата в обеспечении его летно-технических и эксплуатационных характеристик [2]:

- 1) обеспечение взлетной тяги согласно тактико-техническим характеристикам летательного аппарата на протяжении всего ресурса;
- 2) обеспечение надежной работы силовой установки и стабильности полетных режимов;
- 3) обеспечение минимального расхода топлива;
- 4) хорошая приемистость;
- 5) обеспечение заданных рабочих режимов на всем типовом профили полета;
- 6) обеспечение безопасности эксплуатации;
- 7) обеспечение минимально допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;
- 8) минимальные стоимость, масса и габариты при заданной тяге.

К производственным (технологическим) требованиям относятся:

1) простота и технологичность изготовления и сборки летательного аппарата;

- 2) минимальные требования к производственному и испытательному оборудованию, а также к персоналу;
- 3) высокая степень стандартизации и унификации элементов;
- 4) использование недефицитных и дешевых материалов;
- 5) низкая стоимость изготовления летательного аппарата в целом.

К эксплуатационным требованиям относятся:

- 1) удобство замены сменных эксплуатационных элементов;
- 2) удобство монтажа и демонтажа оборудования летательных аппаратов;
- 3) простота, удобство выполнения регламентных операций;
- 4) низкая стоимость ремонта и доступность запасных частей.

Воздушный кодекс Российской Федерации (РФ) устанавливает правовые основы использования воздушного пространства и деятельности в области авиации.

Действие ст. 37 Воздушного кодекса РФ распространяется на гражданскую авиацию. Нормы п. 1 и 2 ст. 37 Воздушного кодекса РФ регламентируют требования к сертификации образцов авиационной техники нового типа, включая воздушные суда, авиационные двигатели и воздушные винты. Эти требования необходимы для реализации норм, регламентирующих допуск воздушных судов гражданской авиации к эксплуатации.

Требования и процедуры сертификации летательных аппаратов определяются Федеральными авиационными правилами. Образцы авиатехники новой конструкции должны соответствовать нормам летной годности, действующим на дату принятия заявки, любым дополнительным требованиям, которые орган по сертификации сочтет необходимым установить для обеспечения безопасности.

После установления соответствия летательного аппарата нормам лётной годности организации, ответственной за конструкцию, выдается сертификат соответствия, где четко указываются те нормы летной годности, соответствие которым было обеспечено и которые стали нормативной базой для выдачи сертификата. Как правило, эти нормы продолжают применяться в отношении конкретных экземпляров воздушных судов или компонентов, изготовленных в соответствии с данной конструкторской документацией.

Таким образом, согласно Воздушному кодексу РФ все летательные аппараты, их двигатели, комплектующие изделия в обязательном порядке должны быть сертифицированы [3, 4].

На территории России вопросы сертификации авиационной техники переданы в ведение Межгосударственного авиационного комитета (МАК). Это постоянно действующий орган. Для осуществления деятельности им создан специальный орган – Авиационный регистр (Авиарегистр). Сертификаты выдаются Авиарегистром.

В настоящее время общепризнано, что сертификация – одна из наиболее эффективных форм обеспечения качества продукции или услуг, а также их конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках.

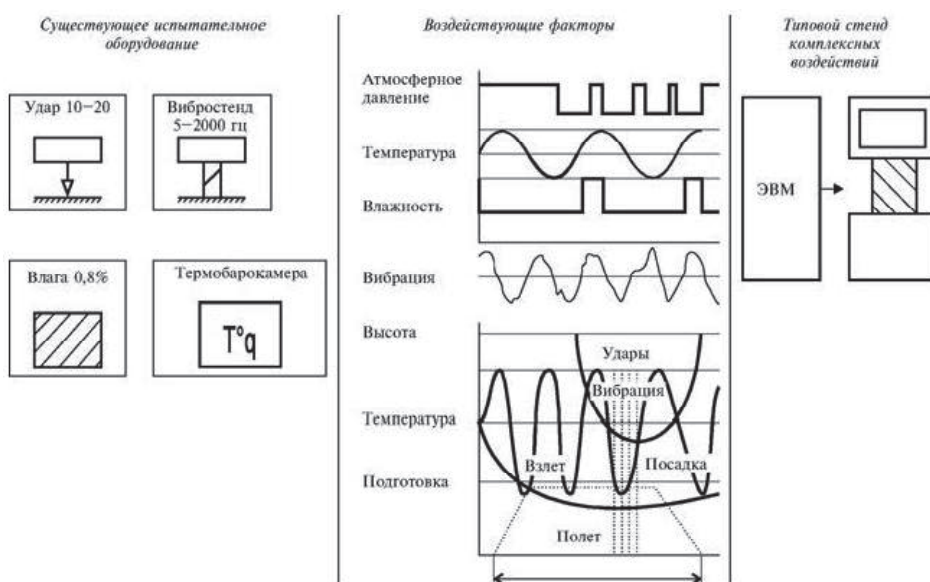
Многофункциональность сферы сертификации требует формирования соответствующей инфраструктуры – органов по сертификации и аккредитованных испытательных лабораторий.

Чрезвычайно важную роль в отечественной практике сертификации играют методы летных испытаний, основанные на объективном получении широкого спектра информации и летной оценке экипажа. Летные испытания широко применяются в нашей практике при создании и сертификации самолета и включают исследования на стендах, летающих лабораториях и сертифицируемом самолете [5]. Одной из важных задач при этом является разработка нормативов типовых испытаний агрегатов и систем. Внедрение перспективных технических требований потребовало новых материалов и покрытий, существенного пересмотра порядка и методов испытаний, опытных образцов авиационной техники, их отработки перед установкой на самолеты, расширения и развития испытательной базы для проведения полноценной отработки изделий, совершенствования информационного обеспечения новых разработок, специализации производства [6]. Подтверждение показателей технического

уровня бортового оборудования осуществляется на этапе испытаний в процессе проведения опытно-конструкторских работ (ОКР). Для практического воплощения этого принципа головными НИИ совместно с ОКБ были разработаны и утверждены нормы типовых испытаний агрегатов и систем бортового оборудования на надежность.

### Методы и средства

В настоящее время в ряде случаев показатели надежности бортового оборудования на этапе ОКР подтверждаются расчетными значениями. Нормы испытаний требуют подтверждения значений показателей надежности бортового оборудования на этапе ОКР, что позволит сократить сроки летных испытаний самолетов до 2-3 лет вместо 6–7 лет при существующей практике. Все это может быть обеспечено за счет проведения стендовых испытаний (рис. 1).



**Рисунок 1 – Схема стендовых эквивалентно-циклических испытаний оборудования самолетов и вертолетов с комплексным воспроизведением нагрузок, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации**

Для подтверждения соответствия характеристик изделий перспективным техническим требованиям введена отраслевая аттестация (сертификация) агрегатов и систем бортового оборудования.

Разработан комплекс нормативных документов, устанавливающий порядок проведения работ в отрасли по повышению технического уровня изделий авиационной техники и порядок отраслевой аттестации бортового оборудования летательных аппаратов и двигателей.

Эти документы определяют организацию и порядок работ в отрасли, функции участников работ и их взаимодействие, в них предусматривается постоянный контроль головного тематического института за разработкой, испытаниями и эксплуатацией бортового оборудования и выдача аттестата

годности бортового оборудования к применению на летательных аппаратах.

Ключевым моментом, обеспечивающим гарантию проектирования, является системный подход к проектированию бортовой аппаратуры воздушных судов. Под гарантией проектирования понимается процесс, состоящий из специально запланированных систематических мероприятий, обеспечивающих в совокупности уверенность в том, что ошибки или упущения в требованиях или проекте выявлены и устранены таким образом, что реализованная система будет удовлетворять сертификационным требованиям.

Формирование требований, в том числе, возникает и по причине обязательной сертификации летательных аппаратов. Ниже представлена схема общей сертификации летательных аппаратов (рис. 2).



**Рисунок 2 – Общая программа сертификации летательных аппаратов (ТТТ – тактико-технические требования, МОС – методы определения соответствия, НЛГС – нормы летной годности самолетов)**

В качестве еще одного этапа формирования требований к летательным аппаратам является математическое моделирование их надежности

Математическое моделирование применяют тогда, когда известно достаточно достоверное математическое описание моделируемого процесса. Значительный интерес представляет задача обоснования исследования летательного аппарата в виде системы на различных этапах ее разработки и возможности перехода на следующий в технологической цепочке этап.

На каждом этапе разработки системы происходит обнаружение и устранение дефектов, т.е. корректировка и доработка системы. При этом наблюдается улучшение характеристик системы. Определив отказ как любое несоответствие параметров и характеристик системы предъявляемым требованиям, и учитывая вероятностный характер процесса обнаружения



дефекта, получим возможность использования для описания этого процесса хорошо известного и достаточно полно разработанного математического аппарата теории надежности. При этом событие обнаружения дефекта является аналогом отказа, вероятность этого события – вероятность отказа, а вероятность бездефектного состояния системы – вероятности безотказной работы системы  $R_i$  [7, 8, 9].

В процессе экспериментальной отработки системы ее надежность возрастает. Эта динамика роста описывается некоторыми математическими зависимостями, основной из которых является экспоненциальная:

$$R_i(t_i) = a_i - (a_i - R_{oi}) \exp\{-\theta_i t_i\},$$

где:

индекс  $i$  – этап разработки;

$t_i$  – время разработки на этом этапе;

$R_{oi}$  – начальное для данного этапа значение надежности;

$\theta_i$  – интенсивность обнаружения и устранения дефектов на данном этапе;

$a_i$  – предельное для данного этапа значение надежности, определяемое полнотой имитации на данном этапе условий эксплуатации системы.

В результате может быть поставлена и решена задача оптимального по времени перехода от этапа к этапу, а именно:

$$T = t_{i-1} + t_i = \frac{I}{\theta_{i-1}} \ln \frac{a_{i-1} - R_{oi-1}}{a_{i-1} - R_{oi}} + \frac{I}{\theta_i} \ln \frac{a_i - R_{oi}}{a_i - R_{oi+1}} = \min R_{oi}.$$

Решением этой оптимизационной задачи является условие равенства скоростей роста надежности на  $i-1$ -м и  $i$ -м этапах отработки в точке перехода  $R_{oi}$ , а именно:

$$\theta_i (a_i - R_{oi}) = \theta_{i-1} (a_{i-1} - R_{oi}).$$

Аналогичное условие получается, если вместо времени используется стоимость отработки на различных этапах.

### Результаты исследования

Анализ зарубежного опыта разработки летательных аппаратов показывает, что летные испытания, играющие важную роль в отечественной практике для установления соответствия основных характеристик летательных аппаратов нормам лётной годности, за рубежом имеют существенно меньшее, в основном демонстрационное значение, поскольку до 80% всех проблем,

возникающих при разработке соответствующих систем, решается на земле за счёт широкого применения математического моделирования надёжности летательных аппаратов.

Этой современной тенденции соответствуют малые значения интенсивности обнаружения дефектов на этапе летных испытаний и близкие к единице значения случайной составляющей надёжности.

То есть, можно говорить о перспективном формировании требований с учетом математического моделирования надёжности летательных аппаратов, и об актуальности рассматриваемой структуры подхода.

#### *Литература*

1. Кузнецов А.Г. Современные тенденции развития технологии проектирования систем автоматического управления самолетов // Труды Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). выпуск 2. Навигация и управление летательными аппаратами // М.: МИЭА. 2010. С. 2-9.
2. Глаголев А.Н., Гольдинов М.Я., Григоренко С.М. Конструкция самолетов // М: Машиностроение. 1975.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования // Официальное издание. М.: Стандартинформ. 2018 год.
4. Александровская Л.Н., Аронов И.З., Смирнов В.В., Шолом А.М. Сертификация сложных технических систем: учебн. Пособие // М.: Логос. 2001. 312 с.
5. Корнеев В.М. Конструкция и эксплуатация воздушных судов для пилотов и бортинженеров // Ульяновск: УВАУ ГА. 2006.
6. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. 516 с.
7. Исаев В.Г., Серёгин Н.Г., Сорокин С.В. Комплексный расчётно-экспериментальный метод оценки надёжности технических систем летательных аппаратов // М.: Информационно-технологический вестник. 2018. № 4 (18). С. 22-31.
8. Исаев В.Г., Серёгин Н.Г. Анализ надёжности технологического оборудования предприятий ракетно-космической техники на примере консольных фрезерных шпиндельных узлов аппаратов // М.: Информационно-технологический вестник. 2019. № 4 (22). С. 17-23.
9. Проников А.С. Надёжность машин // М.: Машиностроение. 1978. 590 с.

УДК 621.398

**Разработка методики построения многоагентных систем мониторинга и диагностики космического аппарата**

**Н.П. Сидорова**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

**Ю.Ю. Сидоров**, аспирант 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 статье рассмотрены разработки методики реализации многоагентных систем. Приведены основные задачи обработки телеметрических данных и определено место подсистемы мониторинга и диагностики в ней. Рассмотрены основные проблемы разработки многоагентных систем. Проведен анализ современных методологий их разработки.*

Системы обработки телеметрии, искусственный интеллект, многоагентные системы.

**Development of a methodology for constructing multi-agent systems for monitoring and diagnostics of a spacecraft**

**N.P. Sidorova**, Ph.D, Associate Professor, Department of information technology and system management,

**Yu.Yu. Sidorov**, graduate of the Department Of Information technology and management 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 article discusses the development of methods for the implementation of multi-agent systems. The main tasks of telemetry data processing are given and the place of the monitoring and diagnostics subsystem in it is determined. The main problems of the development of multi-agent systems are considered. The analysis of modern methodologies for their development is carried out.*

Telemetry processing systems, Artificial Intelligence, Multi-agent systems.

**Введение**

В настоящее время растет интерес к использованию космического пространства в различных целях: оборонных, коммерческих, научно-исследовательских. Это вызывает рост числа автоматических космических

аппаратов (КА), которые используются в различных целях: спутники связи, спутники военного назначения, космические аппараты исследования дальнего космоса и пр. Современные КА являются сложными техническими системами, управление которой основывается на данных телеметрии, которые является по существу единственным источником информации о состоянии КА, параметрах его движения, данных научных экспериментов и др. При этом возрастают требования к обеспечению надежности работы. Объемы телеметрической информации постоянно увеличиваются, что делает необходимым применение современных информационных технологий для их обработки.

Телеметрия – это «область науки и техники, занимающаяся вопросами разработки и эксплуатации комплекса автоматизированных средств, обеспечивающих получение, преобразование, передачу по каналу связи, прием, обработки и регистрацию измерительной информации о событиях с целью контроля на расстоянии состояния и функционирования технических и биологических систем различных объектов» [5, С.3].

Обработка телеметрии КА включает несколько этапов, которые реализуются на различных частях системы обработки данных:

1. сбор данных от датчиков и их преобразование;
2. передача данных;
3. первичная обработка данных;
4. анализ данных;
5. выработка управленческих решений.

Такой подход к обработке телеметрии определяет многоуровневую распределенную архитектуру систем обработки телеметрических данных, которая реализуется как на борту КА, так и на наземных компонентах [4, 8]. Обобщенная структура системы обработки телеметрии КА представлена на рисунке 1.

Данные датчиков элементов и узлов КА представляют собой аналоговые сигналы, которые преобразуются в цифровую форму, используя специальное программное оборудование на борту КА. При передаче данных применяют методы пакетной передачи и помехоустойчивого кодирования в канале. Для этого также используются специальные алгоритмы и программные средства, обеспечивающие повышение надежности и достоверности передаваемой информации.



Рисунок 1 – Концептуальная архитектура системы обработки телеметрии КА

Подсистема приема и первичной обработки данных обеспечивает [12] повышение качества данных, полученных на основе телеметрии. Это достигается решением ряда задач: оценка качества данных телеметрии, согласование данных,

повышение достоверности данных. Для решения этих задач используются методы интеллектуального анализа данных [3].

Подсистема хранения и анализа данных включает набор методов и моделей обработки данных, которые используются для выработки управленческих решений. Она является, как правило, частью системы поддержки принятия решений.

Концептуальная архитектура интегрированных интеллектуальных систем управления техническими системами, предложенных Пospelовым Д.А., Макаровым И.М., Коньковым В.Г. и др., рассмотренных в [14], включает несколько уровней (слоев), которые решают различные задачи управления техническим объектом, к которым относится и КА. Одной из задач, входящих в блок оперативного управления КА, является задача мониторинга и диагностики его состояния. Современная тенденция построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений основывается на использовании интеллектуальных агентов.

#### **Многоагентные системы**

Многоагентные системы (МАС) являются одним из перспективных направлений искусственного интеллекта. В основе МАС лежит понятие агента. «Агентом является все, что может рассматриваться как воспринимающее свою среду с помощью датчиков и воздействующее на эту среду с помощью исполнительных механизмов» [10, С.75]. Применительно к системам обработки телеметрии КА агент выполняет разнообразные функции обработки данных и реализуется в виде программного интеллектуального агента (ИА). Такие агенты обладают собственной базой знаний, которая представляет собой модель окружения ИА и используется им для решения поставленной задачи. Базовыми свойствами ИА являются автономность, совместное поведение, адаптивность, активность, целенаправленность, наличие знания об окружающей среде и других агентах. В зависимости от способности решать задачи и «уровня интеллектуальности» различают следующие виды ИА [10]:

1. простые рефлексные агенты, выполняющие свою функцию только на основе текущих сведений об окружающей среде;
2. агенты, работа которых базируется на имеющей в них модели внешней среды;
3. агенты, работа которых основывается на наличии цели;
4. агенты, использующие при своей работе функцию полезности;
5. самообучающиеся агенты.

Первые два вида ИА широко применяются в робототехнике. Применительно к решению задач мониторинга и диагностики целесообразно основываться на использовании самообучающихся агентов.

Упрощенная модель ИА [11, С. 5] включает следующие элементы:

- М – множество моделей окружения, на которые реагирует ИА,
- Q – множество целей ИА,
- P – множество планов,
- R – множество допустимых действий,
- E – множество событий в окружающей среде, на которые реагирует ИА,
- L – язык взаимодействия с ИА.

Каждый агент предназначен для решения частной задачи. Поэтому для комплексного решения задачи диагностики состояния КА необходимо создать систему агентов (многоагентную систему), в которой определено множество программных ИА и заданы механизмы их взаимодействия.

Построение МАС в общем случае существенно зависит от решаемой задачи. В [9] выделены основные проблемы разработки МАС, которые препятствуют их широкому применению в промышленной сфере:

- отсутствие единой терминологии, которое затрудняет использование одинаковой интерпретации основных понятий МАС;
- применение широкого набора моделей при разработке;
- сложность реализации базовой модели построения агента- BDI-модели (Belief-Desire-Intention – Убеждение-Желание-Стремление);
- отсутствие гибких методологий разработки МАС, которые могут быть применены для разработки МАС в различных областях.

Поэтому вопрос разработки методики построения таких систем является актуальной задачей.

### **Обзор методологий построения многоагентных интеллектуальных систем**

Разработка методик построения МАС основывается на применении существующих методологий и стандартов. Наиболее широко для построения таких систем применяются стандарт MASIF, предложенный рабочей группой OMG, и спецификация FIPA. Их отличие заключается в способе описания языка взаимодействия с ИА. Методологии разработки, основанные на этих стандартах, позволяют определять архитектуру МАС и создавать её компоненты.

МАС систем мониторинга и диагностики КА относятся к классу программных систем. Этапы жизненного цикла разработки таких систем включают [6]: анализ области применения, проектирование, реализация. В рамках существующих моделей жизненного цикла программных систем предлагается большое количество подходов к разработке МАС. Рассмотрим краткую характеристику наиболее популярных методологий разработки МАС [13].

Методология *Gaia* применяется на этапах анализа и проектирования МАС. В её основе лежит понятие роли ИА, которое позволяет на этапе анализа выделить основные роли ИА и правила их взаимодействия. Методология предполагает построение моделей следующих классов: модели ролей, модели взаимодействия, модели агентов, модели обслуживания, модели знакомств. Роль ИА определяет специфику его поведения при работе МАС. При реализации этой методологии создаются следующие модели: на этапе анализа – модели ролей, модели взаимодействия, на этапе проектирования – модели агентов, модели обслуживания, модели знакомств. При формировании модели ролей в рамках этой методологии формируется набор ролей, которые отражают основные действия ИА. Для каждой роли формируется набор его характеристик, таких как обязанности, разрешения, активности и протоколы. Результатом этапа проектирования является набор моделей, которые описывается в терминах, близких к терминологии, принятой в технологии объектно-ориентированного или компонентного программирования [7].

Методология *AgentUML* является расширением применяемой для разработки объектно-ориентированных унифицированного процесса проектирования (RUP – Rational Unified Process). Методология , *AgentUML* также применяется на этапах анализа и проектирования МАС. При её использовании разрабатываются модели различных видов. Для их построения используется расширение универсального языка моделирования UML. В рамках этой методологии при разработке МАС разрабатываются модели (диаграммы в терминах UML), отражающие различные аспекты системы: диаграммы вариантов использования, диаграммы взаимодействия и др.

Методология *PASSI* затрагивает этапы анализа и, проектирования и реализации МАС. При использовании этой методологии формируются следующие модели: модель системных требований, модель агентного сообщества, модель реализации агентов, модель программного кода и модель развертывания. Для создания моделей различного уровня используются средства языка UML.

Методология *INGENIAS* применяется на этапах анализа и проектирования МАС. При использовании этой методологии разрабатываются модели различных видов: модель организации, модель взаимодействия, модель цели/задачи, модели агентов, модель окружения. Для построения этих моделей используется расширение языка UML.

В методологии *FAML* [2] выделяют два уровня разработки МАС: проектирование и реализация. На каждом уровне формируются модели агентов, отражающие их внешние характеристики (Agent-external), и особенности его поведения (Agent-internal). Это позволяет разделить моделирование поведение агента в системе и его внутреннее наполнение. В рамках этой методологии разрабатываются модели системы, модели агентов, модели, модели поведения.

Методология *ADELFE* [1] ориентирована на разработку адаптивных МАС. В её основе лежит модель сотрудничества ИА. Использование этой методологии предполагает разработку моделей агентов, моделей правил, моделей взаимодействия.

Сравнительный анализ рассмотренных методологий приведен в таблице 1.

Анализ рассмотренных методологий разработки МАС показывает, что ни одна из рассмотренных методологий не поддерживает весь цикл разработки таких систем, способных учитывать специфику их реализации. В рассмотренных методологиях используется большое количество разнообразных моделей. При этом необходимо отметить, что даже при использовании одинаковой терминологии, например, модели агентов, их формализация в разных методологиях существенно отличается. Программные средства реализации МАС в настоящее время основываются на стандартных методах объектно-ориентированного программирования, что делает понятным широкое применение языка UML для разработки моделей различного типа. Расширение языка UML для моделирования агентно-ориентированных систем (AUML) находит применение во многих методологиях: *AgentUML*, *PASSI*, *INGENIAS*, *FAML*, *ADELFE*.

**Таблица 1 – Характеристики методологий разработки МАС**

№	Методология	Этапы жизненного цикла МАС	Формируемые модели
6	<i>Gaia</i>	Анализ и проектирование	модели ролей, модели взаимодействия, модели агентов, модели обслуживания, модели знакомств
2	<i>AgentUML</i>	Анализ и проектирование	Диаграммы с использованием языка AUML
3	<i>PASSI</i>	Анализ, проектирование	модель системных требований, модель агентного сообщества, модель реализации агентов, модель программного кода и модель развертывания.
4	<i>INGENIAS</i>	Анализ и проектирование	модель организации, модель взаимодействия, модель цели/задачи, модели агентов, модель окружения.
5	<i>FAML</i>	Анализ и проектирование	Модель системы, модель агента, модель поведения
6	<i>ADELFE</i>	Анализ и проектирование	модели агентов, модели правил, модели взаимодействия

МАС для каждой конкретной области использования является, по существу, уникальным проектом. Разработка методики построения МАС мониторинга и диагностики КА может опираться на комбинацию рассмотренных методологий.

### **Выводы**

Подсистема мониторинга и диагностики является частью интеллектуальной системы поддержки принятия решений управления КА. Её реализация основывается на ходах к построению интеллектуальных систем. В статье рассмотрены базовые понятия МАС, проблемы их реализации. Проведенный анализ существующих методик разработки показал, что на настоящий момент не существует единой универсальной методики разработки МАС, что делает необходимым разработку такой методики на основе комбинированного подхода, использующего элементы рассмотренных методологий.

### *Литература*

1. A Study of some Multi-Agent Meta-Models / Berton C., Cossentino M., Gleizes M-P., Turci P., Zambonelli F. [Электронный ресурс]. URL: [www.researchgate.net/publication/225134516\\_A\\_Study\\_of\\_Some\\_Multi-agent\\_Meta-models](http://www.researchgate.net/publication/225134516_A_Study_of_Some_Multi-agent_Meta-models) (дата обращения 10.07.2020).



2. FAML: A Generic Metamodel for MAS Development / Gh.Beydoun, Gr.Low, B.Henderson-Sellers, H.Mouratidis, J.Gomes-Sanz, J. Pavo`n, J. Gonzalez-Perez // IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 35(6), pp. 841-863 [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/47529134\\_FAML\\_a\\_generic\\_metamodel\\_for\\_MAS\\_development](https://www.researchgate.net/publication/47529134_FAML_a_generic_metamodel_for_MAS_development) (дата обращения 10.07.2020).
3. Абрамов Н.С., Талалаев А.А., Фраленко ВП. Интеллектуальный анализ телеметрической информации для диагностики оборудования космического аппарата // Информационные технологии и вычислительные системы. 2016. № 1. С. 64-75 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.jitcs.ru/images/documents/2016-01/64\\_75.pdf](http://www.jitcs.ru/images/documents/2016-01/64_75.pdf) (дата обращения 15.07.2020).
4. Вершинин А.Б., Некрасов М.В., Пакман Д.Н. Построение унифицированной системы обработки телеметрической информации в центрах управления полётами космическими аппаратами // Космонавтика и ракетостроение. 2010. № 1. С. 124-130.
5. ГОСТ 19619-74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. Москва: Изд-во стандартов, 1975. 20 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294833/4294833751.pdf> (дата обращения 10.07.2020).
6. Заботина Н.Н. Проектирование информационных систем: учеб. пособие // М. : ИНФРА-М. 2018. 331 с.
7. Исаева Г.Н., Теодорович Н.Н., Харламова Е.С., Польшин С.Н. Использование современных средств программирования в науке о данных // Информационные технологии. Эволюционные процессы // М.: «Научный консультант». 2018. С. 17-23.
8. Программная нейросетевая система контроля космической телеметрии / В.В. Ганченко, А.А. Дудкин, А.В. Инютин, Е.Е. Марушко, Л.П. Паденок // Искусственный интеллект. 2013. № 4. С. 502-510.
9. Промышленное применение многоагентных систем: прогнозы и реалии / В.И. Городецкий, П.О., Скобелев, О.Л. Бухвалов, И.В. Майоров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVIII международной конференции. Самара: ООО «Офорт». 2016. С. 137-142.
10. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход // М.: «Вильямс». 2006. 1408 с.
11. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С. Моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах // Искусственный интеллект и принятие решений 2008. №3. С. 3-15 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.isa.ru/aidt/images/documents/2008-03/2008-03\\_3-15pp.pdf](http://www.isa.ru/aidt/images/documents/2008-03/2008-03_3-15pp.pdf) (дата обращения 15.07.2020).
12. Сидоров Ю.Ю. Новые методы в обработке телеметрии космических аппаратов // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона / Сборник статей по материалам участников VIII Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» // М.: «Научный консультант». 2018. С. 428-436.

13. Спицина И.А. Мультиагентный метод анализа и синтеза информационных систем: учебное пособие // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2017. 92 с.
14. Трофимов В.Б. Интеллектуальные автоматизированные системы управления техническими объектами // М.: Инфра-Инженерия. 2017. 231 с.

УДК 621.78

### **Оптимизация параметров оборудования перспективных многолучевых спутниковых систем**

**Н.Н. Теодорович**, кандидат технических наук, доцент,

**И.И. Ковалев**, кандидат технических наук, доцент,

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.Б. Семенов**, доктор технических наук, профессор,

НИУ Московский государственный строительный университет, МГСУ,  
г. Москва

*Исследовано техническое обеспечение спутниковых многолучевых систем прямого направления и поставлена задача оптимизации параметров этих систем. На основе анализа параметров космического сегмента для абонентских лучей и структуры передающей части бортового ретранслятора предложены варианты частотно-поляризационного плана для улучшения энергетического потенциала спутниковой системы. Показаны способы увеличения зоны обслуживания луча исследуемых систем более чем в 2 раза.*

Аппаратура космического и наземного сегментов, техническое обеспечение, многолучевые системы.

### **Optimization of the parameters of advanced multi-beam satellite systems**

**N.N. Teodorovich**, Ph.D. assistant professor,

**I.I. Kovalev**, Ph.D. assistant 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,

**A.B. Semenov**, Doctor of Engineering Science, professor,  
Moscow State University of Civil Engineering, MGSU, Moscow

*The technical support of satellite multi-beam systems of the forward direction is investigated and the problem of optimization of the parameters of these systems is set. Based on the analysis of the parameters of the space segment for subscriber beams and the structure of the transmitting part of the on-board repeater, variants of the frequency-polarization plan are proposed to improve the energy potential of the satellite system. Methods of increasing the service area of the beam of the systems under study by more than 2 times are shown.*

Space and ground segment equipment, technical support, multi-beam systems.

## Введение

Анализ существующих и перспективных спутниковых систем основан на большом количестве показателей эффективности, таких как параметры орбитальных группировок, типы антенн [5, С.36], гарантированная пропускная способность, используемый частотно-орбитальный ресурс, структура и параметры аппаратуры космического и наземного сегментов [6, С.25], а также стоимость технического обеспечения [3, С.22]. В настоящее время широкое применение нашли спутниковые многолучевые системы для передачи данных на дальние расстояния [1, С.20]. В рамках совершенствования проекта *LEAPFROG* производился сравнительный анализ по пропускной способности различных вариантов многолучевой системы высокоскоростного доступа для спутниковых радиолиний прямого направления от базовой земной станции (БЗС) к абонентской земной станции (АЗС). Выявлено, что это направление является значительно более ресурсозатратным, чем обратное направление от АЗС к БЗС, поскольку приемники АЗС имеют малые диаметры антенн, а ретранслируемый трафик данных прямого направления, как правило, значительно превышает трафик данных обратного направления [4, С.54]. По этой причине правильная оценка режима работы спутниковых многолучевых систем прямого направления является определяющим фактором для оптимизации системы в целом [2, С.64].

## Результаты исследования

В качестве модели спутниковой системы принята модель многолучевой сотовой системы *Ka*-диапазона с угловыми размерами лучей 0,4 угловых градуса. Угловые размеры лучей приняты по аналогии с последними разработками компании *ViaSat*, которые планируется использовать для дальнейшего развития успешно работающей в настоящее время системы *WildBlue*, и в европейской системе *KaSat*. К преимуществам лучей с угловым размером 0,4° можно отнести следующее: плотное покрытие территории; возможность многократного использования частот; возможность использования абонентских терминалов с малыми размерами антенн; повышенная удельная пропускная способность, приходящаяся на каждого абонента.

В качестве базового варианта для сравнительного анализа по пропускной способности принимается перспективная многолучевая система высокоскоростного спутникового доступа с параметрами космического сегмента для абонентских лучей, приведенными в таблице 1.

Как следует из данных таблицы 1, для базовой системы справедливо соотношение

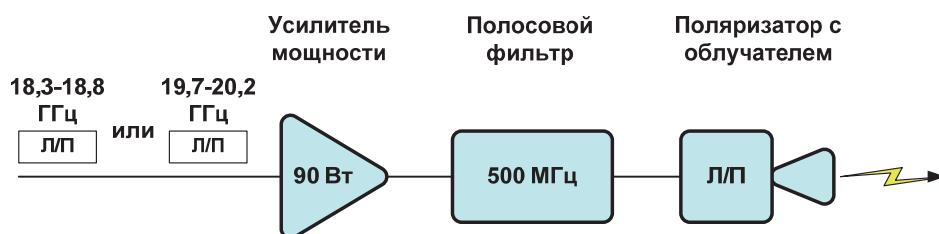
$$B_{SB} = B_{SS} / L, \quad (1)$$

где  $B_{SB} = 500$  МГц – ширина полосы ретрансляции одного луча;  $B_{SS} = 2000$  МГц – ширина полосы частот, выделенная для многолучевой системы высокоскоростного спутникового доступа;  $L=4$  – коэффициент частотно-поляризационного деления.

**Таблица 1 – Основные параметры космического сегмента базового варианта**

Диапазон частот на передаче	18,3-18,8 ГГц или 19,7-20,2 ГГц
Поляризация	круговая левая (Л) или правая (П)
Ширина полосы ретрансляции	500 МГц
Общее число лучей	60
Минимальный угловой радиус смежных лучей	0,32°
Способ частотно-поляризационной изоляции соседних лучей	4-цветный
Выходная мощность бортового ретранслятора в односигнальном режиме	90 Вт

Структура передающей части бортового ретранслятора базовой системы показана на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Структура передающей части бортового ретранслятора для базового варианта**

Если анализировать другие варианты частотно-поляризационного плана с различным значением  $L$  в пределах от 1 до 7, то целесообразно ввести инвариантный по отношению к  $L$  параметр, характеризующий энергетический потенциал спутниковой радиолинии. В качестве такого параметра можно использовать отношение сигнал/шум  $E_S/N_0$ , достигаемое на приемном интерфейсе промежуточной частоты в типовой АЗС, которая располагается в центре луча, при условии 1-цветного способа межлучевой изоляции, то есть при  $L=1$ . Известно, что энергетический потенциал спутниковой радиолинии  $Ka$ -диапазона является случайной величиной, изменяющейся со временем под воздействием спорадических эффектов распространения радиоволн в атмосфере. С учетом этого обстоятельства, при сравнении различных вариантов частотно-поляризационного плана, используется усредненное по времени значение сигнал/шум  $E_S/N_0^* = 6$  дБ, которое было определено в рамках исследований по развитию проекта *LEAPFROG* для типовой АЗС с диаметром антенны 0,67 м при спектральной плотности потока мощности на земной поверхности  $PDF_0 = -119$  дБВт/м<sup>2</sup>МГц.

Очевидно, что в зависимости от расположения АЗС в пределах зоны обслуживания  $i$ -го луча бортовой антенны отношение сигнал/шум будет изменяться в соответствии с формой диаграммы направленности бортовой антенны. Функциональная зависимость отношения сигнал/шум  $E_S/N_0$  от точки расположения АЗС может быть представлена в следующем виде

$$E_s / N_0(r) = L \cdot h^2(r) \cdot (E_s / N_0)^* \quad (2)$$

где  $h^2(r)$  – нормализованное усиление бортовой антенны в направлении АЗС относительно его максимального значения;  $r$  – координатный радиус-вектор с началом в центре зоны обслуживания бортовой антенны, нормализованный по первому минимуму типовой диаграммы направленности луча, которая показана на рисунке 2 для  $h^2(r)$  в дБ.

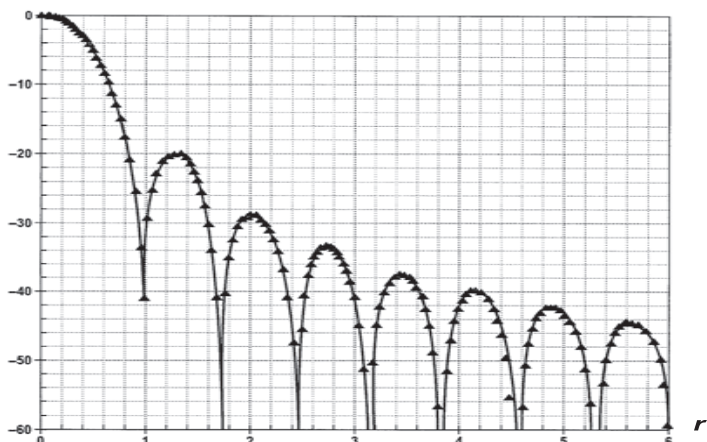


Рисунок 2 – Типовая диаграмма направленности луча бортовой антенны

В зависимости от расположения АЗС меняется и отношение сигнала к уровню межлучевых интерференций, величина которых возрастает при приближении к границе зоны обслуживания луча бортовой антенны. Соответствующее соотношение сигнал/помеха для межлучевой интерференции в зоне обслуживания  $i$ -го луча может быть рассчитано

$$C / I(r) = \frac{h_i^2(r)}{\sum_{j \neq i} h_j^2(r)} \quad (3)$$

где  $C$  – мощность полезного сигнала;  $I(r)$  – мощность помехи;  $h_i^2(r)$  – нормализованное усиление  $i$ -луча бортовой антенны в направлении АЗС, находящейся в зоне обслуживания  $i$ -луча;  $h_j^2(r)$  – нормализованное усиление  $j$ -луча бортовой антенны в направлении АЗС, находящейся в зоне обслуживания  $i$ -луча.

Для точки с радиус-вектором  $r$  суммарный энергетический потенциал луча  $\beta_{SB}(r)$ , зависящий от тепловых шумов и межлучевых интерференций, определяется известным соотношением

$$\frac{1}{\beta_{SB}(r)} = \frac{1}{E_s / N_0} + \frac{1}{C / I(r)} \quad (4)$$

Пропускную способность луча  $C_{SB}(r)$  в точке с радиус-вектором  $r$  можно оценить, используя формулу Шеннона

$$C_{SB}(r) = B_{SB} \cdot \log_2 [1 + \beta_{SB}(r)] \text{ [бит/с].}$$

Для точки с радиус-вектором  $r$  удельная пропускная способность луча  $\gamma_{SB}(r)$ , приведенная к выделенной полосе частот  $B_{SS}$  и численно равная скорости передачи данных в 1 Гц этой полосы, рассчитывается с использованием следующих соотношений

$$\gamma_{SB}(r) = \frac{C_{SB}(r)}{B_{SS}} = \frac{B_{SB}}{B_{SS}} \cdot \log_2 [1 + \beta_{SB}(r)] = \frac{\log_2 [1 + \beta_{SB}(r)]}{L}$$

Усредненная удельная пропускная способность луча  $\gamma_{SB}^*$  может быть найдена путем интегрирования величины  $\gamma_{SB}(r)$  по всей зоне обслуживания луча при соответствующей нормализации относительно площади этой зоны с помощью следующего выражения

$$\gamma_{SB}^* = \frac{\int_{r \in A} \gamma_{SB}(r) \cdot S'(r) \cdot dr}{\int_{r \in A} S'(r) \cdot dr} \quad (5)$$

где  $A$  – зона обслуживания одного луча бортовой антенны;  $S'(r) = dS/dr$  – производная от функции  $S(r)$ , характеризующая дифференциальную зависимость изменения площади зоны обслуживания от изменения положения радиус-вектора  $r$ .

Используя приведенные выше формулы для  $\gamma_{SB}(r)$  и  $\gamma_{SB}^*$  для проектирования многолучевой системы спутникового доступа, оценку удельной пропускной способности системы можно производить либо на основе минимаксного критерия, основываясь на достижении максимума минимального значения  $\gamma_{SB}(r)$  на границе зоны обслуживания луча, либо на основе средневзвешенного критерия, ориентируясь на максимизацию величины  $\gamma_{SB}^*$ .

Процедура максимизации осуществляется путем подбора следующих параметров оптимизации: коэффициента частотно-поляризационного деления  $L$ ; углового расстояния между смежными лучами в гексагональной решетке, ассоциируемого с величиной  $X_3$ , которая численно равна величине нормализованного усиления диаграммы направленности бортовой антенны в точке пересечения диаграмм направленности трех ближайших смежных лучей; усредненного отношения сигнал/шум  $E_S/N_0^*$ .

На рисунке 3 представлены графические зависимости минимального значения удельной пропускной способности  $\gamma_{SB}^{min}$  от коэффициента  $L$  и величины  $X_3$  для многолучевой системы спутниковой связи при  $E_S/N_0^* = 6$  дБ без применения АСМ.

На графиках рисунка 3 минимальное значение  $\gamma_{SB}^{min}$  соответствует минимальному значению энергетического потенциала луча  $\beta_{SB}(r)$  на краю зоны обслуживания. Для сравнения на рисунке 4 показаны аналогичные зависимости для усредненной удельной пропускной способности  $\gamma_{SB}^*$  при применении АСМ. Как видно из приведенных на рисунке 4 графиков, усредненная пропускная способность  $\gamma_{SB}^*$  для базового варианта многолучевой системы высокоскоростного спутникового доступа с  $L=4$  при оптимальном значении  $X_3 \approx -3,5$  дБ равна  $\sim 0,5$  бит/с Гц, в то время как такая же пропускная способность с  $L=1$  при оптимальном значении  $X_3 \approx -8$  дБ больше приблизительно на 60%.

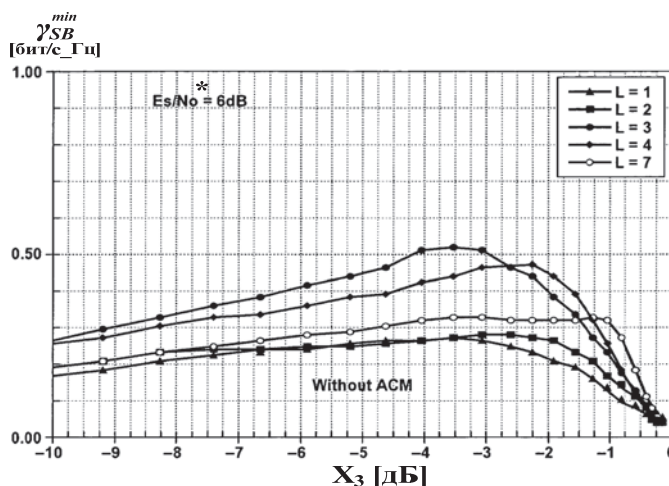


Рисунок 3 – Минимаксная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_S/N_0^* = 6$  дБ

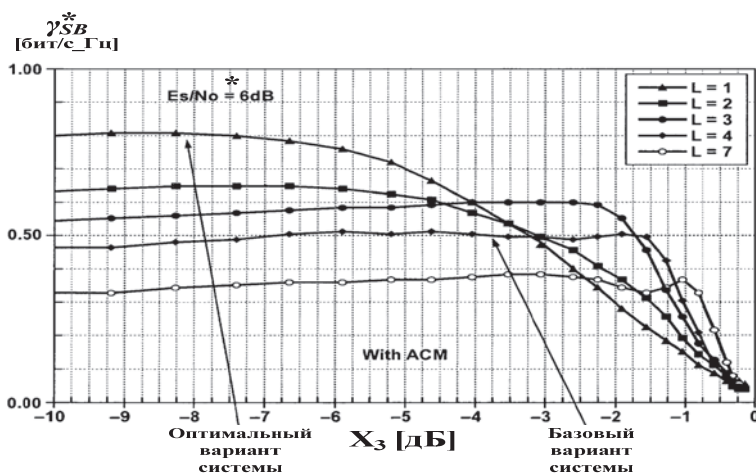


Рисунок 4 – Средневзвешенная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_S/N_0^* = 6$  дБ

При увеличении усредненного значения сигнал/шум до величины  $E_S/N_0^* = 12$  дБ, которая может быть достигнута за счет повышения выходной мощности бортового ретранслятора и/или увеличения диаметра рефлектора бортовой антенны, обеспечивается соответствующее повышение удельной пропускной способности, как показано на рисунках 5 и 6.



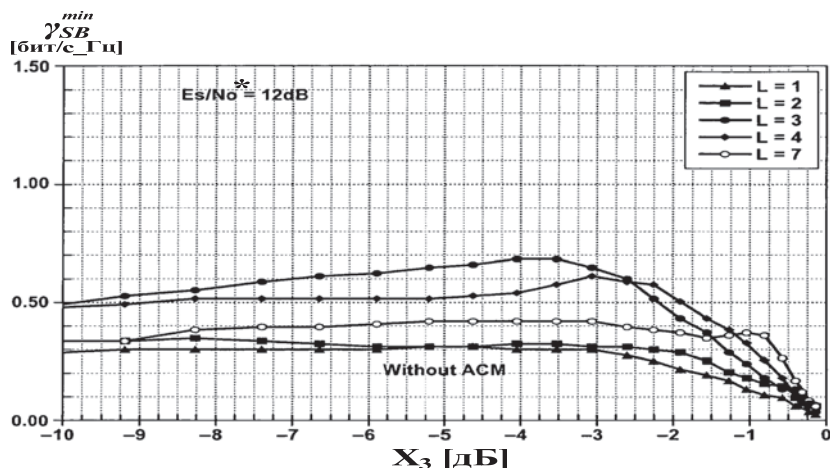


Рисунок 5 – Минимаксная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_s/N_0^* = 12$  дБ

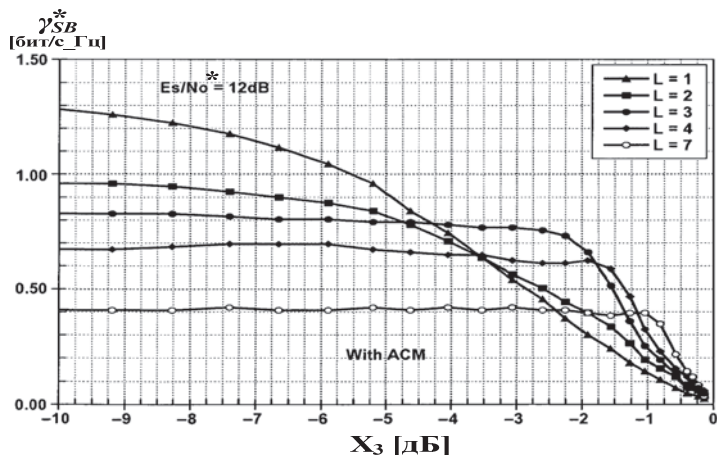


Рисунок 6 – Средневзвешенная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_s/N_0^* = 12$  дБ

Если уменьшить выходную мощность бортового ретранслятора и/или диаметр рефлектора бортовой антенны, понизив усредненные значения сигнал/шум до величины  $E_s/N_0^* = 0$  дБ, то соответствующее уменьшение удельной пропускной способности может быть проиллюстрировано графиками на рисунках 7 и 8.

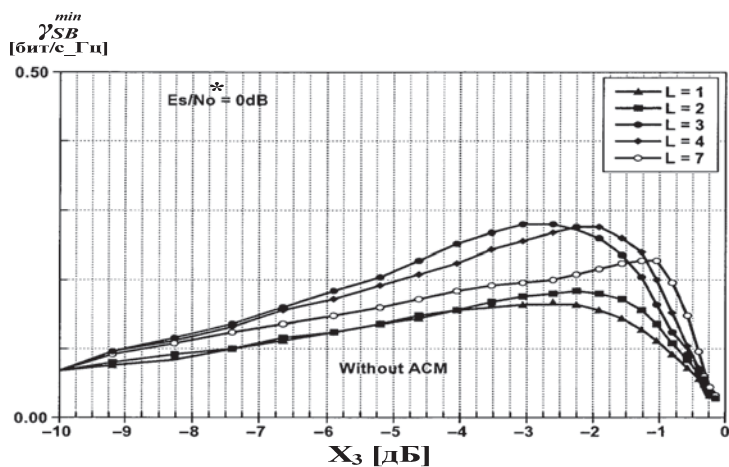


Рисунок 7 – Минимаксная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_s/N_0^* = 0$  дБ

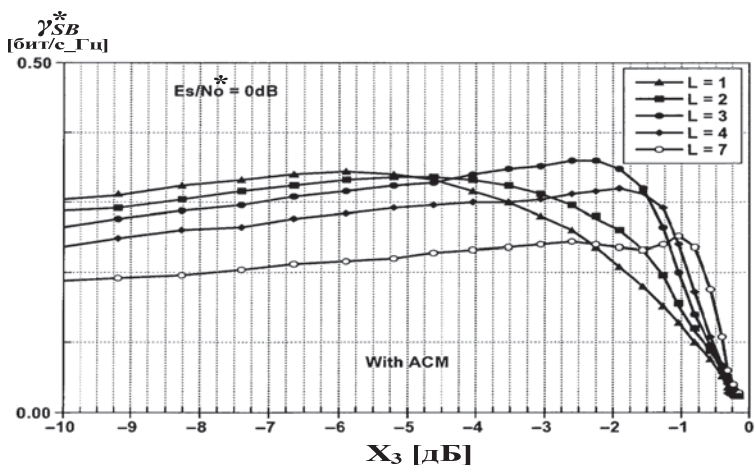


Рисунок 8 – Средневзвешенная оптимизация удельной пропускной способности при  $E_s/N_0^* = 0$  дБ

Используя средневзвешенный критерий оптимизации многолучевой системы высокоскоростного спутникового доступа по удельной пропускной способности  $\gamma_{SB}^*$  луча, в рамках развития проекта *LEAPFROG* были проанализированы различные варианты реализации системы, отличающиеся от базового варианта конфигурацией и параметрами космического сегмента. Наряду с описанными выше техническими и системотехническими параметрами:  $L$ ,  $B_{SB}$ ,  $PDF_0$ ,  $X_3$ ,  $\gamma_{SB}^*$ ,  $B_{SS}$  и  $E_s/N_0^*$  при разработке системы важное значение имеют следующие дополнительные параметры космического сегмента:

- выходная мощность бортового ретранслятора в одном луче  $P_{SB}$ , [Вт];
- диаметр рефлектора бортовой антенны  $D_{SB}$ , [м];

- общее число бортовых усилителей мощности полезной нагрузки  $TWA\#$ ;
- минимальное угловое расстояние в гексагональной решетке между смежными лучами бортовой антенны  $\varphi_{SB}$ , в угловых градусах.

В высокоскоростных спутниковых системах для всех вариантов проектирования неизменно общее число лучей, равное 60. Усредненные значения пропускной способности одного луча системы  $C_{SB}^*$  рассчитывается на основе представленных выше функциональных зависимостей  $\gamma_{SB}^*$  от аргументов  $E_s/N_0$ ,  $L$  и  $X_3$  с помощью следующего соотношения

$$C_{SB}^* = B_{SS} \cdot \gamma_{SB} = L \cdot B_{SB} \cdot \gamma_{SB}^* \quad (6)$$

От базовой системы, имеющий 4-цветный частотно-поляризационный план можно перейти к системе с 1-цветным частотно-поляризационным планом с сохранением прежней зоны обслуживания, увеличив диаметр рефлектора бортовой антенны с  $D=2,8$  м до  $D=4,1$  м и изменив значение параметра  $X_3 = -3,5$  дБ на значение  $X_3 = -8$  дБ. В этом случае конфигурация передающей части бортового ретранслятора должна быть модифицирована по сравнению с аналогичной конфигурацией для базовой системы в структуру, представленную на рисунке 9.

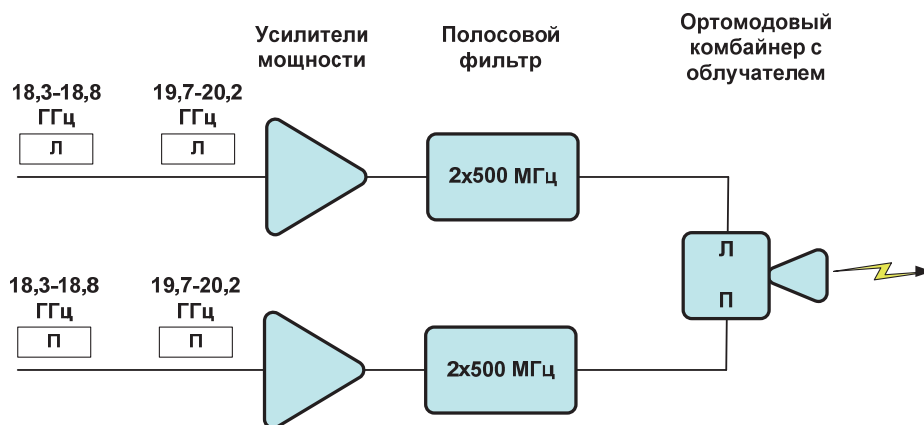


Рисунок 9 – Структура передающей части бортового ретранслятора для 1-цветного частотно-поляризационного плана

Благодаря разбиению выделенной полосы частот на два поддиапазона 18,3...18,8 ГГц и 19,7...20,2 ГГц, разделенных защитным промежутком 500 МГц, интермодуляционные продукты из-за нелинейности бортовых усилителей мощности, работающих в 2-сигнальном насыщенном режиме, не попадают в оба поддиапазона. Использование 2-сигнального режима и ортомодового комбайнера, объединяющего выходные сигналы обоих усилителей мощности, вносит дополнительные потери порядка 1 дБ по сравнению с базовым вариантом, поэтому реальный выигрыш по дополнительному усилению, обусловленный применением бортовой антенны большего диаметра, в системе с 1-цветным частотно-поляризационным планом составит только 2,3 дБ. Имеется, по крайней

мере, две возможности для использования этого выигрыша по усилению. В одном варианте, дополнительное усиление используется для уменьшения выходной мощности луча на 2,3 дБ до величины  $P_{SB} = 2 \times 27$  Вт, при этом спектральная плотность потока мощности на поверхности Земли по сравнению с базовой системой уменьшится с величины  $PDF_0 = -119$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц до величины  $PDF_0 = -125$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц, а усредненная пропускная способность возрастет с величины  $C^*_{SB} = 1,0$  Гбит/с до величины  $C^*_{SB} = 1,6$  Гбит/с.

В другом варианте, выходная мощность луча сохраняется неизменной и равной величине  $P_{SB} = 2 \times 45$  Вт, что обеспечивает увеличение усредненного отношения сигнал/шум  $E_s/N_0^*$  на 2,3 дБ и соответствующее повышение усредненной пропускной способности по сравнению с базовой системой до величины  $C^*_{SB} = 1,9$  Гбит/с.

Аналогичный подход может быть использован для сравнительного анализа системы с 2-цветным частотно-поляризационным планом, которая от базовой системы отличается увеличенными до величины  $D_{SB} = 3,6$  м размерами бортовой антенны и измененной структурой выходной части бортового ретранслятора, показанный на рисунке 10.

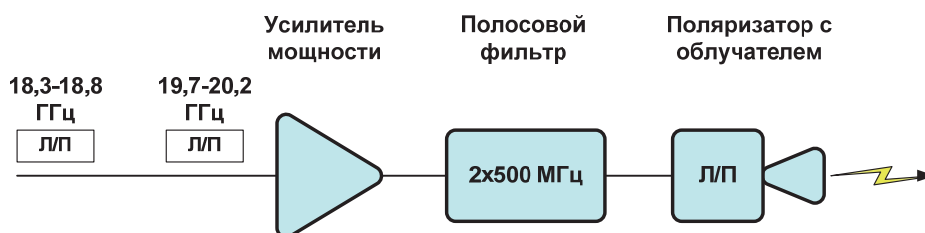


Рисунок 10 – Структура передающей части бортового ретранслятора для 2-цветного частотно-поляризационного плана

Как и в случае использования 1-цветного частотно-поляризационного плана, дополнительный выигрыш по усилению 2,2 дБ, обусловленный применением бортовой антенны большего размера, уменьшается на 1 дБ из-за особенностей 2-сигнального режима работы бортового усилителя мощности. Реальный выигрыш, равный 1,2 дБ, может быть реализован двумя способами, описанными выше для 1-цветной системы.

При первом способе выигрыш по усилению 1,2 дБ может обеспечить уменьшение выходной мощности луча до величины  $P_{SB} = 68$  Вт. В этом случае усредненная пропускная способность 2-цветной системы  $C^*_{SB} = 1,28$  Гбит/с при  $PDF_0 = -122$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц.

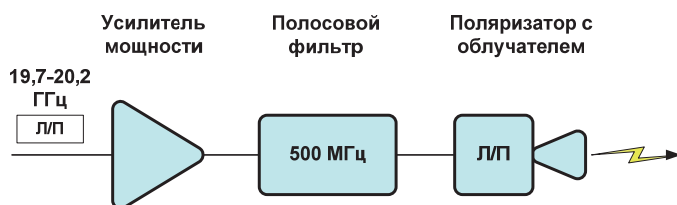
При втором способе дополнительное усиление обеспечивает увеличение пропускной способности до величины  $C^*_{SB} = 1,4$  Гбит/с за счет повышения величины  $E_s/N_0^*$  на 1 дБ при  $PDF_0 = -120,8$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц.

В том случае, если полоса частот, выделенная для многолучевой системы высокоскоростного спутникового доступа, сокращается вдвое, например, используется только поддиапазон 19,7...20,2 ГГц, то в 2-цветной системе с бортовой антенной 3,6 м выходная мощность луча может быть снижена до

величины  $P_{SB} = 54$  Вт по сравнению с базовой системой за счет выигрыша по усилению антенны 2,2 дБ при сохранении прежнего значения  $PDF_0 = -119$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц. Хотя при этом возрастает отношение сигнал/шум до величины  $E_s/N_0^* = 9$  дБ, усредненное значение пропускной способности уменьшается до величины  $C^*_{SB} = 0,77$  Гбит/с.

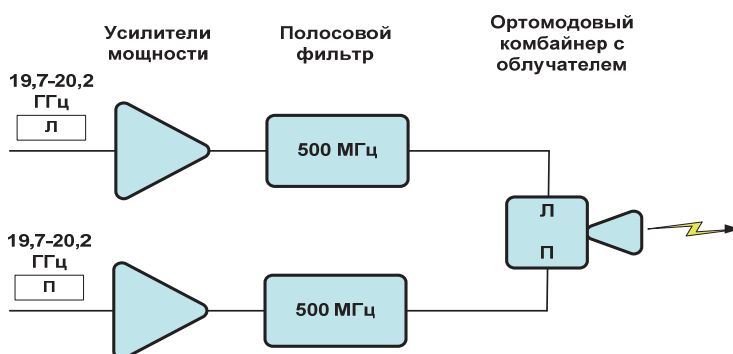
Для того, чтобы несколько повысить пропускную способность 2-цветной системы с уменьшенной вдвое выделенной полосой частот, можно повысить, например, спектральную плотность мощности до величины  $PDF_0 = -118$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц за счет увеличения выходной мощности луча до величины  $P_{SB} = 68$  Вт.

Следует отметить, что в 2-цветной системе с уменьшением вдвое выделенной полосы частот, усилители мощности работают в 1-сигнальном режиме насыщения без потерь мощности в соответствии со структурной схемой базового ретранслятора, представленной на рисунке 11.



**Рисунок 11 – Структура передающей части базового ретранслятора для 2-цветного частотно-поляризационного плана в диапазоне 19,7...20,2 ГГц**

Аналогичный способ построения бортового ретранслятора может быть использован при переходе к 1-цветному частотно-поляризационному плану в выделенном диапазоне частот 19,7...20,2 ГГц, как показано на рисунке 12.



**Рисунок 12 – Структура передающей части базового ретранслятора для 1-цветного частотно-поляризационного плана в диапазоне 19,7...20,2 ГГц**

С такой конфигурацией ретранслятора бортовая антенна с диаметром  $D_{SB} = 4,1$  м обеспечивает дополнительное усиление 3,3 дБ по сравнению с базовой

системой. Если выходная мощность луча  $P_{SB} = 2 \times 45$  Вт сохраняется, то отношение сигнал/шум возрастает от базовой величины  $E_s/N_0^* = 6$  дБ до  $E_s/N_0^* = 12,3$  дБ за счет дополнительного усиления бортовой антенны и сокращения вдвое выделенной полосы частот. Усредненная пропускная способность в такой 1-цветной системе достигает величины 1,24 Гбит/с при  $PDF_0 = -118,7$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц.

Если даже на 50% уменьшить выходную мощность луча до величины  $P_{SB} = 2 \times 22,5 = 45$  Вт, то полученная усредненная пропускная способность  $C^*_{SB} = 1,05$  Гбит/с все равно будет больше аналогичной величины в базовой системе. Используя бортовую антенну диаметром 2,8 м в сокращенном диапазоне 19,7...20,2 ГГц для 1-цветной системы, можно увеличить зону обслуживания луча более чем в 2 раза за счет увеличения минимального углового расстояния между смежными лучами до величины  $\varphi = 0,47^\circ$  при  $X_3 = -8$  дБ по сравнению с базовой 4-цветной системой, в которой  $\varphi = 0,32^\circ$  при  $X_3 = -3,5$  дБ. Сохраняя базовое значение выходной мощности луча  $P_{SB} = 2 \times 45 = 90$  Вт, можно обеспечить  $E_s/N_0^* = 12,3$  дБ при  $PDF_0 = -122$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц, чтобы достичь усредненной пропускной способности  $C^*_{SB} = 1,04$  Гбит/с. Уменьшив выходную мощность луча до величины  $P_{SB} = 2 \times 22,5 = 45$  Вт, получить  $C^*_{SB} = 0,8$  Гбит/с.

Оценку оптимальной конфигурации исследуемой спутниковой системы целесообразно проводить с точки зрения охвата максимального количества абонентов и возможности предоставления достаточной полосы пропускания для оказания услуг. По прогнозной оценке, потенциальная абонентская база для РСС-ВСД может составить около 2 млн. человек.

### **Выводы**

Для того чтобы обеспечить подключение всех потенциальных абонентов широкополосного доступа к высокоскоростной спутниковой системе, необходимо обеспечить покрытие территории реальными лучами КА.

Предложено техническое обеспечение спутниковых многолучевых систем прямого направления для оптимизации параметров: пропускной способности, зоны обслуживания при одноцветном и двухцветном частотно-поляризационном плане.

Показано, что если даже на 50% уменьшить выходную мощность луча в передающей части ретранслятора, разработанного по предложенному способу построения, до величины 45 Вт, то полученная усредненная пропускная способность 1,05 Гбит/с одноцветной системы все равно будет больше аналогичной величины в базовой системе.

В 2-цветной системе с уменьшением вдвое выделенной полосы частот усилители мощности работают в 1-сигнальном режиме насыщения без потерь мощности. Реальный выигрыш равен 1,2 дБ.

### *Литература*

1. Аббасова Т.С., Погосян А.Т. Анализ структуры наземного комплекса управления космическими летательными аппаратами // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч.1 / Поволжский гос. ун-т сервиса // Тольятти: Изд-во: ПВГУС. 24-25.03.2016. С. 19-22 (345 с.).

2. Аббасова Т.С., Комраков А.А. Восстановление и проверка корректности телеметрических данных // Информационно-технологический Вестник. 2015. № 2(04). С. 55-64.
3. Артюшенко В.М., Васильев Н.А., Аббасова Т.С. Комплекс полунатурного моделирования систем автоматического управления летательных аппаратов и ракетно-космической техники // Сборник статей Международной научно-практической Интернет-конференции «Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании». 2013. С. 17-22 (425 с.).
4. Кучеров Б.А. Адаптация мощности земных станций узловой сети спутниковой связи при работе в стволе с прямой ретрансляцией // Двойные технологии. 2015. № 1. С. 53-58.
5. Чечин Г.В. Тенденции и концепции построения сетей связи с использованием негеостационарных спутниковых группировок // Электросвязь. 2020. № 4. С. 36-43.
6. Якушенко С.А., Забело А.Н., Антонов В.В., Веркин С.С., Егрушев В.Е., Смирнов А.А. Учет особенностей планирования сетей спутниковой связи работающих в ka/q-диапазонах частот // Colloquium-journal. 2020. № 15-1 (67). С. 25-29.

УДК 004.05

**Разработка требований к средствам поддержки систем планирования диспетчерского управления в сложных и неопределенных условиях**

**Т.С. Аббасова**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,

**А.В. Шмелев**, аспирант второго года обучения 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 задачи систем планирования диспетчерского управления в сложных и неопределенных условиях, показано, что для поддержки аппаратного и программного обеспечения таких систем необходимо использовать средства современных облачных технологий. На основе анализа характеристик облачных технологий разработаны требования к структуре аппаратно-программных средств для проектирования/модернизации систем поддержки принятия решений для диспетчерского управления в сложных и неопределенных производственных условиях. Предложены оценки эффективности программно-аппаратных средств поддержки, которые выражаются в оценке эффективного трафика данных, зависящего о пропускной способности аппаратных средств поддержки.*

Система поддержки принятия решений, диспетчерское управление, облачные технологии, трафик данных.

**Development of requirements for support for dispatch control planning systems in complex and uncertain conditions**

**T.S. Abbasova**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information technologies and control systems,

**A.V. Shmelev**, graduate second year 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 tasks of dispatch control planning systems in difficult and uncertain conditions are analyzed, it is shown that to support the hardware and software of such systems, it is necessary to use modern cloud technologies. Based on the analysis of the characteristics of cloud technologies, requirements have been developed for the structure of hardware and software for the design / modernization of decision support systems for dispatch control in complex and uncertain production conditions. Estimates of the effectiveness of software and hardware support are proposed, which are expressed*



*in the evaluation of effective data traffic, which depends on the bandwidth of the hardware support.*

Decision support system, dispatch control, cloud technology, data traffic.

### **Введение**

Сегодня существует большое количество научной литературы, в которой решаются задачи диспетчерского управления в неопределенных производственных условиях с использованием передовых методов, методик и алгоритмов, которые помогают прогнозировать и/или реагировать на незапланированные события. Большинство теоретических исследований рассматривают эту задачу с технической точки зрения с четко определенными, упрощенными и объективными аналитическими задачами, включающими ограниченное число событий и их предполагаемое или идентифицированное влияние по времени на отдельные графики [1, С.111]. Однако, есть типы производств с высокой неопределенностью и сложностью, где многие факторы влияют на процесс принятия решений, которые могут быть существенно сложнее [2, С.340]. Таким образом, очень немногие из усовершенствованных моделей и систем, которые принимают решения диспетчерского управления, оказали влияние и предоставили рекомендации в промышленной практике [3, С.458]. Это приводит к значительным усилиям по настройке систем планирования диспетчерского управления в соответствии с фактическими потребностями производственной среды и лиц, принимающих решения [4, С.9]. Также не учитывается тот факт, что процесс планирования диспетчерского управления производством осуществляется в сложных и динамичных организациях, состоящих из оборудования, людей, информации, современных информационных систем, построенных на основе облачных технологий, и подверженных влиянию множества внешних факторов [5, С.528].

Ставится задача нахождения структуры аппаратных и программных средств поддержки, которую можно использовать для проектирования/модернизации систем поддержки принятия решений для диспетчерского управления в сложных и неопределенных производственных условиях. Определение структуры технических и программных средств для систем поддержки принятия решений на основе облачных технологий актуально, так как в стабильных и надежных средах аналитические инструменты и компьютеризированные системы облачных технологий могут дать ожидаемые результаты производительности.

### **Результаты исследования**

В соответствии с постановкой задачи, надо разработать структуру программных и аппаратных средств для проектирования/модернизации системы поддержки принятия решений динамического планирования и управления. В то время как проектирование текущих систем планирования в основном сосредоточено на создании начальных расписаний с нисходящим подходом, эта структура подразумевает, что проектирование/усовершенствование системы поддержки принятия решений должно начинаться с восходящего подхода. Более конкретно фокусируется на динамике процесса обработки событий и перепланирования и возникающих аспектах вокруг информационных потребностей для принятия эф-

фективных обоснованных решений. Влияние характеристик этого процесса на проект системы поддержки принятия решений рассматривается и отражается. Таким образом, применимость и практичность системы могут быть улучшены с учетом потребностей ситуации контроля производства, средств аппаратной и программной поддержки и лиц, принимающих решения.

Разработаны следующие требования к средствам аппаратной и программной поддержки систем планирования диспетчерского управления в сложных и неопределенных условиях:

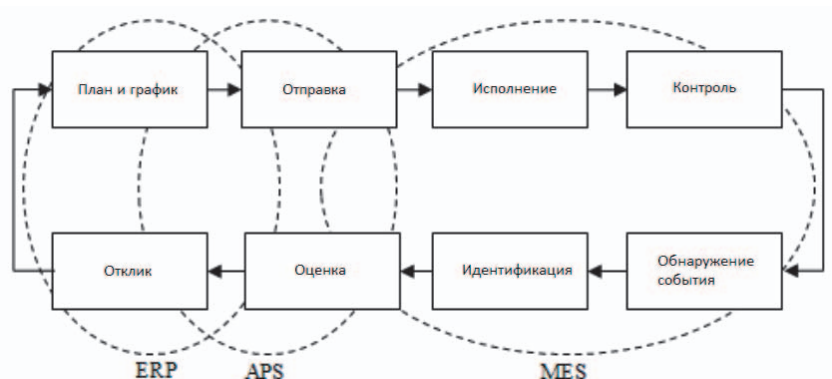
- 1) Требования к информационным потребностям, которые возникают, когда происходят незапланированные события.
- 2) Требования к способам представления информации путем визуализации, структуризации и моделирования.
- 3) Требования к ИТ-конфигурации при работе с незапланированными событиями в типичной.
- 4) Требования к доступности информации и приемлемому качеству данных.

Эти требования предлагается реализовать с помощью описанных в статье организационно-технических мероприятий.

1) Для учета информационных потребностей следует учитывать, что процесс принятия решений для обработки незапланированных событий заключается в обнаружении, идентификации, оценке и реагировании, как показано на рисунке 1 с помощью цикла принятия решений. Как только причина события обнаружена с помощью автоматизированных систем или людей, лицо, принимающее решение, должно определить значимость проблемы в данной ситуации, чтобы классифицировать то, что требует немедленного внимания, и кто должен быть вовлечен. На следующем этапе оцениваются альтернативные решения, чтобы найти подходящее в данной ситуации и ограничениях. Эта стадия оценки также включает в себя усилия по обмену информацией во всей организации (например, операторы, планировщики, и даже отдел продаж в некоторых случаях), чтобы увидеть, какие ограничения можно ослабить, например, какие задания могут быть отложены. После того, как выбрано подходящее решение и предприняты действия, планировщики должны разобраться с последствиями (спрогнозировать эти последствия). Эта стадия пост-анализа может также привести к дальнейшим корректировкам планирования диспетчерского управления (например, изменения в исполнительных приоритетах рабочих мест).

Следовательно, процесс принятия решений включает в себя множество функциональных ролей (обслуживание, качество, продажи) и ИТ-систем в процессе идентификации и решения проблем. Может быть много разных ИТ-конфигураций, приложений и возможностей систем, поддерживающих функциональные процессы и роли в организации, в различной степени и содержания. На абстрактном уровне возможная поддержка этих систем в процессе обработки событий и перепланирования может быть предоставлена на основе раздела типичных настроек программных средств. Однако реализация этих преимуществ все еще страдает от сложности процесса перепланирования на практике по разным причинам с точки зрения эффективного процесса принятия решений. Многие из этих проблем могут быть собраны вокруг парадигмы информационных потреб-

ностей, которая может охватывать несколько вопросов, объясненных в следующей структуре. Структура аппаратных и программных средств также должна учитывать аспекты, связанные с получением необходимой информации в процессе принятия решений.



**Рисунок 1 – Цикл принятия решений для реагирования на незапланированные события и основные области поддержки системы (составлено автором)**

2) Для разработки способов представления информации, использующейся при моделировании версии задачи планирования / повторного планирования и принятия решения в системе, строятся математические модели, с помощью которых делаются предположения и определяется проблемное пространство с некоторой степенью точности [4, С.6]. Это приводит к тому, что часть внутренней или внешней информации об ограничениях не учитывается в модели, что приводит к неправильному восприятию проблемного пространства. Когда изменения обнаружены, происходит корректировка математической модели в воспринятом проблемном пространстве, что приводит к выявлению новой проблемы. Однако в зависимости от типа события и ситуации эти изменения приводят к тому, что некоторые «непредставленные» ограничения (то есть внутренние или внешние) должны учитываться в процессе принятия решений. Таким образом, новая информация необходима для выявления проблемы и решения в данной ситуации.

Рассмотрим пример поломки машины, который нарушает местное расписание. Чтобы выполнить действие по перераспределению, лицо, принимающее решение, должно получить дополнительную информацию о ситуации, такую как состояние альтернативных компьютеров, на которых могут выполняться нарушенные задания, состояние необходимых дополнительных ресурсов для запуска новой операции (например, оператор, инструменты, другие расходные материалы), внутреннее и внешнее состояние других заданий, совместно использующих альтернативную машину (например, их график, уровни запасов и статус приоритета). Этот пример может быть расширен гораздо большей ситуативной информацией, чтобы идентифицировать проблему (ограничения) и найти подходящее решение.

Проблема структурирования и визуализации информации связана с тем, что большинство ИТ-систем имеют недостатки, не учитывающие когнитивные навыки людей. Эффективность решений также зависит от того, насколько быст-

ро лицо, принимающее решения, сможет понять ситуацию на основе доступной информации. Сегодня много информации в реальном времени доступно благодаря последним технологическим достижениям, в том числе с помощью информационных сервисов облачных технологий. Однако, помимо преимуществ улучшенной возможности принятия решений с более доступной и точной информацией и в более короткие сроки благодаря информационным сервисам, возникает очень важная проблема практического использования увеличившихся данных. Следовательно, визуализация также играет важную роль в успешной реализации систем. Использование компьютерных программ поддержки планирования зависит от устройства с психологической значимостью, но все же не зависит от события. Как правило, человек, которому необходимо взаимодействовать с программой и информацией в реальном времени, не учитывается. Для лучшего восприятия системы планирования, для планировщика необходима лучшая доступность и видимость необходимой информации, основанная на когнитивном анализе «планировщика-человека» [6, С.1801]. Пределы человеческих навыков принятия решений должны быть хорошо поняты при проектировании программного интерфейса дисплея.

3) При разработке требований к ИТ-конфигурации, предназначенной для обработки данных о незапланированных событиях, необходимо учитывать тот факт, что большинство современных производственных фирм используют системы планирования ресурсов предприятия ERP (от англ. Enterprise Resource Planning – планирование ресурсов предприятия) для управления производством. Фундаментальные преимущества ERP-систем заключаются в их способности эффективно обрабатывать и регистрировать транзакции, а не в их собственных возможностях планирования и контроля [7, С.850]. При использовании для планирования и управления производством системы ERP применяют логику планирования потребности в материалах, их преобразуют в требования к неточному материалу с временной привязкой и вычисляют плановое деблокирование заказа для подробного планирования и использования в производственном цехе. На производственном этапе сгенерированный график подвержен неопределенности, за которую система не отвечает. Это создает много проблем для выполнения диспетчерского управления производством позже в цехах, таких как изменяющиеся рабочие нагрузки и изменение узких мест.

За последние два десятилетия появились системы APS (от англ. Advanced Planning & Scheduling – усовершенствованное планирование), дополняющие системы ERP и исключают некоторые основные допущения. Схема их взаимодействия приведена на рисунке 2 [8, С.56]. APS значительно превзошла функциональность планирования системы ERP, например, ограниченные возможности ресурсов одновременно с функцией планирования материала. Сильной стороной APS является возможность имитации различных сценариев планирования перед выпуском плана, что приводит к соблюдению сроков выполнения заказов клиентов с помощью наиболее эффективных решений планирования емкости; а также взаимосвязь с системами PDM (от англ. Product Data Management – управление данными об изделии), PLM (от англ. Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделия), в которые поступает информация с различных систем автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизи-

рованных систем технологии производственного процесса (АСТПП), получающих обработанные данные из баз данных технологического процесса (БД ТП) и других специализированных баз данных. Системы APS предотвращают некоторые неопределенности при диспетчерском управления, с которыми системы ERP неизбежно сталкиваются в цехах. APS недавно была стандартизирована и представлена в качестве передовой технологии планирования, и то, как эта технология может обрабатывать неопределенности, все еще остается открытой темой исследования [7, С.850].

Системы управления производством были разработаны для содействия выполнению, мониторингу и контролю производственной деятельности в цехе, устраняя недостатки систем ERP в эксплуатации детальной информации в реальном времени из цеха. Их можно охарактеризовать как информационные и коммуникационные системы в цехах, которые обеспечивают обратную связь в режиме реального времени.

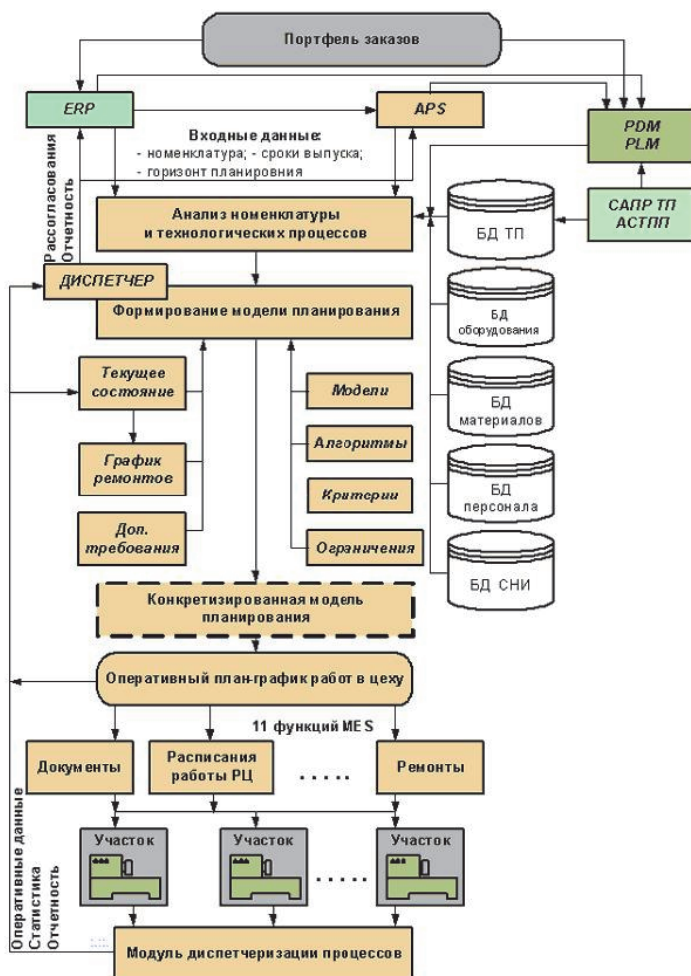


Рисунок 2 – Типовая схема взаимосвязи систем APS и ERP [8]

Функциональные возможности охватывают задачи по производству и управлению производством на предприятии, делая доступными данные цеха и измеряя показатели эффективности в реальном времени (например, использование оборудования, наличие инвентаря, состояние качества). Это делает его мощным инструментом для выявления нарушений. Однако особенно не хватает возможностей для принятия решений, в частности, в оценке и диагностике того, какие действия по перепланированию следует предпринять.

4) Требования к доступности информации и приемлемому качеству данных должны учитывать следующую проблему. Поскольку возникновение события влечет за собой необходимость в дополнительной информации для эффективного решения эпизода в данном контексте, доступность информации становится характеристикой этого процесса. Большая часть информации может быть доступна в системах, однако в этом отношении использование ИТ-систем может быть затруднено из-за доступности информации в обновленном виде. В периодическом контрольном решении эта предпосылка не будет проблемой для внедрения, поскольку агрегированная информация (например, уровни запасов в конце недели) собирается и используется. Тем не менее, принятие решений на основе событий является сложным процессом с точки зрения необходимости подробного обновления информации как о первичных (например, текущие уровни учета нарушенных заданий с поломкой машины), так и о вторичных ограничениях (например, текущие уровни запасов других рабочих мест, разделяющих альтернативную машину) проблемы. Низкое качество данных является одной из основных причин использования специальных инструментов и электронных таблиц для дополнения инструментов планирования [6, С.1799].

Проблема передачи качественных данных также связана с интеграцией других систем с системой планирования / перепланирования для получения и использования необходимой информации в процессе принятия решений. Ключевым фактором для реализации такого механизма управления событиями, является предоставление информации в момент предполагаемой потребности в информации. Во многих случаях информация может быть доступна в разных системах и форматах, что затрудняет доступ к ней при необходимости. В этом отношении некоторые из авторов предложили автоматизированные решения, которые используют информацию в реальном времени из других систем и технологий. Авторы, которые следуют потоку исследований, основанных на практике, в основном предпочитали интерактивные решения «человек-компьютер». Будет ли это обрабатываться алгоритмом или визуализироваться как вспомогательная функция, интеграция источников информации в систему планирования становится актуальной проблемой. В этом контексте Фраминан [6, С.1801], и Роуз подчеркивают, что интеграция систем может стать слишком сложной и невозможной, и предлагают простые и модульные подходы, такие как использование протоколов обмена данными для обмена информацией.

В настоящее время для обработки данных интегрированных систем разработаны информационные сервисы облачных технологий, классификация которых представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Классификация информационных сервисов на основе облачных платформ (составлено автором)

Таблица 1 – Требования к обеспечению системы поддержки принятия решений для диспетчерского управления (составлено автором)

Требования	Характеристики аппаратного и программного обеспечения
<b>Высокая надежность ЦОД и сетевой инфраструктуры</b>	Географически распределенные ЦОД (например, Linx, Ixcellerate, MediaData, SafeData). Присутствие в точках обмена трафиком – ММТС-9, ММТС-10. Несколько независимых Интернет операторов. Пропускная способность базовой сети – не ниже 10 Gbit/s
<b>Высокопроизводительная облачная платформа</b>	Общий размер 50 ТБ RAM и 2 ПТ Storage, построена на промышленных решениях ведущих вендоров: HP, Cisco, Dell, Arista.
<b>Сеть сервисных центров</b>	Обслуживание: ИТ-инфраструктуры заказчика, СУБД, операционных систем, сетевого оборудования, рабочие места, периферийную технику, банкоматы, операционные кассы
<b>Сертификация экспертами, каждый из которых является экспертом трех направлений</b>	Экспертиза: в сетевой инфраструктуре, в построении облачных платформ, в DR-решениях (резервное копирование, репликация), в организации мониторинга сетей, систем и сервисов, администрированию ОС и СУБД, обеспечению информационной безопасности, сервисов на базе Служб Microsoft, хостинг IC, хостингу сайтов / IC битрикс.
<b>Клиенты</b>	Компания обслуживает средние и крупные корпорации в отраслях: ритейл, финансы, e-commerce, страхование, транспорт, производство, телекоммуникации и др.

На основе анализа развития этих облачных сервисов [9, С.18] сформулированы требования к аппаратному (рабочие станции, сетевая инфраструктура, центры обработки данных (ЦОД)) и программному (системы управления базами данных (СУБД), операционные системы (ОС)) обеспечению диспетчерского управления, представленные в таблице 1. В таблице 1 также представлены требования к диагностике и сертификации аппаратных и программных средств поддержки.

Для оценки эффективности предложенных средств поддержки предлагаются следующие аналитические соотношения.

1) Расчет эффективного трафика обрабатываемых данных

$$\Pi_{эi} = \frac{t}{t_{\text{раб}}} \times V,$$

где  $t$  – общее время работы сети;  $V$  – фиксированная пропускная способность, предоставленная для данного сервиса.

В том случае, когда трафик фиксирован, все задачи используют предоставленную им пропускную способность.

2) Общее среднее время занятия задачами диспетчерского управления находится

$$t = t_{\text{ср}} \times n,$$

где  $t_{\text{ср}}$  – среднее время занятия задачей одной рабочей станции, определенное экспериментальным путем;  $n$  – количество компьютеров (рабочих станций) в системе поддержки принятия решений.

Полученные значения суммируются для определения общего сетевого трафика

$$\Pi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Pi_{эi}.$$

Величина общего сетевого трафика  $\Pi_{\Sigma}$  корректируется коэффициентом служебного, широковещательного и неучтенного трафика и коэффициентом запаса

$$\Pi = \Pi_{\Sigma} \times k_{\text{ст}} \times k_{\text{з}},$$

где  $K_{\text{ст}} = (1.05 \div 1.07)$  – коэффициент служебного, широковещательного неучтенного трафика;  $K_{\text{з}} = (1.2 \div 2.0)$  – коэффициент запаса, необходимый для учета будущего развития сети.

По полученному значению  $\Pi$  уточняется выбранная структура программных и аппаратных средств таким образом, чтоб вычисляемый коэффициент использования сетевой инфраструктуры был не более  $(0,3 \div 0,6)$ .

$$k_{\text{исп}} = \frac{\Pi}{\Pi_{\text{ном}}},$$

где  $k_{\text{исп}}$  – коэффициент использования сетевой инфраструктуры;  $\Pi_{\text{ном}}$  – номинальная пропускная способность сетевой технологии (например, 1000 Мбит/с)

Если необходимо, уменьшается среднее время работы одной или нескольких задач. Допускается увеличение общего времени работы серверов за



счет ночного времени.

### **Выводы**

Аппаратно-программные средства поддержки облачных технологий реализуют структуру системы диспетчерского управления в сложных и неопределенных условиях. Предложенные аналитические соотношения для оценки эффективности средств поддержки служат для определения эффективного трафика обрабатываемых системой поддержки принятия решений данных, общего времени занятия системы задачами диспетчерского управления, общего сетевого трафика с учетом коэффициентов служебного, широковещательного и неучтенного трафика и коэффициентом запаса.

### *Литература*

1. Айтуг Х. Выполнение графиков производства в условиях неопределенности: обзор и некоторые будущие направления // Европейский журнал исследований операций. 2005. № 161 (1). С. 86-110.
2. Визел В.В., Нос Д.М., Кегара Д. Выделение функций для человека и алгоритмы в планировании // Поведенческие операции в планировании. 2011. № 16 (4). С. 339-370.
3. Иверт Л.К. Особенности цеха, влияющие на использование современных систем планирования и диспетчеризации // Планирование производства и контроль. 2012. № 23 (6). С. 452-467.
4. Маккей К.Н., Ваерс В.С. Интегрированная поддержка принятия решений для планирования, и диспетчеризации задач на целевом предприятии // Компьютеры в промышленности. 2003. № 50 (1). С. 5-14.
5. Угарте Б.С., Артиба А., Пеллерен Р. Система управления производством – обзор литературы // Планирование и управление производством. 2009. № 20 (6). С. 525-539.
6. Фраминан Дж. М. Руководство по развертыванию и внедрению систем планирования производства // Международный журнал производственных исследований. 2012. № 50 (7). С. 1799-1812.
7. Хволби Х.Х., Стегер-Йенсен К. Технические и производственные проблемы систем расширенного планирования // Компьютеры в промышленности. 2010. № 61 (9). С. 845-851.
8. Корпоративные информационные системы: учебное пособие / П. В. Бураков // СПб: НИУ ИТМО. 2014. 96 с.
9. Артющенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / Под научной редакцией А.Б. Семенова // Москва. 2019. 232 с.

УДК [004.415.2]:378.14

## **Информационные технологии автоматизации профессиональных образовательных программ**

**В.И. Воловач**, доктор технических наук, доктор заведующий кафедрой «Информационный и электронный сервис»,

**Т.С. Яницкая**, кандидат технических наук, доцент доцент кафедры «Информационный и электронный сервис»,

**В.В. Иванов**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационный и электронный сервис»,

**А.С. Васильева**, старший преподаватель кафедры «Информационный и электронный сервис»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, Поволжский государственный университет сервиса, г. Тольятти

*Рассмотрен процесс разработки учебно-методических материалов при формировании или обновлении основной профессиональной образовательной программы. Произведенный анализ предметной области позволил разработать прототип информационной системы. На примере формирования рабочих учебных программ показаны основные этапы разработки приложения, определены технологии разработки информационной системы.*

Веб-приложение, клиентская часть, фреймворк, серверная часть, рабочая учебная программа (РУП), учебное пособие, учебные методические материалы, ФГОС ВО 3+, образовательная программа.

## **Information technologies for automation of professional educational programs**

**V.I. Volovach**, doctor of technical Sciences, professor, head of the department «Information and electronic service»,

**T.S. Ianitckaia**, candidate of technical sciences, associate professor, research professor of the department «Information and electronic service»,

**V.V. Ivanov**, doctor of technical sciences, professor, professor of the department «Information and electronic service»,

**A.S. Vasileva**, assistant lecturer the department «Information and electronic service», Federal state budgetary educational institution higher education Volga State University of Service, Togliatty

*The process of developing educational methodological materials in the formation or updating of the main professional educational program is considered. The analysis of the subject area made it possible to develop a prototype of the information system. Using the example of the formation of working curricula, the main stages of application development are shown, technologies for the development of an information system are determined.*

Web application, client part, framework, server part, working curriculum (RUE), study guide, teaching materials, FGOS 3++, educational program.

**Введение.** Образовательные организации во всем мире испытывают все большую необходимость использования новых информационных и коммуникационных технологий. Автоматизация позволяет быстро и качественно выполнять многие процессы, при этом возрастает качество ведения и обслуживания автоматизируемого процесса, скорость обработки информации, получения отчетных данных.

В условиях постоянного улучшения подготовки будущих специалистов появилась необходимость внедрять в учебный процесс федеральные государственные стандарты нового поколения (ФГОС 3++) [1, 2]. Федеральные государственные стандарты разрабатываются государством и представляют собой совокупность требований к основным профессиональным образовательным программам (ОПОП). ФГАУ «Федеральный институт развития образования» в рамках Государственного задания Минобрнауки России разработал концепцию ФГОС СПО четвертого поколения. Таким образом, образовательные программы требуют переработки, актуализации, вместе с образовательными программами претерпевают изменения учебные планы, рабочие учебные программы дисциплин, программы практик, программы государственной итоговой аттестации (ГИА), пособия по выполнению лабораторных (практических) работ, пособия по курсовому проектированию, учебные методические пособия, оценочные средства, компетентностные модели, матрицы компетенций и другие документы. Появляются требования к используемой в дисциплинах литературе, к программному обеспечению, к оснащению аудиторий... Это приводит к увеличению нагрузки на профессорско-преподавательский состав, специалистов различных подразделений ВУЗа, увеличивается объем и усложняется документооборот.

**Постановка задачи автоматизации.** Автоматизация процесса формирования и актуализации ОПОП, учебно-методических материалов является актуальной задачей [2]. Изучив рынок программного обеспечения, можно видеть программное обеспечение, автоматизирующее управленческую деятельность ВУЗа. Так разработана и успешно внедряется система 1С:Университет. При этом программного продукта именно по автоматизации процесса, связанного с формированием учебно-методических материалов и ОПОП нет. Авторами предлагается разработать программный продукт для указанной выше цели.

На первом этапе было проведено изучение и моделирование процессов предметной области. Работа начинается с того, что на основании ФГОС формируется ОПОП, в состав которой включаются документы, регламентирующие содержание и организацию образовательного процесса (учебный план, календарный учебный график, рабочие программы дисциплин (модулей), программы практик, в том числе научно-исследовательской работы, программы итоговой аттестации (ГИА), включая все оценочные и методические материалы).

В ФГБОУ ВО «ПВГУС» работа по формированию и сопровождению ОПОП может быть представлена следующими шагами:

- Учебно-методический отдел совместно с научным работником, заве-

дующим кафедрой разрабатывает учебный план направления подготовки.

- Научный работник разрабатывает описательную часть образовательной программы (ОП). В описательной части ОП приводится перечень компетенций, указывается связь компетенций с выбранными профессиональными стандартами, обобщенными трудовыми функциями (ОТФ), трудовыми функциями (ТФ), а также знания, умения и практический опыт по каждой компетенции.

- Научный работник формирует матрицу компетенций. В документе описываются компетенции, их характеристики (знания, умения, практический опыт), индикаторы достижения компетенции, связь компетенции с профессиональными стандартами.

- Научный работник формирует матрицу компетенций. Где зафиксировано, какие компетенции должны формироваться в каждой дисциплине учебного плана.

- Учебно-методический отдел формирует задание профессорско-преподавательскому составу на разработку или актуализацию учебно-методических материалов.

После того как на кафедру ВУЗа поступает план разработки или актуализации учебно-методических материалов, преподаватели по представленному шаблону разрабатывают материалы и передают на проверку и утверждение в различные подразделения: специалист отдела по информатизации проверяет соответствие программного обеспечения лицензионным требованиям, специалист проверяет наличие литературы, рекомендованной для изучения в дисциплине, даты выпуска литературных источников. Специалист учебно-методического отдела проверяет корректность сформированного материала (часы, семестры, форму контроля, соответствие шаблону и пр.). После всех проверок учебно-методические материалы передаются на утверждение председателю учебно-методического совета, заведующему кафедрой, проректору и др., или возвращаются на доработку преподавателю.

Можно видеть, что автоматизированная система позволит более эффективно работать преподавателям, учебно-методическому отделу. Задача состоит не только в автоматизации процесса подготовки учебно-методических материалов, но и получении оперативной информации об обеспеченности направления подготовки учебно-методическими материалами, получение информации о том, какие учебно-методические материалы планировались для разработки и какие материалы сформированы «по факту» (в разрезе кафедр, по преподавателям, по дисциплинам). Анализ программно-аппаратных средств ВУЗа позволил определить средства разработки и развертывания приложения. Было принято решение разработать web-приложение.

**Технологии реализации проекта.** «Отдел информатизации» ПВГУС предоставил сервер виртуальных машин под управлением Windows Server 2008., была выделена виртуальная машина на данном сервере для разрабатываемой информационной системы. На виртуальной машине установлен веб-сервер на платформе Apache HTTP Server 2.4.38, а также система управления базами данных MySQL 8 [3]. Структура сервера представлена на рисунке 1.

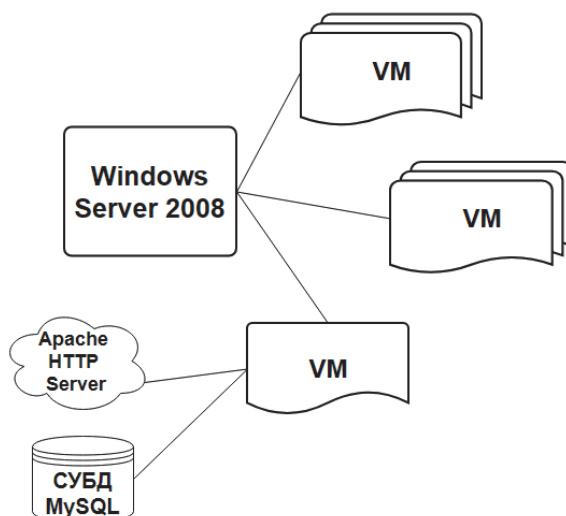


Рисунок 1 – Структура сервера

Планируется, что сначала будет разработан прототип информационной системы, в котором определены минимальные требования: разработка рабочих учебных программ, формирование отчетов по преподавателю (план-факт), формирование отчета по направлению подготовки (обеспеченность направления подготовки учебно-методическими материалами), видимость статуса учебно-методического материала (утвержден, на проверке, на доработке), автоматическая загрузка справочников системы (дисциплины, часы, профессорско-преподавательский состав, данные ФГОС и др.). Система должна стабильно работать и обслуживать до 110 пользователей одновременно. Система должна работать с документами в формате .docx. При разработке системы должны учитываться требования ГОСТов и передовой опыт [4, 5, 6].

Выбранные технологии для клиентской части, а именно CSS-фреймворк Bootstrap и фреймворк jQuery, позволяют обеспечить высокую скорость разработки и облегчить восприятие кода и использования веб-приложения.

Серверным языком программирования был выбран PHP

Также планируется к использованию библиотека PHPWord так как она позволяет структурировать код для описания работы с Microsoft Office документами.

**Построение модели процессов предметной области.** Рассмотрим модель процесса формирования рабочей учебной программы. На процессе выделим группу действий, подлежащих автоматизации. Модель верхнего уровня представлена на рисунке 2.

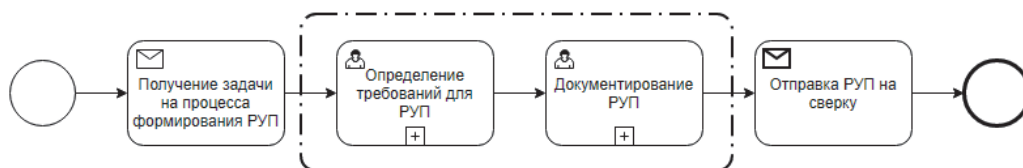


Рисунок 2 – Модель процесс формирования рабочей учебной программы

В модели присутствуют подпроцессы «Определение требований для РУП» и «Документирование РУП».

Модель подпроцесса «Определение требований для РУП» представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Модель процесса определения требований

Модель подпроцесса «Документирование РУП» представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Модель процесса документирования рабочей учебной программы

Выделенные действия на моделях процесса требуют автоматизации, а именно:

- Получение шаблона РУП;
- Проверка требований основной профессиональной образовательной программы (ОПОП);
- Проверка актуальности ФГОС;
- Проверка актуальности профессиональных стандартов;
- Заполнение predetermined parameters;
- Сверка по матрице компетенций;
- Заполнение приложения в рабочей учебной программы.

При разработке автоматизированной системы необходимо учитывать зависимости федеральных стандартов, профессиональных стандартов и внутривузовских требований. Модель взаимосвязи для ФГОС 3++ представлена на рисунке 4. Модель позволяет видеть процесс формирования описательной части образовательной программы.

Для каждого направления подготовки (специальности) существует федеральный государственный образовательный стандарт.

ФГОС содержит список компетенций. Как указано в аннотации к данным «Компетенции», ФГОС определяет универсальные (УК) и общепрофессиональные (ОПК) компетенции.

ФГОС определяет список профессиональных стандартов. Данный список указан в самом стандарте.

Профессиональные стандарты определяет список обобщенных трудовых (ОТФ) и трудовых (ТФ) функций.

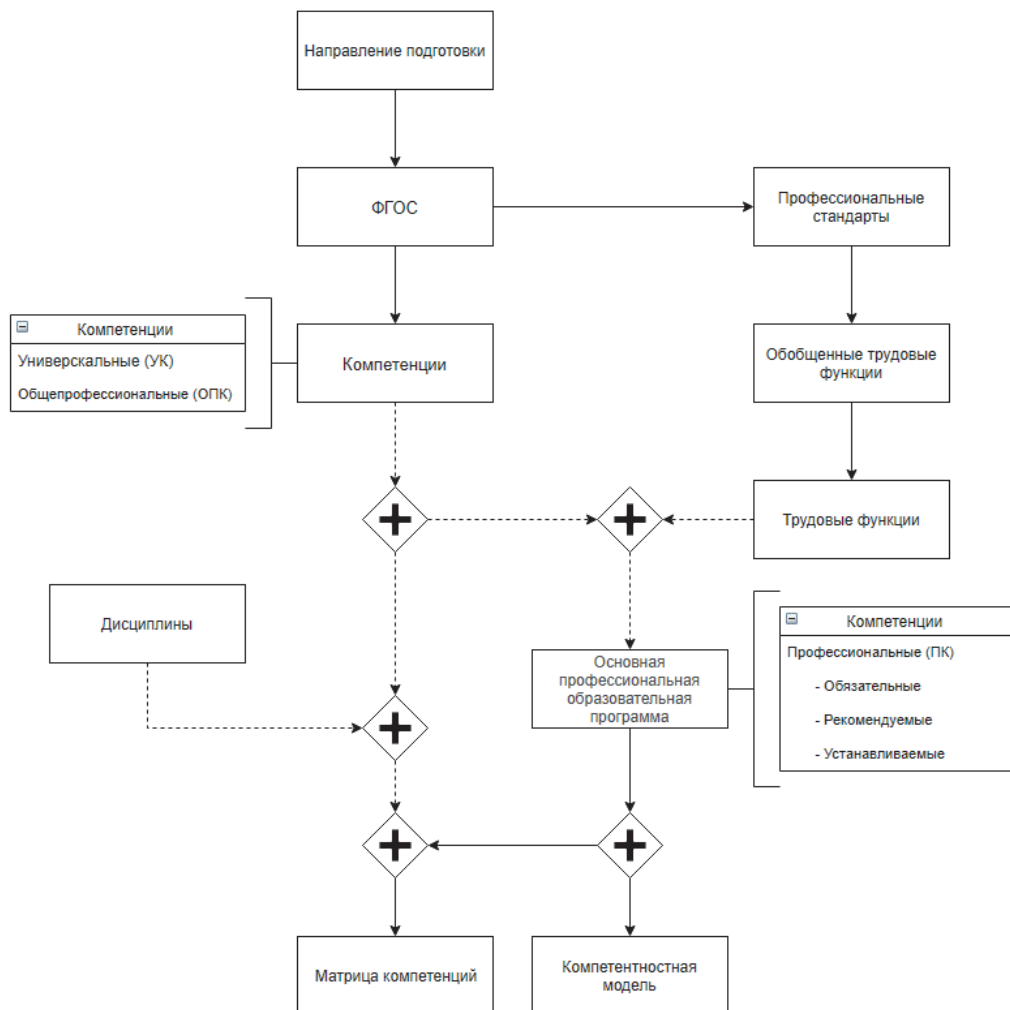



Рисунок 4 – Модель зависимости стандартов требований ВУЗа

Элемент  – это параллельный шлюз. В спецификации BPMN используются для синхронизации (объединения) и создания параллельных маршрутов.

Основная профессиональная образовательная программа строится на основании профессионального стандарта, ОТФ, ТФ и компетенций. В ОПОП определяются профессиональные компетенции, которые могут быть обязательными, рекомендуемыми и устанавливаемыми.

Заключительными документами в основной профессиональной образовательной программы являются «Матрица компетенций» и «Компетентностная модель».

**Разработка структуры базы данных.** Рассмотрим далее процесс разработки структуры базы данных (БД), который включает в себя разработку концептуальной, логической и физической структуры. Для визуального проектирования используется графический клиент MySQL Workbench 8.0 CE (Community

Edition). Программный продукт позволяет генерировать скрипт для создания базы данных в различных версиях СУБД, на различных платформах.

Концептуальная структура представляет собой описание основных сущностей и связей между ними. Концептуальная структура отражает предметную область, в рамках которой планируется разрабатывать структуру базы данных (см. рис.5). Ниже представлено описание некоторых сущностей [7]:

-Учебный план: Составная сущность. Хранение нагрузки в зависимости от дисциплины, семестра и формы обучения.

-Семестры: Хранение списка семестров. Требуется для реализации значения типа список

-Формы обучения: Хранение списка форм обучения. Требуется для реализации значения типа список. Пример: очная, заочная и т.д.

-Формы контроля: Хранение списка форм контроля. Требуется для реализации значения типа список. Пример: зачет, дифференцированный зачет, экзамен и т.д.

-Типы дисциплин: Хранение списка типов дисциплин. Требуется для реализации значения типа список. Пример: базовая, вариативная.

-Модули: Хранение списка модулей, в которые входит дисциплина. Требуется для реализации значения типа список.

-Виды тем: Хранение списка вида тем. Требуется для реализации значения типа список. Пример: лабораторные, практические и т.д.

-Активности: Хранение информации по активностям, определенных для ТФ

-Типы активности (Типы: Владеть, Уметь, Знать): Хранение списка типов активности. Требуется для реализации значения типа список. Используется для компетентностной модели.

-Связи ОПОП: Составная сущность. Хранение пересечений компетенций и ОТФ.

Логическая структура расширяет концептуальную структуру введением в структуру атрибутов. На момент разработки логической структуры могут уточняться типы связей между сущностями, вводиться дополнительные сущности.





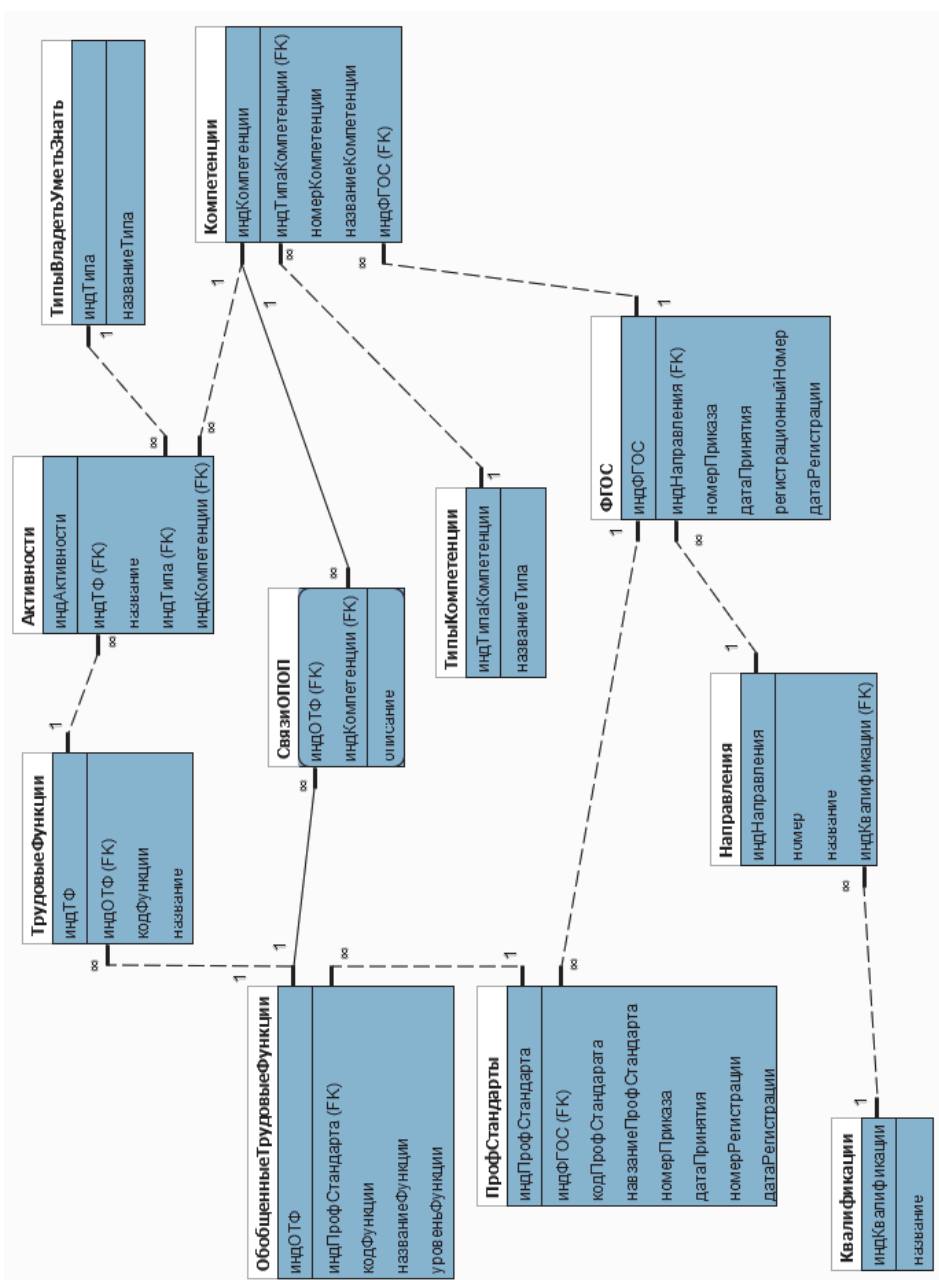


Рисунок 6 – Логическая структура базы данных, модуль «Стандарты»

**Разработка интерфейса.** На основе логической модели была разработана физическая модель данных.

Основу каждого программного продукта составляет хорошо спроектированное меню – информационная архитектура: четкая и понятная структура, иерархия, заголовки. Структура меню представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Структура меню информационной системы

На странице «Работа с данными» пользователю предоставлена возможность внести данные справочного характера. По ссылке «Массовое создание» пользователь может занести данные из предварительно подготовленного файла Excel – перечень дисциплин с часами, перечень преподавателей с учёными званиями и степенями и т.д.

На основе схемы структуры меню разработан интерфейс ИС. Стилизация интерфейса системы полностью соответствует установленному по умолчанию стилю в фреймворке Bootstrap. Разработанный модуль навигационного меню представлено на рисунке 8.

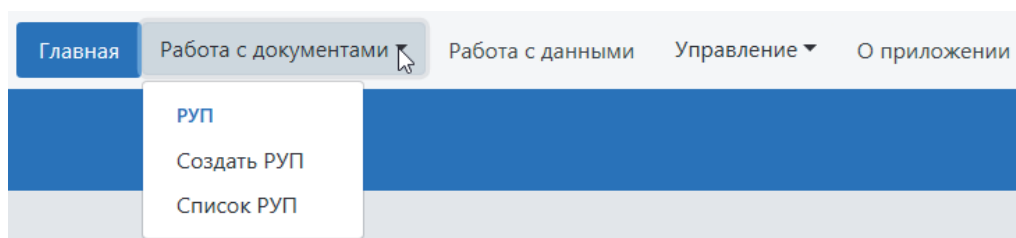


Рисунок 8 – Модуль навигационного меню

Экран страницы «Работа с данными» представлен на рисунке 9. На странице «Работа с документами» реализованы в большей части параметры со списком. Здесь заложена весомая часть разработки, так как для этой страницы были описаны вся логика нахождения связанных параметров. Данная страница исполняет основные функции, написанные на языке сценариев JavaScript.

Согласно схеме взаимодействия пользователя и системы была разработана логика взаимодействия JavaScript, а именно jQuery, и PHP. Данная логика ис-

пользует PHP switch case в отдельном файле PHP.

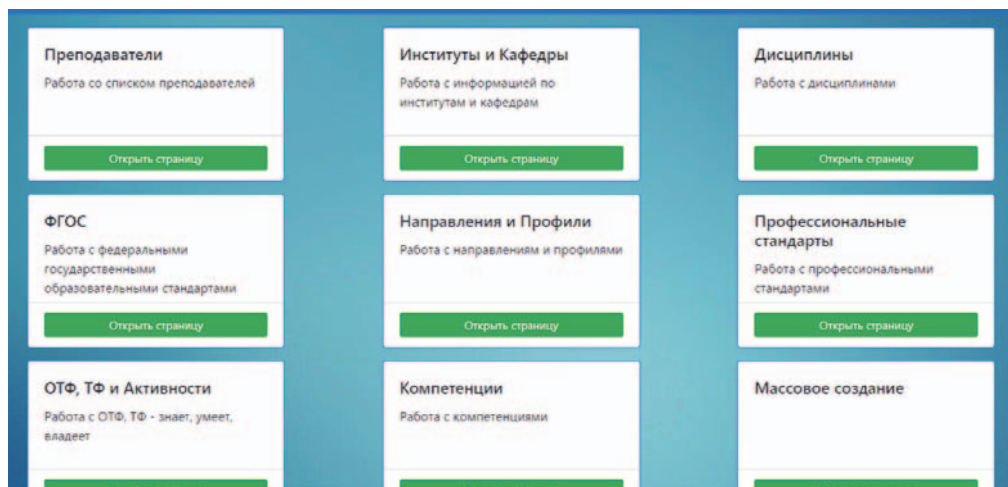


Рисунок 9 – Экран страницы «Работа с данными»

Согласно передаваемым параметрам через jQuery POST, происходит выбор запроса, необходимого для отправки в базу данных для получения связанных параметров.

**Выводы.** Таким образом, рассмотрено решение актуальной проблемы разработки методологических основ, моделей, методов и информационной технологии, позволяющих сформировать рациональный вариант описания архитектуры создаваемой информационной системы, проведено моделирование и разработка прототипа информационной системы. Тестовая эксплуатация позволила увидеть проблемы, связанные с хранением разработанных материалов, с формированием шаблонов, сопровождением информационной системы. В дальнейшем, после определения недостатков и положительных сторон прототипа созданной системы, и подготовки технической базы планируется использовать стек технологий:

- база данных Maria DB;
- front-end: React, Redux;
- back-end: Node.js, Rabbit MQ;
- FTP (File Transfer Protocol) сервер;
- веб-сервер и почтовый прокси-сервер Nginx.

Приложение планируется разрабатывать на основе микро-сервисной архитектуры. Это позволит добавлять необходимые модули без переработки больших объемов программного кода и логики работы приложения.

#### Литература

1. Методические рекомендации по разработке основных профессиональных образовательных программ и дополнительных профессиональных программ с учетом соответствующих профессиональных стандартов [Электронный ресурс]. URL: [http:// fgosvo.ru/uploadfiles/metod/DL1\\_05\\_2015.pdf](http://fgosvo.ru/uploadfiles/metod/DL1_05_2015.pdf).

2. Реестр профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://profstandart.rosmintrud.ru/obshchiy-informatsionnyy-blok/natsionalnyyreestr-professionalnykh-standartov/reestrprofessionalnykh-standartov/index.php>.
3. Воловач В.И., Иванов В.В., Будилов В.Н., Яницкая Т.С. Настройки файлового сервера виртуального контроллера домена ИТ-инфраструктуры // Современные информационные технологии. Сборник трудов по материалам 5-й всероссийской научно-технической конференции: Москва. 2019. С.167-171.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010. Информационная технология. Процессы жизненного цикла программных средств. Введ. 01.03.2011 // Москва: Стандартинформ. 2011. 104 с.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 14764-2002. Сопровождение программных средств. Введ. 01.07.2003 // Москва: Издательство стандартов. 2002. 32 с.
6. ISO/IEC TR 19759-2015 Software Engineering -- Guide to the software engineering body of knowledge (SWEBOOK) – Second Edition [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iso.org/standard/67604.html>.
7. Яницкая Т.С., Ставинский Д.А. Разработка программного продукта для поддержки создания учебно-методического комплекса, Информационные технологии // Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2016. № 6-2. С. 380-385.

УДК 004.942

**Анализ результатов применения телемедицинских услуг  
в Новосибирской области**

**Е.Е. Истратова**, кандидат технических наук, доцент кафедры  
автоматизированных систем управления,

**В.А. Астапчук**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
автоматизированных систем управления,

Новосибирский государственный технический университет (НГТУ),  
г. Новосибирск

*В статье приведены результаты исследования динамики применения телемедицины на базе государственных лечебно-профилактических учреждений Новосибирска и Новосибирской области в период с 2004 по 2019 годы. Для оценки экономической эффективности оказания телемедицинских услуг был использован системный подход, основанный на сопоставлении стоимости, качества и объемов телемедицинских услуг с экономическим эффектом, получаемым в результате. В ходе исследования была построена множественная регрессионная модель, которую можно применять для прогнозирования эффективности оказываемых телемедицинских услуг в Новосибирской области.*

Регрессионная модель, телемедицинские консультации, телеобучение, экономическая эффективность.

**Analysis of the telemedical services application results  
in the Novosibirsk region**

**E.E. Istratova**, Ph.D., Associate Professor of the Automated  
Control Systems Department,

**V.A. Astapchuk**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Automated  
Control Systems Department,

Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk

*The article includes the results of the study of the use of telemedicine dynamics on the basis of state medical institutions in Novosibirsk and the Novosibirsk region in the period from 2004 to 2019. To assess the economic efficiency of telemedicine services provision, a systematic approach was used. It was based on a comparison of the cost, quality and volume of telemedicine services with the economic effect obtained as a result. During the study, a multiple regression model was constructed that can be used to predict the telemedicine services effectiveness provided in the Novosibirsk Region.*

Regression model, telemedicine consultations, tele-training, economic efficiency.

Актуальность применения телемедицины в России объясняется спецификой отечественной системы здравоохранения, для которой характерна неравно-

мерность распределения материально-технического оснащения и высококвалифицированных медицинских кадров. Данный дисбаланс отчетливо виден при сравнении уровня развития медицины в центральных и отдаленных регионах. Подобная ситуация приводит к необходимости установления тесных связей между центром и периферией. В настоящее время данный вопрос решается в основном за счет применения специального транспорта (санавиации) для транспортировки пациентов в центральные медицинские учреждения, оснащенные необходимым оборудованием и имеющие в штате высококвалифицированных специалистов. Однако этот вариант не является единственно возможным [4].

Достаточно перспективным направлением в медицине является использование телемедицины, как удаленного средства оказания медицинской помощи. Помимо снижения расходов на транспортировку пациентов, средства и методы телемедицины позволяют улучшить качество оказываемых услуг, в том числе посредством увеличения их ассортимента. В качестве примеров областей, в которых может быть использован инструментарий телемедицины, можно выделить следующие: кардиохирургия, дерматология, радиология, психиатрия, чрезвычайная и экстренная медицинская помощь, дерматология [3].

Несмотря на достаточно широкий спектр применения телемедицинских услуг и технологий, существует ряд проблем. В источнике [5] указаны основные узкие места, связанные как с внедрением, так и с эксплуатацией информационных систем в медицине, а также приведены доводы в пользу применения системного подхода, необходимого для предварительного анализа и оптимизации бизнес-процессов, и для дальнейшей разработки и адаптации информационной системы к использованию в медицинском учреждении. Причем, согласно проведенным исследованиям авторов [8], наиболее существенным препятствием развития отечественной телемедицины является именно отсутствие продуманной системы образования специалистов, как организующих, так и непосредственно осуществляющих телеконсультирование.

В литературных источниках [6,7] предложен принципиально новый подход к защите персональных данных за счет применения инструментария телемедицинской системы и доказана его эффективность. Используемые в настоящее время методы оценки эффективности телемедицины были проанализированы и разделены на классы в исследовании [2]. В источнике [4] предложена совокупность критериев оценки эффекта от телемедицинской деятельности, а также приведен алгоритм ее оценки и планирования. Таким образом, с практической точки зрения интерес представляет анализ опыта применения телемедицинских технологий и оценка их эффективности, в том числе на региональном уровне.

Целью работы было изучение динамики практического использования телемедицинских технологий и услуг на базе лечебно-профилактических учреждений Новосибирска и Новосибирской области. Всего в исследовании было изучено 56 лечебно-профилактических учреждений.

Для реализации указанной цели были выполнены задачи по сбору и обработке данных, разработке на их основе регрессионной модели и прогнозированию динамики изменений телемедицинских услуг в Новосибирской области.

Согласно ряду литературных источников [1,2,8], для обеспечения прав населения на качественное медицинское обслуживание необходима реализация

целого ряда комплексных мероприятий. В настоящее время активно решаются вопросы, связанные с финансированием и оснащением медицинских учреждений различными материальными ресурсами, но, несмотря на это, до сих пор остро стоит вопрос о повышении квалификации кадрового состава. Решением данной задачи является активная эксплуатация телемедицинских технологий лечебными учреждениями, что особенно актуально в условиях неравномерного распределения медицинских материальных и кадровых ресурсов, а также населения относительно достаточно большой территории области. В данных условиях применение телемедицинских технологий и услуг позволит не только взглянуть по-новому на процессы интенсификации управления на разных уровнях, но и на реорганизацию системы здравоохранения в целом [3].

Кроме этого, обучение медицинских работников дистанционно на основе различных информационных систем и телемедицинских комплексов дает возможность не только повысить их квалификацию в краткосрочной перспективе, но и ускорить внедрение новых медицинских технологий в дальнейшем. В результате, в будущем это позволит привлечь уже обученных высококвалифицированных медицинских специалистов без отрыва от основной работы к преподавательской деятельности.

Проект по реализации телемедицинской помощи населению области в лечебно-профилактических учреждениях стартовал в 2004 году и продолжается в настоящее время. Его целями были оказание оперативной и качественной медицинской помощи населению, а также создание единой сети на основе телемедицинских технологий, объединяющей ведущие отечественные медицинские и научные центры. В качестве основных направлений реализации проекта были выбраны телемедицинские консультации и телеобучение. Принципиальным отличием данных направлений является то, что первое из них представляет собой консультации пациентов, осуществляющиеся за счет передачи всей необходимой медицинской информации по специально оборудованным и защищенным каналам связи, а второе направление – проведение медицинских видеосеминаров, лекций, конференций с использованием телекоммуникационного оборудования для медицинских работников.

В результате реализации проекта была создана телемедицинская сеть, спроектированная на базе мировых медицинских стандартов и основанная на применении новейших достижений в области телекоммуникаций, информационных технологий и медицины. За время работы данного проекта были разработаны 28 обучающих курсов, проведены 380 телемедицинских консультаций. Количество медицинских работников, прошедших курсы повышения квалификации (телеобучение), за данный период составило 345 человек.

На сегодняшний день специалисты лечебно-профилактических учреждений Новосибирской области участвуют в проведении как отечественных, так и международных рандомизированных исследований, способствуют развитию медицинской помощи по восстановительной медицине, неврологии, эфферентной хирургии, гемодиализу и экстракорпоральной гемокоррекции, выполняют ряд реконструктивно-пластических операций по уроандрологии, гинекологии и колопроктологии с применением инновационных лапароскопических, эндоскопи-



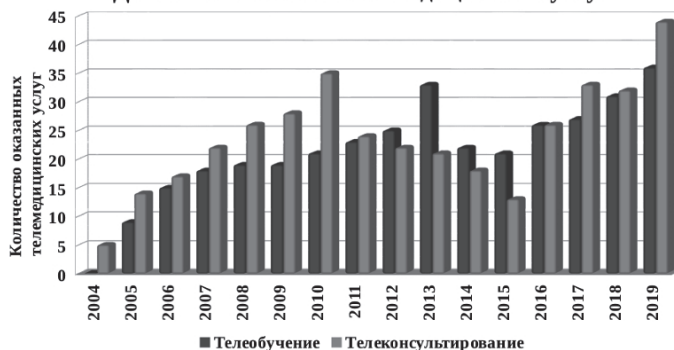
ческих и телемедицинских технологий. Все консультации осуществляются докторами медицинских наук, профессорами.

На рисунке 1 представлены данные по структуре телемедицинских услуг и динамике их изменения в период с 2004 по 2019 годы. Как видно из круговой диаграммы (рис. 1а), в структуре оказанных телемедицинских услуг преобладали телемедицинские консультации, доля которых составила 52%. На гистограмме (рис. 1б) отмечается рост количества разработанных обучающих курсов, числа проведенных телемедицинских консультаций и количества медицинских работников, прошедших курсы повышения квалификации (телеобучение), что в целом свидетельствует о востребованности проекта.

а) Структура оказанных телемедицинских услуг



б) Динамика оказания телемедицинских услуг



**Рисунок 1 – Структура (1а) и динамика оказания телемедицинских услуг (1б) в Новосибирской области в период с 2004 по 2019 годы**

В ходе проведения исследования было установлено, что телемедицинские технологии и услуги дают возможность значительно увеличить эффективность как лечения, так и диагностики заболеваний, подняв ее на качественно новый уровень. Например, при помощи инструментария телемедицины появляется возможность оказания высококвалифицированной медицинской помощи удаленному больному при постановке диагноза за счет изучения и анализа данных, полученных посредством электронной почты или глобальной сети Интернет. К таким медицинским данным могут быть отнесены: данные лабораторных, либо инструментальных исследований, томограммы, изображения рентгеновских снимков, электроэнцефалограммы, компьютерные электрокардиограммы.

Использованная в исследовании телемедицинская система обладает рядом возможностей. Так, при проведении телемедицинских консультаций осуще-

ствляются процессы по захвату видео с подключенных медицинских приборов, обмену дополнительной медицинской информацией между специалистами различных направлений, организации видеоконференцсвязи в случае необходимости, фиксации всех этапов проведения телемедицинской консультации с отправкой уведомлений по электронной почте и посредством СМС-сообщений, а также по автоматическому формированию аналитических отчетов. Структура информационной системы для проведения телеконсультаций приведена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структура телемедицинской системы

Процесс телеконсультирования в данной системе осуществляется следующим образом. Инициатором является медицинский работник, которому требуется телеконсультация. Для запуска процесса необходимо через браузер или специальное клиентское приложение, установленное на автоматизированном рабочем месте, предварительно собрав все необходимые данные о пациенте, выбрать специалиста соответствующего профиля из предложенного списка врачей. Далее требуется сформировать запрос на проведение телеконсультации, заполнив все необходимые поля и прикрепив к нему данные о пациенте. В качестве типов данных могут быть использованы текстовые, графические, аудио или видео файлы, а также их комбинации, содержащие информацию по истории болезни пациента, а также комментарии и вопросы врача, обращающегося за консультацией. Готовый запрос автоматически сохраняется на сервере в единой базе данных. Обработка запроса заключается в рассылке информации по выбранным врачам-специалистам.

Получив запрос на проведение телеконсультации, врач-специалист изучает информацию и формирует файл-заключение. Если консультанту требуются дополнительные сведения или необходима консультация специалиста другого профиля, он может сформировать соответствующий запрос. История всех запро-

сов и отправленных заключений автоматически сохраняется на сервере. Медицинский работник, обратившийся за консультацией, в личном кабинете может увидеть полный маршрут перемещения и результаты его обработки в режиме реального времени. После получения готового заключения одного или нескольких специалистов, врач может сформировать новый запрос уже на другого пациента, либо продолжить консультацию.

В системе фиксируются количество запросов к конкретному специалисту, количество полученных от него ответов, а также оценка удовлетворенности, выставляемая врачом, обратившимся за консультацией. Перечень врачей-специалистов корректируется администратором системы.

Результативными показателями в исследовании являлись качественные и количественные критерии, позволившие комплексно оценить результаты применения телемедицинских услуг в Новосибирской области. К количественным относится число оказанных телемедицинских услуг, включающее количество обученных медицинских работников и пациентов, для которых были проведены телемедицинские консультации. В целом темп роста оказанных телемедицинских услуг составил 1600% за анализируемый период с 2004 по 2019 годы.

Для оценки качественной составляющей, то есть для определения экономической эффективности оказания телемедицинских услуг был использован системный подход, основанный на сопоставлении стоимости, качества и объемов телемедицинских услуг с экономическим эффектом, получаемым в результате. На основе данных критериев был рассчитан комплексный коэффициент эффективности оказания телемедицинских услуг  $K_i$ . Расчет коэффициента производится по формуле:

$$K_i = K_c * K_k * K_z \quad (1)$$

где  $K_c$  – отношение запланированной прибыли к фактически полученной в результате оказания телемедицинских услуг;

$K_z$  – отношение запланированных затрат на оказание телемедицинских услуг к фактическим;

$K_k$  – отношение количества телемедицинских услуг удовлетворительного качества, получаемого на основе оценки степени удовлетворенности потребителя, к общему количеству оказанных услуг.

Комплексные коэффициенты эффективности были рассчитаны для каждого года анализируемого периода и использованы для анализа динамики применения телемедицинских услуг в Новосибирской области.

В ходе исследования была изучена зависимость между двумя основными составляющими телемедицинских услуг: телеобучением и телемедицинскими консультациями. Кроме того, была проанализирована зависимость между количеством разработанных курсов и количеством обученных с их помощью медицинских работников. Количественные характеристики исследования были сопоставлены с качественными. Полученные в результате коэффициенты корреляции были представлены в виде матрицы (табл. 1).

Таблица 1 — Матрица парных коэффициентов корреляции

	Y	X1	X2	X3
Y				
X1	0,737			
X2	0,601	0,647		
X3	0,862	0,746	0,621	

где Y – эффективность телемедицинских услуг;  
X<sub>1</sub> – количество телеконсультаций;  
X<sub>2</sub> – количество телемедицинских курсов;  
X<sub>3</sub> – количество медицинских работников, прошедших телемедицинские курсы повышения квалификации.

Согласно результатам исследования, все указанные критерии могут быть включены в множественную регрессионную модель, так как количественно измеримы, не являются мультиколлинеарными и связаны друг с другом, что подтверждают коэффициенты парной корреляции. В узлах исследуемой матрицы расположены парные коэффициенты корреляции, которые характеризуют связи и зависимости между факторными признаками. При дальнейшем анализе данных коэффициентов было установлено, что увеличение их абсолютных величин оказывает значительное влияние соответствующих факторных признаков на результативный. Это позволило разработать множественную регрессионную модель и выполнить многофакторный прогноз результативного признака. Полученное уравнение множественной регрессии имеет вид (2):

$$Y = 0,5623 + 0,0083 * X_1 + 0,0109 * X_2 + 0,0325 * X_3 \quad (2)$$

Для уравнения множественной регрессии была произведена оценка значимости уравнения и его коэффициентов, проведено исследование абсолютных и относительных ошибок аппроксимации. Коэффициент детерминации составил  $R^2 = 0,942 = 0,88$ , что свидетельствует о высокой точности подбора уравнения регрессии. В ходе проверки гипотез относительно коэффициентов уравнения регрессии были найдены стандартные ошибки коэффициентов регрессии, на основании которых была подтверждена их статистическая значимость. Расчетный критерий Фишера составил 29,3 по сравнению с табличным 3,24. Так как величина расчетного больше величины табличного критерия, то коэффициент детерминации можно считать статистически значимым. Это подтверждает, что уравнение регрессии статистически надежно и может быть использовано для прогнозирования изменения динамики телемедицинских услуг в Новосибирской области.

Так как, полученная в ходе исследования, множественная регрессионная модель достаточно точно передает фактически существующие взаимосвязи между всеми исследуемыми показателями, то ее можно использовать для прогнози-

рования результативного показателя, то есть эффективности оказываемых телемедицинских услуг в Новосибирской области.

*Литература*

1. Винокурова М.А. Телемедицина: баланс безопасности и эффективности // Вестник ННГУ. 2018. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/telemeditsina-balans-bezopasnosti-i-effektivnosti> (дата обращения: 16.07.2020).
2. Владимировский А.В., Дорохова Е.Т. Методы исследования эффективности телемедицины // Врач и информационные технологии. 2005. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-issledovaniya-effektivnosti-telemeditsiny-predvaritelnoe-soobschenie> (дата обращения: 16.07.2020).
3. Гусев А.В., Плисс М.А. Основные рекомендации к созданию и развитию информационных систем в здравоохранении на базе искусственного интеллекта // Врач и информационные технологии. 2018. № 3. С. 45-60.
4. Исаев Т.М. Методы оценки экономической эффективности телемедицины // Вопросы экономики и права. 2012. № 7 [Электронный ресурс]. URL: [https://law-journal.ru/files/pdf/201207/201207\\_77.pdf](https://law-journal.ru/files/pdf/201207/201207_77.pdf) (дата обращения: 16.07.2020).
5. Истратова Е.Е., Ласточкин П.В. Особенности внедрения медицинских информационных систем в учреждениях здравоохранения // Медицина и образование в Сибири. 2014. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22955485> (дата обращения: 16.07.2020).
6. Купеева И.А., Разнатовский К.И., Раводин Р.А., Карелин В.В., Буре В.М., Гусаров М.В. Оценка эффективности интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений // Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2016. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-intellektualnoy-sistemy-podderzhki-prinyatiya-vrachebnyh-resheniy> (дата обращения: 16.07.2020).
7. Купеева И.А., Раводин Р.А., Ефремов А.А., Ефремова А.А. Телемедицинские системы и защита персональных данных // Врач и информационные технологии. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/telemeditsinskie-sistemy-i-zaschita-personalnyh-dannyh> (дата обращения: 16.07.2020).
8. Максимов И.Б., Диашев А.Н., Синопальников В.И., Семикин Г.И., Лукьянов П.А., Пономарев А.А., Овакимян Г.С. История, анализ состояния и перспективы развития телемедицины // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2018. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://jtelemed.ru/article/istorija-analiz-sostojaniya-i-perspektivy-razvitiya-telemediciny> (дата обращения: 16.07.2020).

УДК 05.13.00

## Повышение отказоустойчивости высоконагруженных систем

**В.А. Рудометкин**, аспирант, эксперт в разработке программного обеспечения,  
ООО СТРИМ, г. Москва

*В настоящее время большинство сервисов переходят в онлайн, что позволяет пользователям получать услугу в любое время. Высокая доступность услуги приводит к росту количества пользователей, что влечет за собой повышение нагрузки на систему, поэтому необходимо уделить особое внимание отказоустойчивости системы перед началом ее разработки. Рассматриваются основные проблемы высоконагруженных систем, способ оптимизации приложения путем распараллеливания задач по ядрам процессора. В данной статье описывается необходимость перехода на микросервисную архитектуру, ее недостатки и способы их устранения. В процессе решения проблем масштабирования, затрагиваются проблемы распределенных транзакций и долгого ответа от сервера.*

Высоконагруженная система; проектирование; микросервисная архитектура; распределенные транзакции; масштабирование в микросервисной архитектуре.

## Increasing the resiliency of highly loaded systems

**V.A. Rudometkin**, postgraduate student, expert in software development,  
LLC STREAM, Moscow

*Nowadays, most of the services are moving online, which allows users to receive the service at any time. The high availability of the service leads to an increase in the number of users, which entails an increase in the load on the system, therefore, it is necessary to pay special attention to the fault tolerance of the system before starting its development. The main problems of high-load systems, a way to optimize an application by parallelizing tasks across processor cores are considered. This article describes the need to migrate to a microservice architecture, its weaknesses, and how to fix them. In the process of solving scaling problems, the problems of distributed transactions and long response from the server are addressed.*

Highly loaded system; design; microservice architecture; distributed transactions; scaling in microservice architecture.

В настоящее время онлайн сервисы становятся все популярнее, захватывая новые сегменты рынка, которые ранее казались доступны только при личном посещении места, например, продуктовый магазин, автосалон или покупка недвижимости. Количество пользователей этих сервисов растет ежедневно, позволяя компаниям экономить на персонале и хранении товара, а клиент получает ту же услугу, но дешевле. Такой формат работы добавляет сложности в организацию интернет – ресурса, такие как привлечение клиента и захват нового сегмента

рынка, сохранение пользовательских данных, прогнозирования роста активных пользователей системы, правильность организации технической составляющей проекта.

Рост количества пользователей напрямую влияет на нагрузку и скорость работы системы, поэтому важно уделить достаточно времени для проектирования приложения. Основные проблемы, которые могут появиться вследствие неправильно спроектированной системы, являются – неоптимальное использование серверных ресурсов, что приводит к большему затрату средств на содержание приложения, неправильно спроектированной архитектуре, вследствие чего система может работать нестабильно, выбор инструментов реализации приложения, так как в случае неправильно выбранных инструментов разработки приложения будет замедлена и клиент не сможет вовремя получить новый функционал. Все эти проблемы напрямую влияют на пользователя и его желание пользоваться приложением.

Одной из наиболее острых проблем, которую предстоит решать при повышении нагрузки на систему – неоптимальное использование серверных ресурсов, вследствие чего приложение будет работать медленнее, возможны ошибки на уровне серверных ресурсов, что влияет на целостность данных в системе.

Одним из решения проблем оптимизации высоконагруженных систем является распараллеливание процессов по ядрам процессора. Реализация этого подхода описана в статье Смекалкина С. А. «Программные технологии проектирования высоконагруженных систем обработки данных» [2], такое решение плохо масштабируется и недоступно для микросервисной архитектуры, которая необходима для независимого покомпонентного масштабирования и в условиях виртуализации, когда на одном железе могут находиться несколько приложений.

Для решения этой проблемы следует придерживаться разработки микросервисной архитектуры [3], которая позволит независимо друг от друга разрабатывать и масштабировать отдельные компоненты системы. Подход Смекалкина С.А. противоречит этому.

Но микросервисная архитектура так же накладывает дополнительные проблемы, которые следует учесть при проектировании приложения:

1. Масштабирование работает до определенного моментами и не снижает вероятность отказа системы и потери данных, требует большое количество ресурсов.
2. Время ответ от сервера увеличивается, так как для получения тех же данных необходимо обработать большое количество компонентов.
3. Появляются распределенные транзакции, которыми необходимо управлять.

При повышении нагрузки на систему, некоторые компоненты системы не успевают обработать весь входной поток данных и их необходимо масштабировать. В условиях микросервисной архитектуры это довольно простая задачи с технической точки зрения, но масштабирование отдельных компонентов системы приводит к повышению нагрузки на остальную часть системы и так может продолжаться бесконечно. Еще одной проблемой масштабирования – влияние на базу данные. Если нагрузка на базу данных не велика, то могут быть проблемы с обновлением данных в ней – блокировки, поэтому масштабирование сервисов не является решением проблемы низкой скорости обработки входного потока дан-

ных.

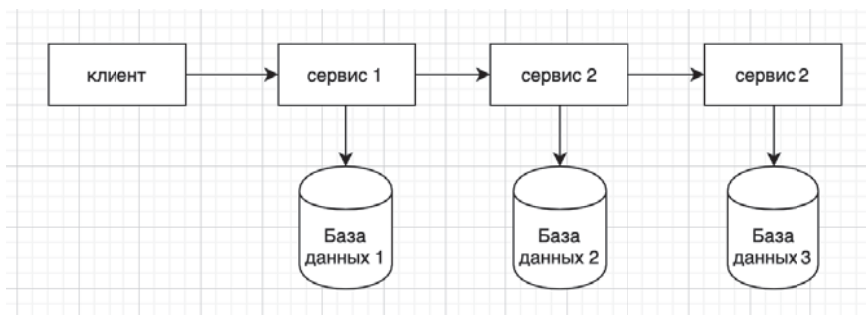
Одним из вариантов решения проблемы масштабирования системы является интеграция серверов очередей, которые позволяют сделать систему асинхронной и скрыть всю обработку данных от пользователя – событийная модель взаимодействия [1].

Для решения проблемы долгого ответа сервера на получение данных является кеширование. Кеширование данных позволяет быстро отдавать ответ клиенту. Это необходимо, когда на серверной стороне приложения выполняется много сложных запросов на получение данных, которые меняются не часто. Такое решение накладывает дополнительные затраты при обновлении кэшированных данных – необходимо продумать стратегию обновления данных.

Еще одним решением долгого ответа от сервера является разделение операций чтения и записи. Для этого необходимо организовать, что бы операции чтения работали через один сервис, который напрямую работает со своей базой данных, а операции записи должны работать через другой сервис, который работает со своей базой данных. Такой подход описан в паттерне CQRS [4].

Основная проблема в данном подходе – согласованность двух баз данных.

Одна из классических архитектур приложения выглядит следующим образом (рис. 1) – на сервер поступает запрос от пользователя, для его обработки необходимо получить информацию от других сервисов, возможно изменить состояния объектов в их базах данных. При большом количестве запросов в любой точке может возникнуть отказ системы, а распределенная транзакция будет прервана, данные в базах данных получатся не консистентными.



**Рисунок 1 – Классическая архитектура микросервисного приложения**

На рисунке 2 представлена рекомендуемая архитектура, которая позволяет сразу отдавать ответ клиенту, но добавляет больше точек отказа.



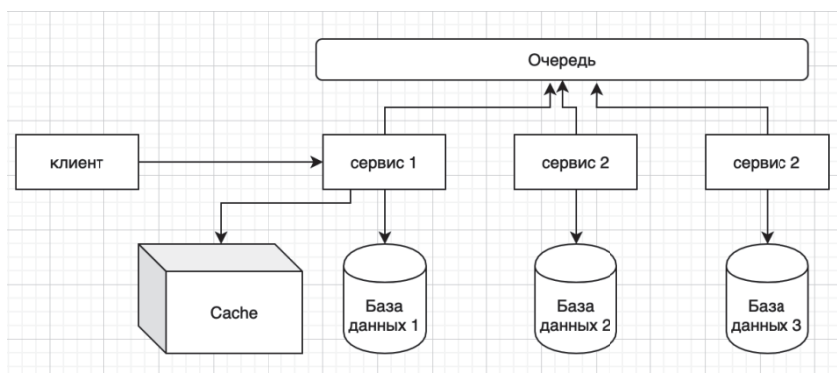


Рисунок 2 – Архитектура с кешированием данных и фасадом [5]

Один из основных преимуществ такой архитектуры – отказоустойчивость. При любой состоянии системы пользователь всегда получит результат, даже если он будет иметь не конечное состояние. Так же такая архитектура позволяет вертикально масштабироваться без угрозы потери целостности данных в системах хранения, пропадают распределенные транзакции и появляется возможность реализации компенсирующих транзакций, которые всегда будут поддерживать данные в целостном виде.

Высокая нагрузка приходится на первый сервис – фасад, который принимает на себя большинство запросов в системе, поэтому в нем должно быть минимум логики, основная его задача – быстро отдать ответ клиенту, поэтому он быстро получает информацию из временного хранилища – кэша, и при необходимости запускает ряд задач по обновлению состояний необходимых объектов. Для этого может быть REST асинхронный вызов или событие на сервер очереди, на которое подписаны другие сервисы.

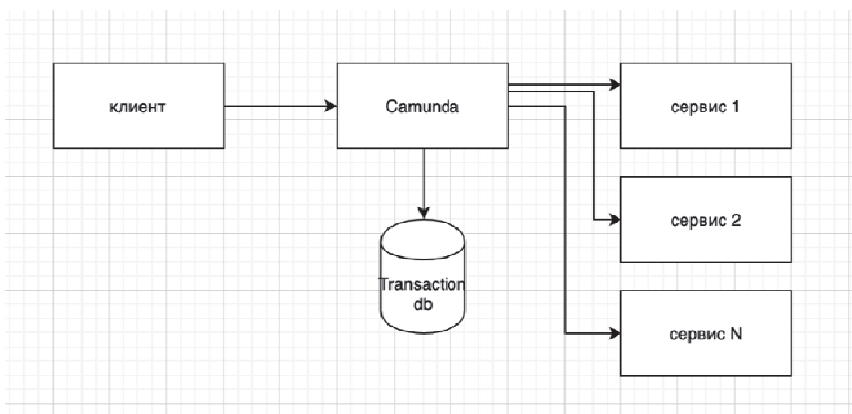
Из-за большого количества сетевых взаимодействий, в микросервисной архитектуре добавляется еще одна проблема – распределенные транзакции. Возможны два варианта их обработки:

- на стороне клиента
- на стороне серверной части

В случае управления распределенными транзакциями на стороне клиента, он должен знать, в каком порядке что необходимо компенсировать.

При управлении распределенными транзакциями на стороне серверной части есть доступ к различным инструментам, например, в случае каких – либо ошибок при обработке данных есть возможность отправлять событие, при получении которого остальные компоненты системы выполняют компенсирующую транзакцию.

Еще одним способом по управлению распределенными транзакциями является добавление управляющего сервиса, который оперирует всей цепочкой процесса. Одним из инструментов, которые реализовывает такое управление процессом, является BPMN [6] Camunda [7].



**Рисунок 2 – Архитектура с применением Camunda**

Одним из преимуществ такой реализации является возможность отслеживать статус текущих задач, контролировать алгоритмы компенсации.

Проблема распределенных транзакций присутствует практически на каждом проекте, и каждый ее решает по-своему. Использование Camunda для текущей проблемы является довольно распространенным подходом. Одним из примеров применения Camunda является Tinkoff Bank [8]. На проекте МТС Поиск [9] так же была использована эта технология для решения проблем распределенных транзакций.

Для уменьшения времени ответа от сервера используется кеширование данных. Одним из примеров применения является проект МТС Поиск. Применение кеширования данных позволило сократить скорость ответа сервера с 20 до 3 секунд.

Правильное использование современных технологий позволяет сократить время ответа сервера, за счет чего пользователь получает услугу за меньшее количество времени, а безотказная система позволяет клиенту всегда получить желаемое. Хорошо спроектированная система позволяет существенно снизить стоимость обслуживания системы и получить максимальную прибыль.

#### *Литература*

1. Пантелеев Е.Р., Игнатъев Е.Б., Архипов А.Л. Объектно-событийная модель интеграции данных в информационных системах муниципального управления // Вестник ИГЭУ. 2011. выпуск 2. С. 1-5.
2. Смекалин Сергей Александрович Программные технологии проектирования высоконагруженных систем обработки данных // Проблемы науки. 2016. № 12 (13). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnye-tehnologii-proektirovaniya-vysokonagruzhennyh-sistem-obrabotki-dannyh> (дата обращения: 25.08.2020).
3. Официальный сайт Микросервисная архитектура [Электронный ресурс]. URL: <https://microservices.io/> (дата обращения 26.08.2020).
4. Официальный сайт Микросервисная архитектура, паттерн CQRS [Электронный ресурс]. URL: <https://microservices.io/patterns/data/cqrs.html> (дата обращения 27.08.2020).

5. Habr.ru блог издательства «Издательский дом «Питер»» [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/piter/blog/275633/> (дата обращения 27.08.2020).
6. Сайт академии Elma [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elma-bpm.ru/journal/urok-1-vvod-v-notaciyu-bpmn/> (дата обращения 27.08.2020).
7. Официальный сайт Самунда [Электронный ресурс]. URL: <https://samundarus.ru/bpmn/> (дата обращения 27.08.2020).
8. Habr.ru, блог компании Tinkoff [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/tinkoff/blog/455860/> (дата обращения 27.08.2020).
9. Официальный сайт МТС Поиск [Электронный ресурс]. URL: <https://poisk.mts.ru> (дата обращения 27.08.2020).

УДК 004.932

**Синтез математических моделей и способов программной реализации на графических процессорных устройствах алгоритмов цифровой обработки видеoinформации, поступающей от бортовых съёмочных систем летательных аппаратов**

**Е.К. Самаров**, кандидат технических наук, доцент,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,  
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

*Статья посвящена синтезу математических моделей и способов программной реализации на графических процессорных устройствах алгоритмов цифровой обработки по стандартам JPEG, JPEG2000 и DNG видеoinформации, поступающей от бортовых съёмочных систем летательных аппаратов. Разработаны и предложены схемы цифровой обработки, которые целесообразно использовать в зависимости от приоритетов, возложенных на бортовую цифровую вычислительную систему летательного аппарата задач.*

Графическое процессорное устройство, бортовая съёмочная система, летательный аппарат, подавление шума.

**Synthesis of Mathematical Models and Methods for Software Realization on Graphics Processing Devices of Algorithms for Digital Video Information Processing Received from on-Board Camera Systems of Aircrafts**

**E. Samarov**, PhD, associate 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 article is devoted to the synthesis of mathematical models and methods of software realization on graphics processing devices of algorithms for digital video information processing received from on-board camera systems of aircraft by JPEG, JPEG2000 and DNG standards. In this paper, we have developed and proposed schemes for digital processing, which is advisable to apply depending on the priorities assigned to the on-board digital computing system of the aircraft tasks.*

Graphic processing device, on-board camera system, aircraft, noise suppression.

Цифровая обработка видеoinформации (изображений и видеопотоков) применяется в настоящее время при решении большого количества практических и научно-исследовательских задач. Математическое и программное обеспечение,

используемое при цифровой обработке видеoinформации, играет важную роль в компьютерных науках, промышленности, медицине, картографии, аэрофото-съемке, космической съёмке, исследовании космоса, а также, в различных задачах управления летательными аппаратами (ЛА) военно-оборонной направленности. При этом вне зависимости от конкретной области применения особое значение придается таким характеристикам цифровой обработки видеoinформации, как характеристики точности, уровня шума, степени сжатия, скорости обработки и объема обрабатываемой видеoinформации.

Поскольку цифровая обработка видеoinформации хорошо поддается декомпозиции и масштабированию, то решение даже небольшой прикладной проблемы оказывает существенное влияние на дальнейшее развитие научного направления цифровой обработки видеoinформации в целом. Задачи цифровой обработки видеoinформации являются важными составляющими огромного количества направлений современной прикладной науки, практики и технологий. Примерами таких задач являются задачи хранения, передачи, воспроизведения и анализа фотографических образов, сделанных бортовыми съёмочными системами (БСС) ЛА с целью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), картографических снимков, различных фотографий и видеопотоков военной направленности, космических изображений и видеопотоков и многие другие. При этом данные, получаемые от любого съёмочного записывающего устройства, подвергаются обработке программно-аппаратными средствами с целью минимизации их объема при допустимом уровне потери качества в зависимости от функционального назначения.

Цифровая обработка видеoinформации – это сложный технологический процесс, состоящий из нескольких этапов.

Одними из важнейших этапов цифровой обработки изображений являются компрессия (сжатие) и декомпрессия (распаковка) изображений, причём алгоритмы сжатия изображений подразделяются на алгоритмы сжатия с потерями информации и алгоритмы сжатия без потерь информации.

Алгоритмы сжатия с потерями информации содержат процент допустимой потери информации, содержащейся в изображении, в качестве одного из параметров настройки алгоритма.

Алгоритмы сжатия без потерь используются тогда, когда любые потери информации недопустимы. Такая ситуация возникает, например, при сжатии текстовой информации.

Так же, как компрессия и декомпрессия, одним из важнейших этапов цифровой обработки видеoinформации, поступающей от БСС ЛА, является шумоподавление. Шумоподавление позволяет улучшить качество визуальной информации, уменьшить влияние артефактов в цифровых изображениях, усилить возможности распознавания образов и интерпретации проведенных измерений, а также просто увеличить количество полезных свойств фотоснимков и видеопотоков, полученных от устройств БСС ЛА. Кроме перечисленных направлений модуляция шума в цифровых изображениях необходима для сокращения объема цифровых изображений с целью обеспечения оптимизации их хранения и передачи по линиям связи, в частности, в наземные центры связи и управления (ЦСУ). При этом в прикладных задачах, как правило, допускается определенный

уровень потери качества, который компенсируется выгодами от такой оптимизации, например, за счет возможности оперирования большими массивами данных. Целый класс направлений современной компьютерной науки, технологий и практики вообще не может рассматриваться в отрыве от такого подхода. В первую очередь – это работа с изображениями и видеопотоками, получаемыми при ДЗЗ, практически любыми задачами картографии, космическими снимками, задачами управления ЛА, в том числе беспилотными, и другие подобные задачи.

Универсального способа шумоподавления в видеоинформации не существует. Качество шумоподавления зависит от выбора алгоритма шумоподавления, эффективность которого определяется характером видеоинформации и типом существующих помех. Иногда для того, чтобы определить, какой из алгоритмов шумоподавления является наиболее эффективным для конкретной видеоинформации, требуется серия испытаний.

Поскольку космические изображения и видеопотоки, как правило, обладают большим объемом и высоким уровнем зашумленности, разработки способов дополнительного шумоподавления в видеоинформации для космической отрасли крайне важны. Применение разработок дополнительного шумоподавления позволяет повысить точность видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, с помощью уменьшения уровня шума в изображениях и видеопотоках. Под повышением точности видеоинформации здесь понимается допустимый в результате применения алгоритмов шумоподавления уровень потери данных обрабатываемых изображений и видеопотоков, поступающих от БСС ЛА, достаточный для их полноценного использования в возлагаемых задачах цифровой обработки видеоинформации [2-5].

Разработки новых способов реализации алгоритмов компрессии и декомпрессии, обеспечивающие с повышенной скоростью и повышенной степенью сжатия цифровую обработку видеоинформации в космической отрасли актуальны и важны. Увеличение степени сжатия видеоинформации уменьшает объем, занимаемый её файлом, и, тем самым, сокращает время передачи видеоинформации с борта ЛА в наземные ЦСУ. При этом особую роль при реализации алгоритмов компрессии и декомпрессии играют графические процессорные устройства (ГПУ). За счёт экономии времени при обращениях к памяти, а также за счёт удобства распараллеливания вычислений, цифровая обработка изображений и видеопотоков, осуществляемая на ГПУ, значительно превосходит по многим параметрам аналогичную цифровую обработку изображений и видеопотоков, осуществляемую на центральном процессорном устройстве (ЦПУ). Ввиду больших объемов видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, её актуальности, а также ограниченности ресурсов ЛА, ускорение процесса цифровой обработки видеоинформации является крайне важным.

Каждый из программных пакетов DNG, JPEG, JPEG2000 служит не только форматом, в котором записываются данные изображений, но, в первую очередь, алгоритмом, осуществляющим цифровую обработку изображений. Более того, каждый из перечисленных программных пакетов является международным стандартом цифровой обработки изображений [1].

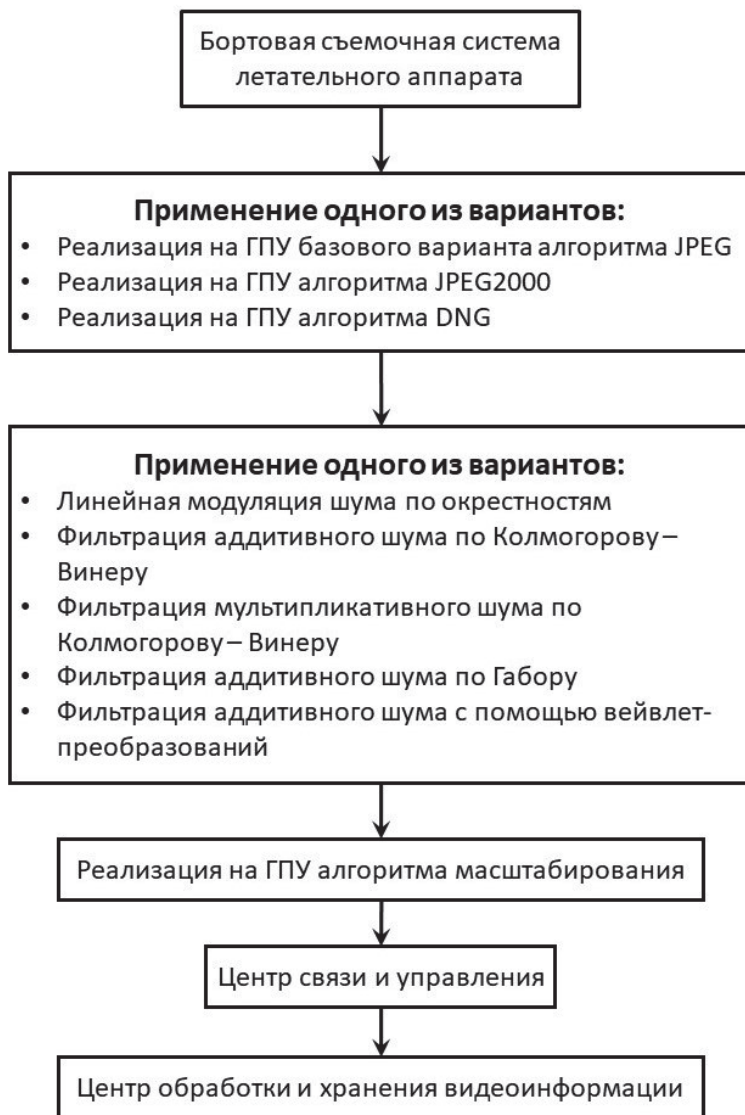
Использование стандартов JPEG, JPEG2000 и DNG является наиболее перспективным для повышения эффективности цифровой обработки видеоин-

формации, поступающей от БСС ЛА. Применение для решения этой задачи стандарта ICER, разработанного НАСА, в настоящее время невозможно в силу высокого уровня ведомственной конфиденциальности этого стандарта.

Целью настоящей работы является синтез новых математических моделей и способов программной реализации на ГПУ алгоритмов цифровой обработки по стандартам JPEG, JPEG2000 и DNG видеoinформации, поступающей от БСС ЛА.



Рисунок 1 – Полный цикл цифровой обработки видеoinформации, поступающей от БСС ЛА (схема 1)



**Рисунок 2 – Полный цикл цифровой обработки видеоинформации, поступающей от БСС ЛА (схема 2)**

Синтез математических моделей и алгоритмов целесообразно использовать в соответствии со схемами, изображёнными на рисунках 1-6.





Рисунок 3 – Цифровая обработка видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, при которой дополнительная фильтрация шума осуществляется в наземных центрах (схема 3)

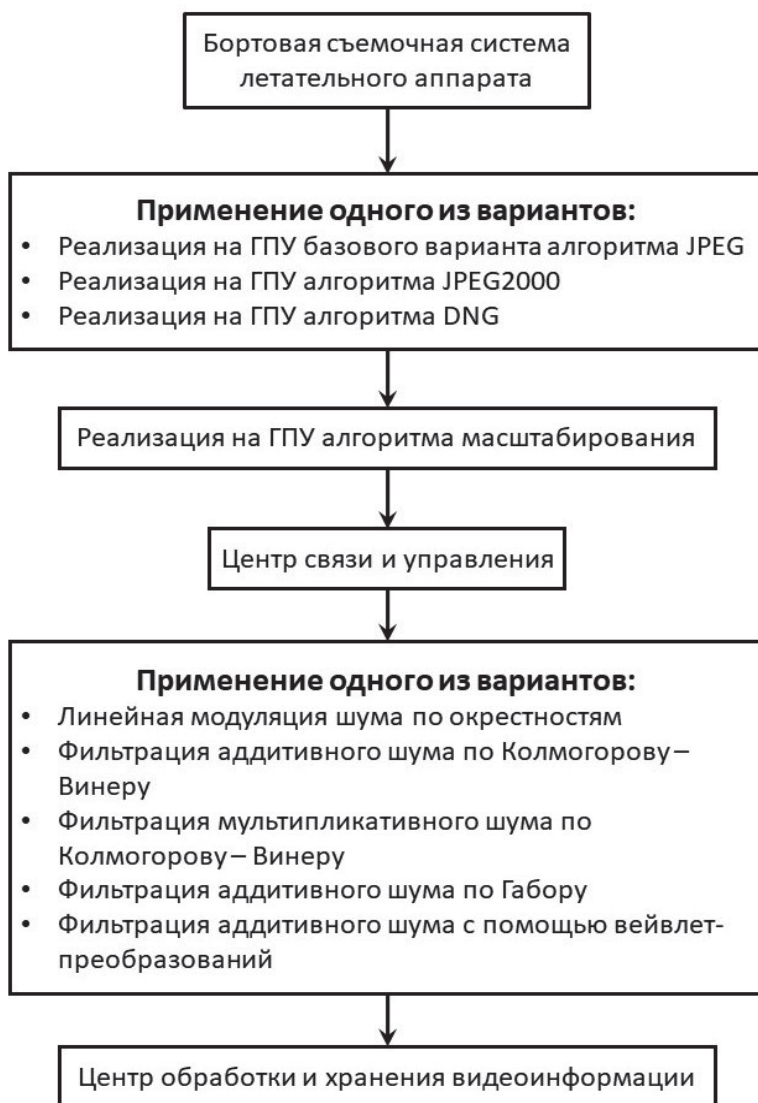
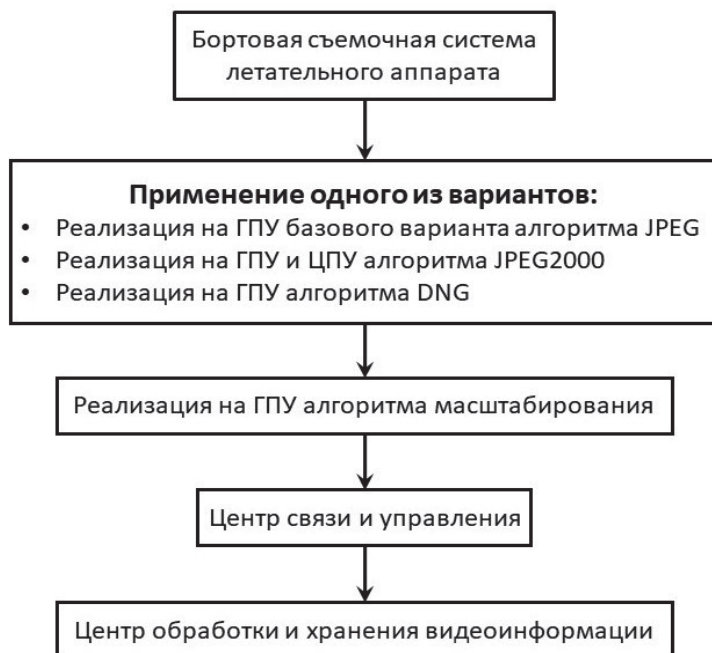


Рисунок 4 – Цифровая обработка видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, при которой дополнительная фильтрация шума осуществляется в наземных центрах (схема 4)

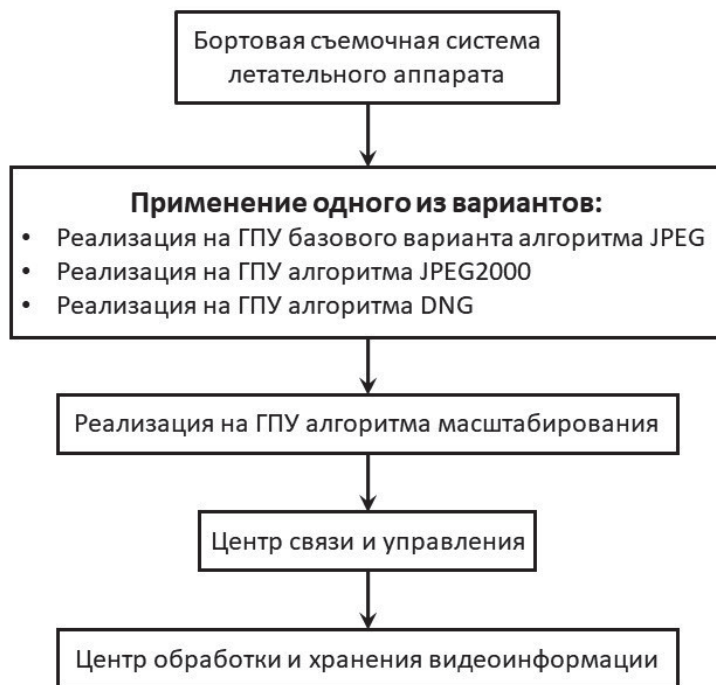


**Рисунок 5 – Цифровая обработка видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, осуществляемая без дополнительной фильтрация шума (схема 5)**

Приведённые схемы описывают различные варианты применения разработанных алгоритмов компрессии, декомпрессии, шумоподавления и масштабирования видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, обеспечивающие повышенные характеристики точности видеоинформации, сокращение времени, за которое видеоинформация должна попасть в наземные ЦСУ, а также сокращение места, требуемого для её хранения.

На схемах 1 и 2 (рис. 1 и 2) изображен полный цикл цифровой обработки видеоинформации, поступающей от БСС ЛА. Этот цикл осуществляется БЦВС ЛА. Такую цифровую обработку видеоинформации целесообразно применять в штатном режиме, когда дополнительно поставленные задачи отсутствуют.

Схема 2 отличается от схемы 1 заменой программной реализации на GPU совместно с ЦПУ алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 на программную реализацию алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 только на GPU. Цифровая обработка видеоинформации по схеме 2 осуществляется с большей скоростью, чем по схеме 1.



**Рисунок 6 – Цифровая обработка видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, осуществляемая без дополнительной фильтрации шума (схема 6)**

В отличие от схем 1 и 2 на схемах 3 и 4 (рис. 3 и 4) дополнительная фильтрация шума в видеоинформации осуществляется в наземных центрах. Такую цифровую обработку целесообразно применять, если поставлена задача получить видеоинформацию с повышенной точностью, а время цифровой обработки имеет второстепенное значение. Схема 3 отличается от схемы 4 заменой программной реализации на ГПУ совместно с ЦПУ алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 на программную реализацию алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 только на ГПУ.

Цифровая обработка видеоинформации по схеме 4 осуществляется с большей скоростью, чем по схеме 3.

В отличие от схем 1-4 на схемах 5 и 6 (рис. 5 и 6) дополнительная фильтрация шума в видеоинформации не проводится. Такую цифровую обработку предлагается применять в случае, когда поставлена задача получить видеоинформацию за наименьшее время, а точность видеоинформации имеет второстепенное значение.

Схема 5 отличается от схемы 6 заменой программной реализации на ГПУ совместно с ЦПУ алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 на программную реализацию алгоритма сжатия по стандарту JPEG2000 только на ГПУ. Цифровая обработка видеоинформации по схеме 6 осуществляется с большей скоростью, чем по схеме 5.

Предложенные схемы синтеза математических моделей и алгоритмов цифровой обработки видеоинформации, поступающей от БСС ЛА, обеспечива-

ют, в зависимости от приоритетов возложенных задач, сокращение времени, за которое видеoinформация должна попасть в наземные ЦСУ, повышенные характеристики точности видеoinформации, а также сокращение места, требуемого для её хранения.

*Литература*

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // М.: Техносфера. 2012 г. 1104 с.
2. Самаров Е.К. Синтез алгоритма оптимальной линейной модуляции шума в цифровой обработке изображений // Уфа: Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 2. т. 15. 2019 г. С. 77-83.
3. Самаров Е.К. Синтез алгоритма подавления аддитивного шума в изображениях на основе дискретного варианта фильтрации Колмогорова-Винера // Королев МО: Двойные технологии. № 2. 2019 г. С. 92-94.
4. Самаров Е.К. Подавление мультипликативных помех в изображениях с помощью фильтрации Колмогорова-Винера и ее связь с инверсной фильтрацией // Королев МО: Стратегическая стабильность. № 2. 2019 г. С. 23-25.
5. Самаров Е.К. Применение вейвлет-преобразований для подавления шума в видеoinформации, поступающей от бортовых съёмочных систем летательных аппаратов // Королев МО: Информационно-технологический вестник. № 1(20). 2020. С.22-32.

УДК 004.03

## **Возможности геоинформационных систем для анализа территорий и оценки инвестиционной привлекательности объектов строительства**

**Л.Е. Суркова**, кандидат технических доцент, доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве»,  
**Е.К. Суркова**, студентка 3 курса,  
Национальный Исследовательский Московский государственный  
строительный университет, г. Москва

*В работе дано понятие геоинформационной системы, рассмотрены сферы применения таких систем. В качестве примера рассмотрена инструментальная среда конструктора карт Яндекс и продемонстрированы возможности. С использованием данного инструмента проанализирована исследуемая территория, определен процент зеленых насаждений, промышленных зон, а также определена транспортная доступность, что является важным при обосновании инвестиционной привлекательности объекта капитального строительства в городской среде.*

Геоинформационная система, строительство, анализ территорий, инвестиционная привлекательность.

### **Capabilities of geoinformation systems for territory analysis and assessment of investment attractiveness of construction projects**

**L.E. Surkova**, Ph. D., associate Professor, associate Professor of the Department of Information systems, technologies and automation in construction,  
**E.K. Surkova**, 3rd year student,  
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

*In this paper, the concept of a geoinformation system is given, and the scope of application of such systems is considered. As an example, we consider the tool environment of the Yandex map constructor and demonstrate its capabilities. Using this tool, the study area was analyzed, the percentage of green spaces, industrial zones was determined, and transport accessibility was determined, which is important in justifying the investment attractiveness of a capital construction object in an urban environment.*

Geoinformation system, construction, territory analysis, investment attractiveness.

#### **Введение**

Геоинформационные системы (ГИС) получили широкое распространение в последнее время для решения различного рода задач. ГИС – это информационные системы, позволяющие работать с пространственными данными, осуществляя комплексную обработку информации. Эти системы часто используют как системы управления и поддержки принятия решений по оптимальному управле-

нию землями и природными ресурсами, транспортом, торговлей и другими объектами с непосредственной привязкой к картографическим данным. В их основе лежат разные технологии, прежде всего по сбору информации, используемые в других информационных системах, таких как системы картографической информации, автоматизированные системы картографирования, автоматизированные фотограмметрические системы, земельные информационные системы, автоматизированные кадастровые системы и т.п. Эти системы на основе баз данных могут выступать как экспертные системы, системы моделирования и прогнозирования, а также могут использоваться в решении проектных задач. ГИС предоставляют большую наглядность выходных данных, возможности изменения детализации и масштаба отображения данных, различные формы представления. Как прикладные информационные системы ГИС довольно широко используются. Наиболее часто эти системы используются на транспорте, в навигации, географии, геологии, топографии, экологии, экономике, военном деле.

Так в работе [1] ГИС используется как инструмент для решения ряда задач, связанных с развитием транспортной инфраструктуры, строительством новых дорог, доступности остановок общественного транспорта. Задачи решались на основе общедоступного ресурса OpenStreetMap [<https://www.openstreetmap.org>].

Применение технологий ГИС в агропромышленном комплексе (АПК) изложено в работе [2], где основными задачами выступают планирование, мониторинг, прогнозирование и информационная поддержка принятия решений в сельском хозяйстве. В качестве программного обеспечения указаны «Атлас земель сельскохозяйственного назначения РФ» и «Геоаналитика.Агро» компании Совзона, «ЦПС: Агро Технология» и «ЦПС: Геоцентр Управления АПК» компании Центрпрограммсистем, «Единое информационное пространство геоданных (ЕПГ) RusGIS РусГИС» компании Ростелеком.

Важность земельно-информационных систем как составляющая ГИС отмечена в работе [3]. Проблемы озеленения территорий с использованием ГИС рассмотрены в работах [4, 5], где были предложены структуры и интерактивные возможности ГИС по организации мониторинга за состоянием зеленых насаждений городской среды. ГИС как возможность для моделирования и анализа водных ресурсов, водохранилищ, методологические основы создания гидрологических ГИС представлены в монографии [6]. Вопросы применения ГИС в строительстве для целей экологического мониторинга отражены в работе [7].

Применение ГИС в качестве управляющих информационных систем и как основа систем поддержки принятия решений приведены в работах [8-10].

Таким образом, круг решаемых задач и возможностей применения геоинформационных систем довольно широк. Применим одну из систем для анализа территории с точки зрения инвестиционной привлекательности строительного объекта в городской среде.

Целью работы является демонстрация возможностей доступных геоинформационных систем российских разработок для оценки инвестиционной привлекательности объекта капитального строительства в городской среде.

#### **Методы и материалы**

Используются методы системного анализа на основе открытых источни-

ков информации и доступных программных средств. Объектом исследования является район Свиблово г. Москвы, где в качестве объекта капитального строительства выступает торгово-развлекательный комплекс «Европолис». Задача заключается в оценке места положения, ценности застройки, на основе геоинформационных данных. В качестве инструмента для анализа демонстрируются возможности конструктора карт от Яндекса [[https://yandex.ru/support/maps-builder/concept/markers\\_4.html](https://yandex.ru/support/maps-builder/concept/markers_4.html)].

Конструктор карт Яндекс позволяет создавать собственные карты, ставить метки на нужных объектах, выделять определенные зоны и области, рисовать схемы проезда. После создания такой карты ее можно разместить на сайте, в блоге или дать ссылку, по которой эту карту можно увидеть в интернете. При этом карты могут быть разных типов: интерактивные, статические, печатные. Интерактивные карты остаются активны для взаимодействия с пользователем, позволяют менять масштаб, строить маршруты, двигать. Статические карты представляют собой изображение, картинку, которую можно разместить на сайте. Такие карты имеют ограничения на число объектов. Печатная карта содержит изображение в высоком разрешении, которое можно сохранить на диске в виде файла и отправить файл на печать. Также имеются возможности экспорта и импорта различных форматов файлов. Инструкция по созданию собственных карт довольно подробно излагает порядок работы и представлена на сайте разработчика [<https://yandex.ru/support/maps-builder/concept/index.html>].

Воспользуемся данным инструментом и в качестве примера продемонстрируем возможности геоинформационной системы для анализа окружающей застройки, влияющей на ценность исследуемого объекта капитального строительства, ТРЦ «Европолис». Рассмотрим такие показатели как, транспортная доступность, наличие промышленных зон, жилой застройки, а также зеленых насаждений. В качестве критериев оценки местности часто выступают показатели повышенного использования территории, наиболее удобно расположенной по отношению к центру города, местам концентрации деятельности, транспортным магистралям, экологически благоприятным, с богатым ландшафтным и архитектурным окружением. Таким образом, представляется возможным описать и оценить социальную, функциональную, экологическую и ландшафтную ценность территории [11].

#### **Результаты исследования**

Район Свиблово находится в Северо-Восточном административном округе (СВАО) города Москвы. Территория района Свиблово составляет 4,41 км<sup>2</sup>, насчитывает 25 улиц, количество проживающего населения 61821 человек. В районе Свиблово насчитывается две станции метрополитена «Свиблово» и «Ботанический сад» Калужско-Рижской линии. Так же в районе присутствуют одна железнодорожная станция «Ростокино» Московской железной дороги и одноименная станция Московского центрального кольца (МЦК). Район Свиблово имеет общие границы с районом Отрадное, районом Южное Медведково, Бабушкинским районом, Ярославским районом, районом Ростокино и Останкинским районом (рис. 1).



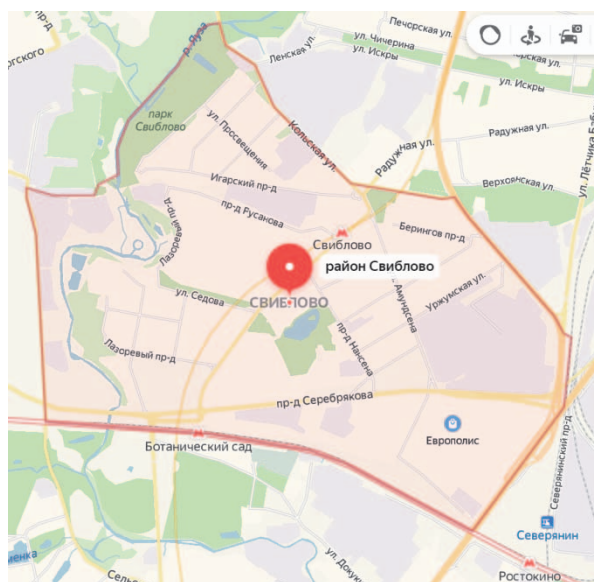


Рисунок 1 – Границы района Свиблово

К основным транспортным магистралям района Свиблово можно отнести Ярославское шоссе, проезд Серебрякова, улицу Лётчика Бабушкина, Снеженскую улицу и Сельскохозяйственную улицу.

На территории района расположено 37 крупных и средних предприятий и организаций, в том числе предприятия и организации общероссийского значения – ЗАО Московский Зеркальный Комбинат, Научно-исследовательский институт транспортного строительства (ОАО ЦНИИС), ОАО Комбинат музыкальных инструментов «Лира», Ростокинский завод ЖБК ОАО ДСК-1. Предприятий бытового обслуживания 40, предприятий общественного питания – 31, предприятий торговли – 59. На территории района располагаются: 2 поликлиники (взрослая и детская), детская городская больница, молочная кухня, 9 дошкольных учреждений, школа-интернат для подготовки детей с проблемами умственного и физического развития, 5 общеобразовательных школ.

В районе находятся учреждения культурного профиля: кинотеатр «Сатурн», детская музыкальная школа №23 им. А.Н. Скрябина, Центр развития творчества детей и юношества, ГУ Клуб «Молодежный». Также в Свиблово работают районные средства массовой информации: районная газета «Свиблово», студия районного кабельного телевидения «Инфокос+».

Район обладает рядом «зеленых» территорий. Значительную часть территории района занимает природоохранный комплекс поймы реки Яузы, где располагается усадьба Старое Свиблово – исторический и культурный центр Москвы XV-XIX веков, которая в настоящее время восстанавливается в виде Патриаршего Подворья Русской Православной Церкви. Территория этого природоохранного комплекса, а также стадион «Свиблово», Капустинский пруд, на территории которого ведутся работы по благоустройству, – являются наиболее популярными местами отдыха жителей района.

В районе ведется масштабное жилищное строительство, что позволит району стать одним из комфортабельных и благоустроенных районов XXI века. А правильный подход к природоохранной деятельности и бережное отношение к

природным ресурсам позволит району Свиблово и в дальнейшем сохранять статус одного из наиболее «зеленых» районов Москвы.

ТРЦ «Европолис» – один из крупнейших ТРЦ Москвы, его общая площадь достигает 240 тыс. кв. м. Он открылся в 2009 году. На данный момент в ТРЦ происходит реконструкция, с целью привлечения новых покупателей и расширения ассортимента.

Для наглядного анализа территории района Свиблово воспользуемся конструктором карт Яндекс. Использование инструмента редактирования «Многоугольники» позволяет определить границы района. Удобнее при этом работать на слое «Схема». При использовании данного инструмента автоматически определяется площадь выделяемого объекта. Последовательно аналогичным образом выделяются зеленые зоны, включая парки и скверы, области жилой застройки вместе с социальными объектами, школами, магазинами и т.п., промышленные зоны и собственно сам объект реконструкции «ТРЦ Европолис» (рис. 2). Для наглядности выделенных территорий используются различные цветовые решения для границ этих территорий и их заливки. Так для зеленых зон используется зеленый цвет, жилой застройки – оранжевый, промышленных зон – темно серый, ТРЦ «Европолис» – голубой. Для подписей объектов использован инструмент «Метки» в том же цветовом решении, что и выделенный объект.

Для определения протяженности маршрутов от основных транспортных узлов, таких как станции метро Свиблово и Ботанический сад, и станции Ростокино МЦК, проложены маршруты с использованием инструмента «Линии», фиолетовый цвет (рис. 2). Данный инструмент автоматически определяет протяженность маршрута (рис. 3).

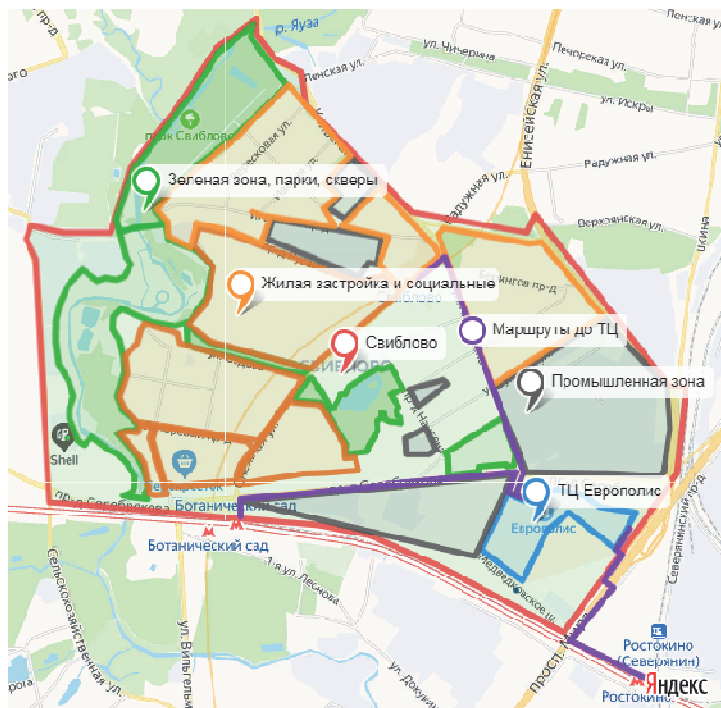


Рисунок 2 – Зоны района Свиблово и пешие маршруты от крупных транспортных узлов

Наличие показателей площади занимаемых объектов (рис.4) позволяют проанализировать степень озеленения территории, загруженность промышленными зонами. Так доля зеленых зон в общей площади района Свиблово на основе полученных данных составляет приблизительно 16,5%. Около 15% территории занимают объекты промышленности и промышленные территории.




	Маршрут от метро Свиблово	1.3 км
	Маршрут от МЦК Ростокино	1.0 км
	Маршрут от метро Ботанически...	1.5 км

Рисунок 3 – Протяженности маршрутов на редактируемой карте

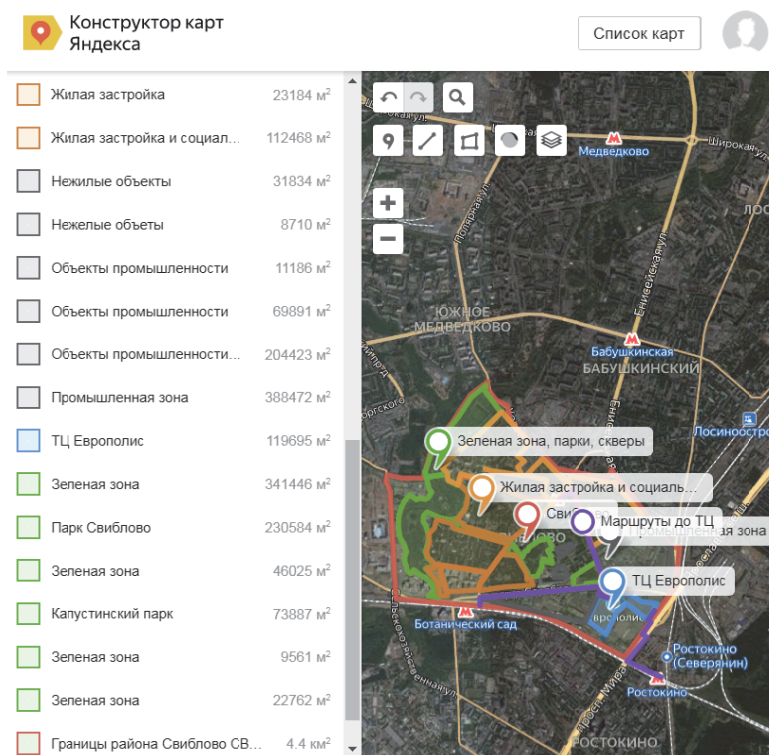


Рисунок 4 – Окно конструктора карт с указанием всех площадей созданных объектов

Таким образом район Свиблово отличается большим количеством зеленых насаждений, при учете плотной застройки. Наличие промышленных зон с одной стороны сказывается на экологии и окружающей среде, но, с другой стороны, дает большое количество мест приложения труда.

ТРЦ «Европолис» располагается в непосредственной близости к жилым домам и кварталам, это позволяет жителям добираться до магазинов пешком, не

затрачивая при этом время на транспорт. Незначительное расстояние от больших транспортных узлов позволяет также добраться пешком до торгового центра при необходимости из других районов г. Москвы.

#### **Выводы**

В работе продемонстрированы инструментальные возможности конструктора карт Яндекс, которые довольно просты в применении и могут применяться любым пользователем, не обладающим специальными навыками работы с ГИС. Они позволяют проанализировать территорию исследуемого района с точки зрения его озеленения, наличия промышленных зон, жилой застройки, транспортной доступности, что является важным при обосновании инвестиционной привлекательности строительного объекта коммерческого назначения. Данная работа может иметь практическую значимость.

#### *Литература*

1. Боровской А.Е., Глущенко Е.И., Харузин В.Э., Боровская О.Ю. Использование геоинформационных систем при анализе функционирования системы общественного транспорта городских агломераций // В сборнике: Информационные технологии и инновации на транспорте Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.Н. Новикова. 2019. С. 43-51.
2. Сальников С.Г., Тухина Н.Ю. Геоинформационные системы как базовая система информационного обеспечения сельского хозяйства // Вестник Московского гуманитарно-экономического института. 2018. № 4. С. 100-103.
3. Нестерова О.Е. Геоинформационные системы как инструмент создания земельных информационных систем // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2007. Т. 7. № 2. С. 35-37.
4. Попова И.В., Бурак Е.Э., Воробьева Ю.А. Применение геоинформационных систем для мониторинга и развития системы зеленых насаждений города // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. № 4 (7). С. 67-75.
5. Ковалева Ю.М., Воронина А.В. Проблематика и стратегия управления системой озелененных пространств с применением геоинформационных систем // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3-4. С. 77.
6. Пьянков С.В., Калинин В.Г. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских): Монография // ООО «Алекс-Пресс». Пермь. 2011. 158 с.
7. Степанов С.Ю., Петров Я.А., Сидоренко А.Ю., Мартын И.А., Богданов Н.Э. Интеграция системы экологического мониторинга в геоинформационные системы по управлению строительством объектов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 3 (35). С. 53-60.
8. Сапелкин А.И., Щётка В.Ф., Корольков А.П. Анализ геоинформационных систем, применяемых в автоматизированной информационно-управляющей системе МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2018. Т. 1. С. 556-558.

9. Фисич Б.А. Роль и место геоинформационной системы в автоматизированной системе управления предприятием // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017. № 3. С. 110-114.
10. Степанов С.Ю. Анализ взаимосвязи систем поддержки принятия решений и геоинформационных систем на основе использования пространственно распределенной разнородной информации // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2016. № 2 (18). С. 22-26.
11. Теличенко Т.В. Научно-практические аспекты выбора рациональных вариантов использования недвижимости // Недвижимость: экономика, управление. 2008. № 1. С. 27-32.

УДК 004.9, 330.131.7

## **Неопределенность в задачах управления региональной промышленно-экологической безопасностью**

**С.Ю. Яковлев**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

**А.В. Маслобоев**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник,

**А.С. Шемякин**, младший научный сотрудник,

Институт информатики и математического моделирования Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»  
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

*Неполнота, неточность информации являются неотъемлемыми атрибутами задач управления риском, но эти свойства недостаточно исследованы в теории и реализованы на практике. В работе проведен системный анализ базовых подходов к учету неопределенности в сфере управления безопасностью и смежных областях, выявлены их общие закономерности и ключевые особенности. На основе результатов анализа создана концептуальная модель измерения параметрической неопределенности, отличающаяся свойствами унифицированности и конструктивности. Предложены классификация неопределенностей, ориентированная на задачи управления региональной промышленно-экологической безопасностью, и алгоритм учета неопределенности, реализующий поддержку принятия решений по управлению рисками в этих задачах. Разработана информационная структура типового планирующего документа учета неопределенности, обеспечивающего комплексную оценку неопределенности в системе управления рисками чрезвычайных ситуаций для уровня потенциально опасных объектов региона.*

Учет неопределенности, управление, риск, региональная безопасность, информационная технология, алгоритм, чрезвычайная ситуация.

## **Uncertainty in control problem-solving of regional industrial and environmental safety**

**S.Yu. Yakovlev**, PhD, Senior research fellow,

**A.V. Masloboev**, Dr. Sci. Tech., Leading research fellow,

**A.S. Shemyakin**, Junior research fellow,

Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal  
Research Center «Kola Science Center of Russian Academy of Sciences»  
(IIMM KSC RAS), Apatity

*Information incompleteness and inaccuracy are immanent attributes of risk management problems, but these features are not sufficiently studied in theory and implemented in practice. The work deals with system analysis of the main approaches to uncertainty accounting in the safety management and related fields. General properties and essential features of various methods are revealed. On the basis of analysis results an original conceptual model for parametric uncertainty measuring, which is*

*characterized by the properties of uniformity and constructivity, has been designed. Uncertainty classification focused on control problem-solving of regional industrial and environmental safety and uncertainty accounting algorithm, which supports decision-making in risk management under that problems, are proposed. An information structure of the typical planning document for uncertainty accounting, which provides a complex uncertainty assessment in the risk management system of emergency situations at the level of potentially hazardous objects of the region, has been developed.*

Uncertainty accounting, management, risk, regional security, information technology, algorithm, emergency situation.

### **Введение**

Фактор неопределенности знаний при принятии управленческих решений является одним из важнейших, но недостаточно учитываемых аспектов в современных исследованиях в области теории и практики управления безопасностью сложных систем, особенно в отечественных. На практике зачастую это связано с самой спецификой управленческой деятельности в сфере обеспечения безопасности, а также с отсутствием резерва времени на сбор информации и анализ ее достоверности или с недостаточной ситуационной осведомленностью в процессе принятия решений. Сложность учета неопределенности в управлении объектами социально-экономических систем усиливает и труднопрогнозируемый характер развития кризисных явлений в экономике, обществе, природе и техносфере. За рубежом опыт, наоборот, концентрируется на анализе и учете влияния человеческого фактора, как основного источника неопределенности, в процессе управления рисками и безопасностью социально-экономических систем, наряду с прочими кибернетическими особенностями этого процесса.

Объектами нашего исследования являются неопределенность и методы ее учета в задачах управления рисками и безопасностью на региональном уровне. Для повышения качества принимаемых решений в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера необходимо учитывать различные виды неопределенностей в процессе ситуационного управления. Такой учет может обеспечиваться за счет применения современных средств информационной поддержки управления [13], реализующих соответствующие модели и методы учета неопределенностей. Для этого требуется содержательный анализ методологии оперирования неопределенностями в различных предметных областях. Это позволит провести систематизацию и унификацию известных подходов и модифицировать ранее полученные результаты [1, 7, 12, 16, 18] с целью охвата новой специфики, связанной с неопределенностью информации, свойственной для задач управления региональной промышленно-экологической безопасностью.

В работе сделана попытка систематизации и адаптации базовых направлений учета и формализации фактора неопределенности знаний и информации для создания информационных технологий управления региональной промышленно-экологической безопасностью.

### **Определение понятия неопределенности в управлении**

Неопределенность в явной или скрытой форме присутствует при решении

любых задач управления системами различной природы и масштаба. При этом она может в той или иной степени учитываться или вовсе игнорироваться в зависимости от целей субъекта управления, степени его ситуационной осведомленности, норм и внешних условий. Вместе с тем, стоит принимать во внимание факт отсутствия четкой и однозначной дефиниции понятия неопределенности в нормативной базе и исследованиях по управлению безопасностью и риском [6]. Авторы придерживаются общепринятого определения риска [18] как количественной меры опасности, а неопределенность трактуют как один из атрибутов возможной опасности (риска). В теории управления известны два основных толкования неопределенности [16]. В первом, более широком, под неопределенностью понимается любая неполнота, неоднозначность или неточность потребной информации в управлении. При этом используются вероятностная, интервальная, игровая и другие формы представления неопределенности. Второе, более узкое, считает вероятностные свойства имманентными атрибутами управляемых объектов, а под неопределенностью подразумевает «размытость» или незнание количественных характеристик случайности поведения этих объектов. В настоящей работе рассматриваются оба подхода.

#### **Методология исследования неопределенности в управлении**

Рассмотрим теоретическую базу исследования проблем учета неопределенности в области управления безопасностью. Методология исследования неопределенности имеет пересечения по используемым методам с известными научными дисциплинами: теория погрешностей, метрология, теория вероятностей и математическая статистика, теория игр, теория информации, теория устойчивости, многокритериальная теория полезности, теория недоопределенной математики и другими. Эти научные концепции оказали существенное влияние на становление и развитие методологии учета неопределенности в задачах управления и принятия решений.

Теория погрешностей исторически является одним из первых инструментов оценки неопределенности параметров сложных систем.

Погрешность (или абсолютная погрешность) – это разность  $\Delta$  между истинным (неизвестным)  $a$  и приближенным (измеренным, принятым, оценочным)  $a^*$  значением некоторой величины, выражается в единицах этой величины:

$$\Delta = a - a^*.$$

Относительная погрешность  $\delta$  – отношение абсолютной погрешности к приближенному значению:

$$\delta = \Delta/a^*.$$

Важны границы (максимальные значения) погрешностей. Число  $\Delta a \geq 0$ , удовлетворяющее неравенству:

$$|a - a^*| \leq \Delta a,$$

называется границей абсолютной погрешности, также выражается в единицах оцениваемой величины. Число  $\delta a \geq 0$ , удовлетворяющее неравенству:

$$|(a - a^*)/a^*| \leq \delta a,$$

называется границей относительной погрешности, может выражаться в процентах.



Тогда:

$$a \in (a^* - \Delta a; a^* + \Delta a) = (a^*(1 - \delta a); a^*(1 + \delta a)).$$

Используются характеристики погрешностей, учитывающие источник их возникновения (например, измерения) и частоту различных значений абсолютной и относительной погрешностей. При этом используются методы теории вероятностей, точнее, специального раздела математической статистики - теории ошибок. Различают три основных вида ошибок: систематические (их оценка выходит за рамки математической статистики и составляет предмет исследований обработки наблюдений), грубые и случайные ошибки. Основные задачи теории ошибок: выявление законов распределения ошибок (проверка гипотез), статистическое оценивание величин по результатам опытов, установление погрешностей и грубых ошибок.

Неточности математического описания управляемых объектов и процессов называют погрешностями модели, неточности задания исходных данных – погрешностями входных данных, неточности способа решения – погрешностями метода, неточности вычислений – вычислительными погрешностями. В ходе решения различных задач управления погрешности могут накапливаться и порождать новые.

Метрология относится к одному из наиболее разработанных и доведенных до практического применения направлений исследования неопределенности. Основные положения этой концепции, как правило, закреплены в соответствующих стандартах, например [14]. Метрология родилась из измерений. Одной из ее главных задач является достижение заданной точности при наличии ошибок измерений.

В качестве основных показателей точности выступают: среднеквадратическое отклонение, доверительные границы ошибок, стандартная неопределенность измерений, суммарная и расширенная неопределенность, плотность распределения значений измеряемой величины. Неопределенность измерений в метрологии характеризует рассеяние значений измеряемой величины. В нее включаются систематические составляющие и дефинициальная неопределенность. Под стандартной неопределенностью обычно понимается стандартное отклонение. В результате деления стандартной неопределенности на измеренное значение получается относительная стандартная неопределенность измерений. В результате сложения неопределенностей входных величин образуется суммарная неопределенность. Умножение стандартной неопределенности на коэффициент охвата дает расширенную неопределенность. В результате деления расширенной неопределенности на измеренное значение получается относительная расширенная неопределенность измерений. Коэффициент охвата зависит от распределения измеряемой величины и выбранной вероятности охвата. Вероятность охвата – это вероятность нахождения значений измеряемой величины в указанном интервале охвата. Интервал охвата включает значения измеряемой величины с заданной вероятностью, он может быть получен из расширенной неопределенности.

Статистический анализ измерений позволяет выполнить оценку неопределенности по типу А. Иные способы оценки неопределенности составляет тип В. Важным документом является так называемый бюджет неопределенности – итоговый отчет о составляющих неопределенности, их вычислении и суммиро-

вании. В бюджет включается принятая модель измерений, оценки и неопределенности параметров модели, плотности вероятностей, число связей, тип оценивания и коэффициент охвата. Дефинициальная неопределенность связана со степенью детализации измеряемой величины, она равна минимальному возможному значению неопределенности измерений. Назначение результатов измерений обуславливает верхнюю границу неопределенности, называемую целевой неопределенностью.

Теория вероятностей и математическая статистика применяется для описания неопределенных (случайных, неизвестных в точности, недетерминированных) процессов и явлений. Эта дисциплина изучает закономерности случайных событий, величин, процессов и дает количественное выражение их характеристик. Случайная, возможная природа этих явлений отражена в исходных определениях: случайное событие, вероятность события, случайная величина.

Вопросы взаимного влияния случайных величин раскрываются в теории корреляции. Выражением вероятностной зависимости величин являются условные законы распределения. Вероятностная зависимость может быть более или менее тесной, по мере увеличения тесноты она приближается к функциональной.

В теории вероятностей случайные события характеризуются вероятностями  $P(A) = p$ , случайные величины – законами распределения в форме ряда распределения, функции распределения  $F(x)$ , плотности распределения  $f(x)$ . Также существенными являются числовые характеристики случайных величин: математическое ожидание  $M(X) = m_x$ , дисперсия  $D(X) = D_x$ , моменты. Характеристики:  $p$ , ряд распределения,  $F(x)$ ,  $f(x)$ ,  $m_x$ ,  $D_x$  - считаются известными, заданными, либо могут быть точно рассчитаны. Эти величины могут сами являться характеристиками неопределенности, однако и они могут быть точно не известны. Так, изучение случайных явлений приходится проводить опытным путем, а перечисленные характеристики получать посредством обработки результатов. Эксперименты сопровождаются ошибками. Данные получаются искаженными. Необходимо оценивать величину ошибок. На помощь приходит математическая статистика, использующая методы систематизации и обработки статистических и экспериментальных данных, полученных в результате наблюдений и опытов над случайными процессами и явлениями.

Этот инструментарий оперирует оценками вероятности события  $p^*$ , ряда распределения, функции распределения  $F^*(x)$ , плотности  $f^*(x)$ , математического ожидания  $m^*$ , дисперсии  $D^*$ . Величина возможных ошибок при этом определяется на основе соотношения:

$$P(|a - a^*| < \varepsilon) = \gamma,$$

где  $a$  – неизвестное точное значение параметра;  $a^*$  – его оценка;  $\varepsilon$  – точность оценки  $a^*$ ;  $\gamma$  – надежность (доверительная вероятность) оценки  $a^*$ . Доверительный интервал – это интервал  $I_a = (a^* - \varepsilon, a^* + \varepsilon)$ , включающий в себя неизвестный параметр  $a$  с заданной надежностью  $\gamma$ .

Один из источников неопределенности – ситуации, когда две (или более) стороны преследуют различные цели и не знают о намерениях друг друга. Математическая теория конфликтных ситуаций называется теорией игр. Частный случай матричной игры – так называемые «игры с природой», когда один из игроков («природа») действует бессознательно, случайно, не имеет своих целей. При

управлении рисками ЧС такой вариант, например, актуален при учете погодных условий. Природно-климатические факторы существенно влияют на решение как стратегических, так и тактических задач управления. Рассмотрим игры с природой подробнее.

Матрица такой игры отражает интересы лица, принимающего решение (ЛПР), стратегиям которого соответствуют строки. Стратегиям или вариантам природных условий соответствуют столбцы. Вероятности состояний природы могут быть известны и не известны, могут зависеть и не зависеть от стратегий ЛПР. При этом используются различные критерии: Байеса, Вальда, оптимизма, Гурвица, Сэвиджа. Каждый из критериев имеет свою направленность и область применимости: наилучший средний результат во многих испытаниях, лучший показатель в худшем случае, максимально возможный выигрыш, взвешенная стратегия. Для ЧС и ЛПР эти критерии интерпретируются в зависимости от решаемой задачи и диапазона возможностей.

Актуальным для задач управления рисками ЧС в условиях неопределенности является вопрос о цене получения дополнительной информации о ситуации, который рассматривается также в рамках игр с природой. В данном случае сравниваются оптимальные стратегии при наличии дополнительной информации и без нее. Цена информации определяется, исходя из принципа: стоимость информации не может превышать разницу выигрышей, полученную за счет изменения стратегии в результате обладания данной информацией.

В работе [2] анализируются методы принятия гарантированных решений, основанных на риске, в многокритериальных и конфликтных задачах при учете неопределенных факторов. Предполагается, что о неопределенностях известны лишь границы изменений параметров, а их статистические характеристики не известны. В [2] дается строгая формализация подходов к учету неопределенностей, рассматриваются существование и построение гарантированных решений, а также бескоалиционная игра  $N$  ЛПР при неопределенности и математическая модель принятия решений при неопределенности в однокритериальной задаче:

$$\langle X, Y, f_1(x, y) \rangle,$$

где  $x \in X \subseteq R^n$  – множество возможных решений;  $y \in Y \subseteq R^m$  – множество неопределенностей (реализуемых независимо от действий игрока, множество  $Y$  считается известным);  $f_1(x, y)$  – критерий.

Наличие нескольких критериев в задачах управления также можно интерпретировать как неопределенность. Для манипулирования совокупностью критериев разработано множество методов. Например, известный метод анализа иерархий Саати, получивший широкое применение в задачах управления, актуален на сегодняшний день. Этот метод позволяет получить объективные математические соотношения между альтернативами на основе субъективного взгляда на ситуацию ЛПР. В работе [2] рассматриваются многокритериальные задачи, причем наряду с набором критериев принимается во внимание дополнительный фактор неопределенности, моделируемый вторым игроком. Неопределенность представлена параметром  $y \in Y \subseteq R^m$ , для которого известны лишь границы. Игровая модель имеет вид  $\langle X, Y, f(x, y) \rangle$ , где  $f = (f_1, \dots, f_N)$  – векторный критерий. На основе принципа Сэвиджа строится гарантированное решение задачи. Таким образом, неопределенность учитывается в виде интервальных параметров, влияю-

щих на критерий. Одна из основных рекомендаций – вместо принципа максимума, ориентированного на худший вариант, использовать более рациональный принцип минимаксного сожаления Сэвиджа.

В теории информации энтропия  $H$  – теоретико-информационная мера степени неопределенности случайной величины. Для дискретной случайной величины  $X$ , заданной рядом распределения  $x_i - p_i$ ,  $H(X) = \sum(-p_i \log p_i)$ . Принято, что  $0 \log 0 = 0$ . Логарифм обычно берется по основанию 2, реже натуральный или десятичный. Считается, что наибольшей неопределенностью обладает вариант равновероятных  $n$  исходов (все  $p_i = 1/n$ ). Энтропия при этом максимальна  $H = \log n$ . В случае полной определенности исхода ( $n = 1$ ) энтропия минимальна  $H = 0$ . Процесс извлечения информации связан с уменьшением неопределенности. Мемой неопределенности события служит вероятность.

Вводится мера количества информации  $I(X, Y)$  в одной случайной величине  $X$  о другой  $Y$ . Если  $X$  и  $Y$  – дискретные случайные величины, то  $I(X, Y) = \sum \sum p_{ij} \log(p_{ij}/p_i q_j)$ . В частности,  $I(X, X) = H(X)$ .

Значения условий функционирования систем управления известны не точно, но это не должно приводить к ЧС. Одним из требований к управлению является устойчивость к неустранимой «размытости» исходных данных. Это положение разработано для динамических систем, функционирование которых описывается дифференциальными уравнениями. Обычно рассматриваются малые вариации начальных условий. Формализованное представление устойчивости впервые было представлено А.М. Ляпуновым. Кроме этого, имеется много других концепций и определений устойчивого движения – в смысле Лагранжа, Пуассона и т.д. В частности, важное значение имеют понятия орбитальной и структурной устойчивости. Для линейных систем с постоянными коэффициентами существуют простые методы проверки устойчивости без нахождения решений. Устойчивость исследуют по характеристическому полиному или по функции Ляпунова.

В работе [10] на материале простейших дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами показано, как привычные преобразования могут изменить корректность решаемых задач, что в практических приложениях может стать источником опасных явлений. Установлено, что даже простейшие преобразования могут нарушать «равносильность» уравнений (в смысле устойчивости). Такими преобразованиями являются: перенос членов из одной части уравнения в другую, умножение на число, почленное дифференцирование, изменение порядка, сведение к нормальной форме Коши. Показано, что свойство сохранения устойчивости при вариациях коэффициентов может появляться и исчезать при эквивалентных преобразованиях уравнений.

Таким образом, существующие методы исследования не всегда гарантируют правильный ответ на вопрос об устойчивости, что может быть важно при управлении безопасностью систем в условиях ЧС.

Учет фактора неопределенности в рамках оценки промышленно-экологического риска ведет начало с 80-х гг. XX века. Первые работы касались безопасности ядерных реакторов, объектов химической промышленности, гидротехнических сооружений, а параметрическая неопределенность представлялась в основном в виде промежутка возможных значений [6].

Большое сомнение вызывают экспертные оценки аварий и ЧС. Так, специально организованный анализ техногенного риска, выполненный различными группами экспертов при одинаковых исходных данных и методической базе, дал различие в итоговых результатах в несколько порядков [6]. В работе [4], посвященной психологии принятия решений, убедительно показано, что люди (эксперты), даже знакомые с теорией вероятностей и математической статистикой, полагаются (например, в условиях дефицита времени) на упрощенные эвристики, стереотипы – для оценки вероятности и прогноза неопределенных величин – и совершают ошибки, порой очень значительные. Это заставляет подчеркнуть существенную роль субъективного (когнитивного, человеческого) фактора.

Выделяют следующие виды неопределенностей: объективная (стохастическая) и субъективная (недостаток знаний), модельная и параметрическая. Примерами источников неопределенности для экологического риска являются: неоднородность популяции, воздействие малых концентраций опасных веществ, перенос опытных данных по животным на человека и т.д. Для сравнительной оценки промежутка возможных значений какого-либо параметра вводится «фактор неопределенности»  $UF$  – отношение верхней границы промежутка к нижней. Если это возможно, оцениваются вероятностные (статистические) характеристики промежутка. Наибольший вклад в бюджет неопределенности вносят: человеческий фактор, взаимодействие элементов технических систем, качество баз данных о надежности элементов, большое число возможных сценариев. При учете неопределенности возможен целый спектр подходов (критериев): пессимистический (ориентация на наиболее неблагоприятный вариант), оптимистический (на самый благоприятный), смешанный.

В настоящее время имеют место различные классификации источников неопределенности. Так, для природных факторов выделяют два типа – объективная изменчивость (вариабельность, тип А) и недостаточность (неполнота, неточность, тип В) знаний. Оба типа предлагается описывать функцией накопленной вероятности:  $p(Y > y)$  для А,  $q(Y \leq y)$  для В.

Другая составляющая (вид проявления) человеческого фактора – это коммуникативная неопределенность, возникающая при обмене информацией о риске. Поэтому важно однозначное толкование терминов и понятий. Это устранимый источник неопределенности.

Еще одна классификация источников неопределенности связана с этапами исследований: постановка задачи (выбор сценария), концептуальная модель задачи, расчетная модель, оценка параметров модели, ошибки в расчетах и документировании.

На практике применяются как качественные и количественные, так и смешанные оценки неопределенности. Для количественного выражения неопределенности используются точечные и интервальные оценки, полученные на базе вероятностных и имитационных моделей, а для качественного – экспертные и нечеткие оценки.

Перспективным направлением в теории алгебраических систем сегодня является недоопределенная математика (Н-математика) [9]. В ней используется термин «недоопределенность», а все компоненты этого понятия именуются «НЕ-факторами». Формальный аппарат этой теории оперирует собственной класси-

фикацией НЕ-факторов. Вводится модель системы в виде  $T = (X, R)$ , где  $X$  – переменные,  $R$  – отношения. Для переменных  $x \in X$  вводятся понятия: денотат (реальная величина) и сигнификат (обозначение величины). Любому отношению  $r_j \in R$  ставится в соответствие сопряженный предикат  $P_j$ , имеющий значение ИСТИНА на  $r_j$ . Пересечение предикатов  $PT = \bigwedge P_j$  образует общий предикат модели, сопряженное  $PT$  отношение на множестве переменных обозначается как  $RT$ . Считается, что  $T$  – правильное описание своего денотата  $D$ , если  $D \subseteq RT$ , то есть  $PT(D) = \text{ИСТИНА}$ . Этот математический аппарат позволяет проводить сравнение точности моделей по их отношениям  $RT$ , то есть определять противоречивость моделей.

Операции над недоопределенными значениями определяются через алгебру  $Q = (A, F)$  на классе объектов  $A$ , замкнутом относительно множества  $F$  возможных операций. Алгебре  $Q$  ставится в соответствие недоопределенная алгебра или Н-расширение  $Q$ , вводятся Н-переменные и функции над ними, а также не всюду определенные функции (операции).

В работе [17] также обсуждаются вопросы представления и обработки не полностью определенной информации логическими средствами. Предложена концептуальная основа нечеткого логического вывода на неопределенных знаниях. Трактовка неопределенности выполняется на основе теоретико-множественного формализма, причем логический вывод представляет собой обобщения известных правил классической логики. Под предметной областью понимаются объекты и отношения между ними. Информация о предметной области является неполной, неточной, противоречивой. Логическая неопределенность подразумевает наличие неоднозначных предикатов. Случайность, нечеткость считаются имманентными свойствами характеристик объектов, а неопределенность трактуется как степень незнания точных количественных значений этих характеристик. Оперирование с неопределенностью должно содержать язык представления неопределенности и механизм вывода для него.

Неопределенность знаний моделируется интервальной формой представления истинности. С помощью функции принадлежности вводятся нечеткие множества и элементарные высказывания. Нечеткие константы – фиксированные величины из интервала  $[0; 1]$ . Степень истинности нечетких высказываний оценивается на основе нечетких констант. В качестве меры нечеткой надежности («размытости») утверждений используется интервальная оценка степени истинности.

### **Выводы по результатам анализа методологии исследования**

Проведенный аналитический обзор методов и способов учета неопределенности не претендует на исчерпывающую полноту. Следует подчеркнуть, что перечисленные подходы не являются независимыми, многие из них «переплетаются», дублируют друг друга. Тем не менее, можно выделить некоторые общие закономерности.

На примере параметра  $x$  поясним возможные степени неопределенности знания (рис. 1). Для параметра  $x$  могут быть известны: точное или приближенное значение; набор возможных значений; интервал значений; точные вероятностные характеристики одного значения, набора значений, интервала значений; приближенные вероятностные характеристики, интервалы для вероятностных характе-

ристик. То есть на «оси неопределенности» введено отношение порядка: при движении слева направо от интервала к интервалу неопределенность увеличивается.

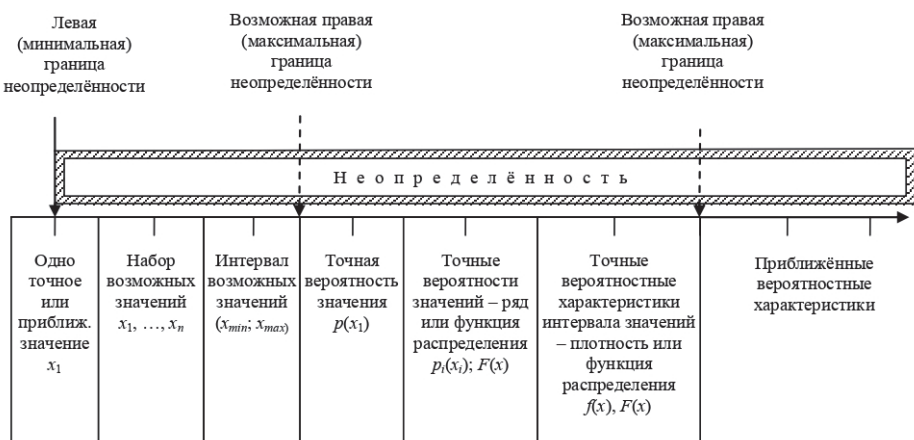


Рисунок 1 – Варианты параметрической неопределенности

Границы неопределенности определяются по-разному. Крайнее левое (минимальное) положение границы (между определенностью и неопределенностью) может быть установлено на одном точном значении параметра. Правая возможная граница неопределенности не фиксирована. В конкретном исследовании эта граница определяется уровнем знаний ЛПР, а также возможностью уточнения информации.

На основе концептуальной схемы исчисления параметрической неопределенности, приведенной на рисунке 1, можно вводить различные метрики неопределенности, количественные и полуколичественные шкалы. Аналогичные модели можно построить и для других видов неопределенности. Наиболее популярным и продуктивным в настоящее время является интервальное представление неопределенности.

В качестве основных источников неопределенности для задач управления региональной промышленно-экологической безопасностью в условиях ЧС можно выделить: человеческий фактор, природные явления, функционирование технических систем, а также смешанные источники (рис. 2). Данная классификация отражает структуру объекта управления – региональной био-социо-экономической системы и может служить основой для дальнейшей детализации по каждой из ее составляющих.

В качестве базы для иной классификации можно определить структуру системы (органа) управления борьбой с промышленно-природными ЧС на региональном уровне, включающую: организацию, функционирование, характеристики сил и средств борьбы с ЧС, задачи управления. Возможны и другие варианты классификации источников неопределенности. Каждая из классификаций отражает определенный признак (аспект) неопределенности и может быть использована для ее комплексной оценки.

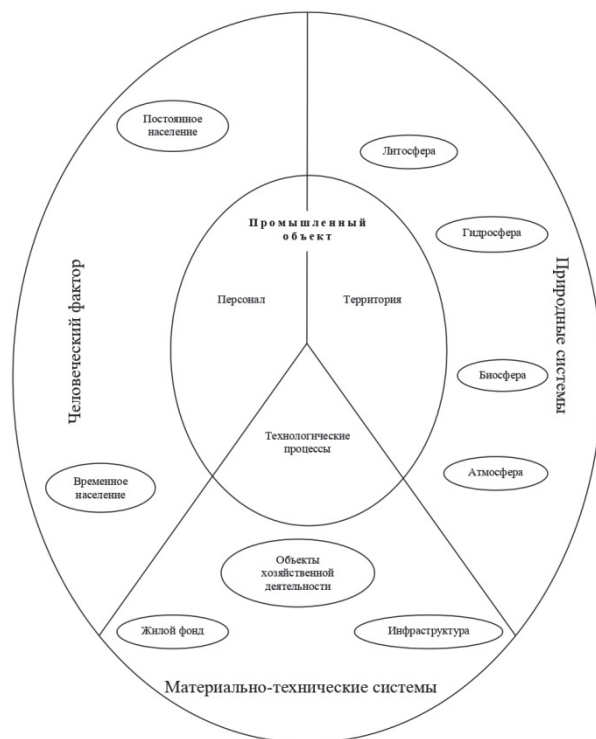


Рисунок 2 – Источники неопределенности

Систематизация основных подходов к учету неопределенности схематично показана на рисунке 3.

Дисциплины, разделы, направления	Показатели, критерии, методы
Теория погрешностей	Абсолютная и относительная погрешность
Метрология	Среднеквадратическое отклонение; доверительные границы; стандартная, суммарная и расширенная неопределённость; плотность распределения
Теория вероятностей и математическая статистика	Вероятность, закон распределения, математическое ожидание, дисперсия и их оценки; точность и надёжность оценок, доверительный интервал
Теория игр	Критерии Байеса, Вальда, оптимизма, Гурвица, Сэвиджа; цена дополнительной информации; границы неопределённостей
Многокритериальные задачи	Метод анализа иерархий, методы теории игр
Теория информации	Энтропия – мера неопределённости информации
Теория устойчивости	Устойчивость по Ляпунову, Лагранжу, Пуассону, орбитальная и структурная устойчивость
Оценка риска ЧС	Качественные, полуколичественные, количественные оценки; точечные и интервальные оценки; вероятностные модели; статистическое моделирование; системно-динамическое моделирование; нечёткие оценки
Алгебраические системы	НЕ-факторы, сравнение моделей по точности, операции над недоопределёнными значениями; нечёткий логический вывод на неопределённых знаниях, интервальная форма представления истинности, резолюционный принцип, мера размытости высказываний

Рисунок 3 – Подходы к учету неопределенности

Таким образом, можно констатировать, что проблема учета неопределенности в задачах управления сложными системами носит междисциплинарный



характер, обусловленный разнородностью ее компонентов (психологические, технические, природные, модельные и др.) и соответствующих им атрибутов.

Установлено, что вероятностно-статистические [7] и теоретико-игровые [15] методы учета неопределенности хорошо зарекомендовали себя на практике для решения задач управления рисками нарушения безопасности в условиях ЧС природного и техногенного характера. Нечеткие [5], матричные [11] и мультиагентные [8] модели, а также энтропийные [3], категориальные [16] и имитационно-экспертные [8] методы, наоборот, лучше подходят для учета человеческого фактора и исследования неопределенностей в условиях критических ситуаций и кризисных явлений в социально-экономической сфере при решении задач управления сложными социально-экономическими объектами и системами, для которых не может быть все заранее учтено и расписано.

### **Подходы к учету неопределенности в системах безопасности**

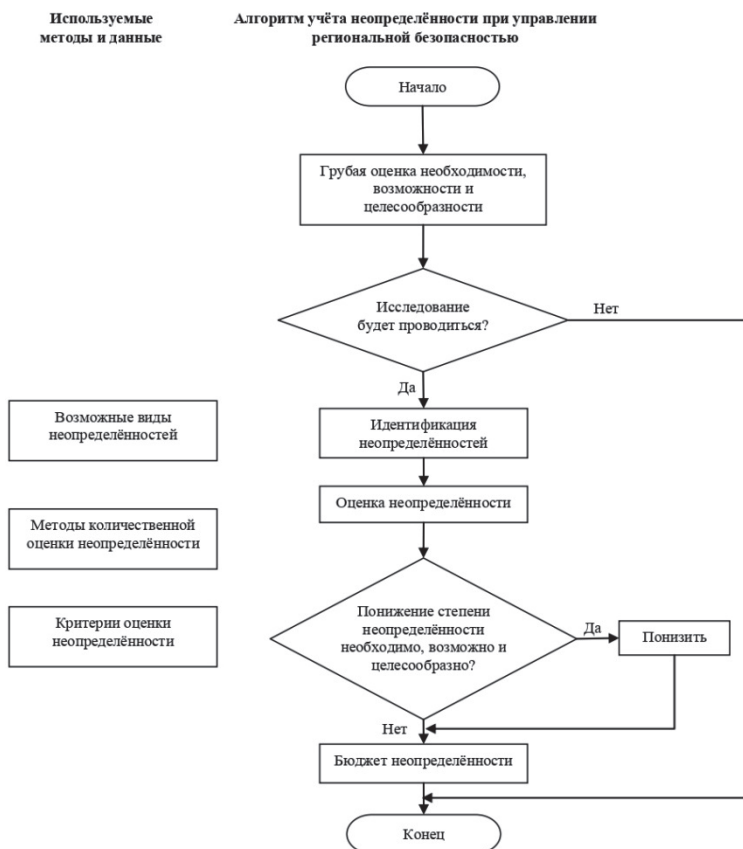
Предлагается два базовых подхода к встраиванию исследования и учета неопределенности в информационно-аналитическую систему управления региональной промышленно-природной безопасностью. Первый подход подразумевает оценку неопределенности для всех этапов управления на основе нормативных планирующих документов: планов, деклараций, паспортов безопасности, регламентов, стандартов. Второй предполагает некоторую самостоятельность исследования в рамках отдельной подсистемы и/или обособленного документа. На рисунке 4 приведен обобщенный алгоритм исследования неопределенности в системе управления региональной безопасностью [13], построенный на основе ранее выполненных работ [8, 18] и проведенного выше обзора.

Первоначально следует определить, требуется ли в принципе проводить оценку неопределенности. Этот вопрос решается экспертно или с помощью экспресс-методов на основе совместного применения критериев необходимости, возможности и целесообразности. Необходимость отражает уровень риска (пара «вероятность-ущерб»). Возможность означает наличие методов и способов оценки. Целесообразность определяется по критериям стоимости и времени.

Если принято решение о проведении оценки, на первом этапе идентификации выявляются основные подлежащие исследованию виды неопределенности. Затем по выявленным видам производится оценка степени неопределенности. На заключительном этапе решается вопрос о снижении уровня. Результат исследования оформляется в виде документа «бюджет неопределенности», как это принято в метрологии. Более подробно эти этапы алгоритма рассматриваются в работе [18].

Исследование неопределенности в целом обладает следующими специфическими особенностями, по сравнению с другими задачами и планируемыми документами по управлению безопасностью: широкая область применимости (актуально для всех задач и этапов управления), недостаточная информационная и методическая обеспеченность, междисциплинарность, многокритериальность, вариантность.

Все это свидетельствует об относительной самостоятельности исследования и необходимости разработки отдельного документа по исследованию неопределенности поведения и управления социально-экономическими объектами и группами таких объектов.



**Рисунок 4 – Обобщенный алгоритм исследования неопределенности**

На рисунке 5 приведена предлагаемая структура отчета «бюджет неопределенности». Сверху представлены регулирующие документы вышестоящих уровней иерархии, снизу – остальные возможные нормативы. Отчет разбит на три составные части. Первый блок содержит исходную информацию о решаемой задаче, создаваемом документе и объекте управления. Он позволяет выявить возможные источники неопределенностей. Второй блок посвящен количественным методам оценки неопределенности. Третий раздел – блок информационно-аналитической поддержки принятия решений по управлению неопределенностью. Таким образом, разработка документа нацелена на комплексное исследование неопределенности управления.



Рисунок 5 – Типовой документ по исследованию неопределенности

Разработка «бюджета неопределенности» также учитывается в алгоритме функционирования информационно-аналитической системы борьбы с ЧС (рис. 6). После определения объекта управления и типа документа осуществляется автоматизированный выбор нормативно-методических материалов. Взаимодействие с архивными данными (ранее проведенные исследования по этим или аналогичным объектам) позволяет рационально провести разработку, не начиная ее каждый раз «с нуля». Генерация структуры и содержания отчета и количественных оценок осуществляются по выбранным шаблонам и методикам. При необходимости выполняется сбор дополнительной информации.

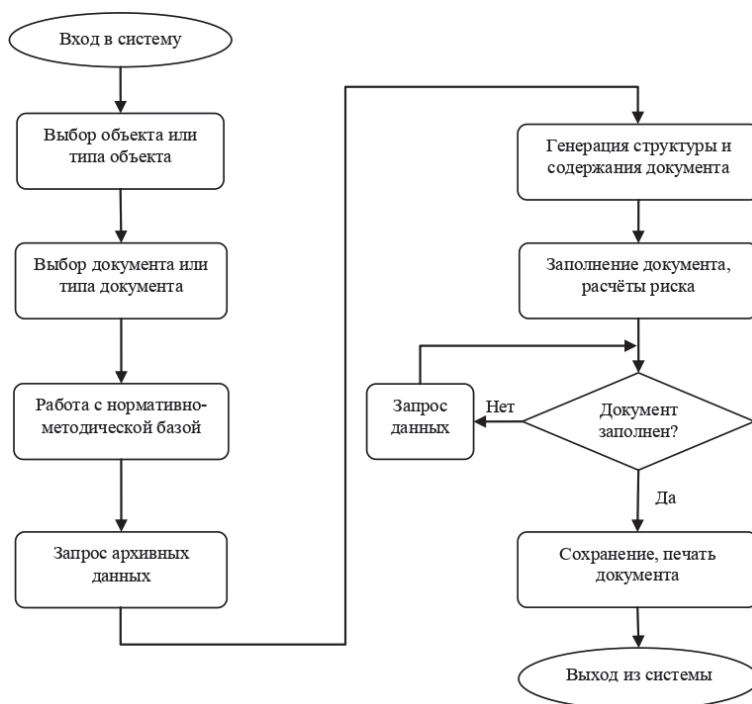


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования системы

Таким образом, для повышения качества управления рисками ЧС и эффективной работы многоуровневой распределенной системы обеспечения региональной безопасности, приведенные и предложенные нами методы учета неопределенности должны применяться совместно, поскольку комбинированный учет различных видов неопределенностей ориентирован на управление сложными динамическими объектами, в поведении которых можно выделить некую детерминированную часть, поддающуюся детальному анализу, расчету и жесткому планированию, и недетерминированную часть, для которой такой анализ практически невозможен. Группы таких объектов образуют региональные системы.

### Заключение

В ходе исследования получены следующие результаты:

1. Систематизирована информация по методологии учета неопределенности в сфере управления риском и безопасностью.
2. Для анализа параметрической неопределенности разработана концептуальная модель исчисления неопределенности, охватывающая широкий круг задач и допускающая дальнейшую количественную формализацию. Предложенная конструкция является теоретической основой для построения концептуальных моделей измерения других видов неопределенностей.
3. Предложена классификация неопределенностей, основанная на структуре объекта и органа управления и ориентированная на задачи обеспечения региональной промышленно-экологической безопасности. Классификация определяет источники и атрибуты неопределенности, которые должны быть учтены для ее комплексной оценки.

4. Разработан обобщенный алгоритм учета неопределенности в задачах управления безопасностью региона, отражающий текущий уровень информационно-методической обеспеченности процесса принятия решений и обеспечивающий поддержку управления рисками.

5. Определены структура и состав типового планирующего документа по учету неопределенности, что позволяет на его основе проводить анализ и комплексную оценку неопределенности в системе управления региональной безопасностью.

Дальнейшие исследования будут направлены на формализацию методов учета неопределенности в задачах управления региональной безопасностью, оценку применимости этих методов для конкретных задач риск-анализа чрезвычайных ситуаций, а также на разработку математических и компьютерных моделей измерения различных видов неопределенности, возникающих в процессе управления безопасностью сложных систем.

Исследование проводилось в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (тема НИР № 0226-2019-0035). Отдельные элементы работы реализованы при поддержке РФФИ (проект № 18-07-00167-а).

#### *Литература*

1. Бреер В.В., Новиков Д.А., Рогаткин А.Д. Управление толпой: Математические модели порогового коллективного поведения // М.: УРСС. 2016. 168 с.
2. Жуковский В.И., Жуковская Л.В. Риск в многокритериальных и конфликтных системах при неопределенности / под ред. В.С. Молостова // М.: ЛКИ. 2017. 272 с.
3. Игнатъев М.Б. Просто кибернетика // СПб.: Страта. 2016. 248 с.
4. Канеман Д., Словик П., Тверски А. Принятие решений в неопределенности. Правила и предубеждения. 2-е изд. пер. с англ. // Харьков: Гуманитарный Центр. 2018. 536 с.
5. Ключин А.Ю., Кузнецов В.Н., Богатиков В.Н. Модели и методы принятия решений в сложных системах управления в условиях расплывчатой неопределенности // Тверь: ТвГТУ. 2017. 188 с.
6. Колесников Е.Ю. Количественное оценивание неопределенности техногенного риска // Проблемы анализа риска. 2013. Т. 10. № 2. С. 48-71.
7. Малинецкий Г.Г. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика // М.: Наука. 2000. 432 с.
8. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике // Апатиты: КНЦ РАН. 2016. 222 с.
9. Нариньяни А.С. Введение в недоопределенность // Проблемы информатики. 2018. № 3(40). С. 61-81.
10. Петров Ю.П., Петров Л.Ю. Неожиданное в математике и его связь с авариями и катастрофами. 4-е изд., перераб. и доп. // СПб.: БХВ-Петербург. 2005. 240 с.
11. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С. Управление линейными системами при неопределенностях и внешних возмущениях // М.: УРСС. 2014. 560 с.

12. Прогнозирование социально-экономического развития региона: учет неопределенности и управление рисками / Т.Б. Лыгденова и др. // М.: Русайнс. 2017. 174 с.
13. Путилов В.А., Маслобоев А.В., Быстров В.В. Инструменты информационной поддержки управления региональной безопасностью // История науки и техники. 2019. № 4. С. 11-25.
14. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения // М.: Стандартиформ. 2014. 60 с.
15. Сигал А.В. Теория игр для принятия решений в экономике // Симферополь: Диайпи. 2014. 308 с.
16. Цыгичко В.Н., Черешкин Д.С., Смолян Г.Л. Безопасность критических инфраструктур // М.: УРСС. 2019. 200 с.
17. Шестаков А.А. Логическое моделирование в условиях неопределенности // Апатиты: КНЦ РАН. 1996. 182 с.
18. Яковлев С.Ю. Проблема учета неопределенности при управлении региональной безопасностью // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. Апатиты: КНЦ РАН. 2017. № 3. Вып. 8. С. 54-61.

УДК 621.794

**Особенности ориентированной пластической деформации  
в стержнях прямоугольного сечения**

**М.С. Поярко**в, кандидат технических наук, доцент,  
**М.Л. Скр**ябин, кандидат технических наук, доцент,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Вятская государственная сельскохозяйственная академия  
(ФГБОУ ВО Вятская ГСХА), г. Киров

*В статье рассмотрены особенности эффектов ориентированной пластической деформации в стержнях прямоугольного сечения. Влияние изменений порогов упругого сопротивления заключается в том, что в случаях, когда изделия подвергаются нагрузкам в тех же направлениях, в которых совершались и предшествующие пластические деформации, границы упругого сопротивления расширяются. При возрастании деформаций количество очагов увеличивается и может достигать опасного развития. Поскольку остаточные напряжения, как и напряжения от прилагаемых нагрузок, всегда каким-то образом ориентированы, то результаты определяются сложением всех составляющих. Следует подчеркнуть, что широко распространенное истолкование криволинейных участков диаграмм нагружения в качестве символизирующих упрочнение материалов не может быть положено в основу выбора расчетных параметров. Самостоятельными объектами применения расчетной системы могут служить определения самих остаточных напряжений с помощью выводимых расчетных зависимостей.*

Пластическое деформирование, упругая деформация, порог упругого сопротивления, остаточные напряжения.

**Features of oriented plastic deformation in rods of rectangular  
cross-section**

**M.S. Poyarkov**, associate Professor,  
**M.L. Scriabin**, Ph. D., associate Professor,  
Federal state budgetary educational institution of higher professional education  
Vyatka state agricultural Academy  
(University at Vyatka state agricultural Academy), Kirov

*The article deals with the features of the effects of oriented plastic deformation in rectangular rods. The effect of changes in elastic resistance thresholds is that in cases where products are subjected to loads in the same directions in which previous plastic deformations were performed, the boundaries of elastic resistance expand. Some elements of structures exhaust reserves in the initial stages of loading, causing early appearance of foci of destruction. With increasing deformities, the number of foci increases and can reach dangerous development. Since the residual stresses, as well as the stresses from the applied loads, are always oriented in some way, the results are*

*determined by adding all the components. Turning to the question of the physical prerequisites for using more convenient parameters, it should be emphasized that the widespread interpretation of curved sections of loading diagrams as symbolizing the strengthening of materials cannot be used as the basis for choosing design parameters. Independent objects of application of the calculation system can be the determination of the residual stresses themselves with the help of deduced calculation dependencies.*

Plastic deformation, elastic deformation, elastic resistance threshold, residual stresses.

Пластический процесс представляет собой одинаковое по величине и знаку деформирование каждого элемента сечения – растяжение или сжатие. Остающийся после разгрузки эффект преимущественно сводится к изменениям порогов упругого сопротивления и, в частности, к так называемому деформационному упрочнению. Если же пластический процесс вызывает неодинаковое деформирование различных участков сечения (изгиб, кручение, волочение), то помимо изменения порогов упругого сопротивления в изделиях возникают остаточные напряжения.

Влияние изменений порогов упругого сопротивления заключается в том, что в случаях, когда изделия подвергаются нагружениям в тех же направлениях, в которых совершались и предшествующие пластические деформации, границы упругого сопротивления расширяются. При противоположных направлениях границы суживаются за счет протекания эффекта Баушингера.

Таким образом, об упрочнении, вызываемом пластической деформацией, приходится говорить с известной осторожностью, помня при этом о роли направлений.

Неоднозначность результатов в прогнозировании прочности вызывается не только изменениями направлений. Не меньшая роль принадлежит и величинам деформаций. Известно, что всякий пластический процесс вызывает неодинаковые деформации элементов структур (блоки, зерна, кристаллы). Объясняется это их произвольной ориентацией в отношении воздействующих сил, а следовательно, и наличием различных резервов для безопасных воздействий.

Поэтому, несмотря на возрастания упругого сопротивления, служебные показатели способны ухудшаться, что и обязывает усматривать в пластических процессах не только позитивное, но и негативное влияние на конечные результаты.

Если суммы напряжений в рассматриваемых точках сечения становятся меньшими, чем напряжения при тождественных деформациях в изделиях, не подвергавшихся предварительной пластической деформации, то эти точки оказываются в более выгодном положении и, следовательно, для них достигается положительный эффект первичного нагружения. В противном случае эффект становится отрицательным, и это приходится учитывать при постановке изделий в эксплуатационные условия.

Для таких способов нагружения, как изгиб и кручение, благоприятное суммирование происходит только в поверхностных слоях и при условии, когда первичные и последующие деформации совершаются в одних и тех же направлениях. Отсюда следует, что если исходить из концепции о решающем влиянии



на стойкость поверхностных слоев и не принимать во внимание возможность появления поверхностных повреждений при больших деформациях, то выполнение требования о совпадении направлений является достаточным для достижения успеха.

Поскольку же наряду с вычитанием напряжений вблизи поверхности происходит их суммирование для точек в глубине сечения, то общая картина соотношений напряжений в различных зонах становится значительно сложнее, чем это часто признается. Следовательно, представление о наибольшей напряженности поверхностных слоев изогнутых и скрученных стержней не может автоматически переноситься на изделия, претерпевшие предварительные пластические деформации. Здесь же следует упомянуть о важном условии выполнимости прогнозируемых результатов. Если эффекты пластического процесса определены для заданных или найденных величин деформации, то в последующих нагружениях такие деформации не должны быть превышены. Это объясняется неизбежным перераспределением напряжений при возросшей деформации, в результате чего новые параметры пластического процесса могут определяться лишь из повторного расчета. К такому же разряду ограничений следует отнести и температурные воздействия, которые приводят к понижениям потенциалов аккумулированной энергии деформации, а следовательно, и к перераспределениям остаточных напряжений в поперечных сечениях.

Построение распространенных аналитических зависимостей для вычисления различных элементов прочностных расчетов во многом сходно с соответствующими зависимостями для упругой области. В расчетных системах в качестве аргументов фигурируют напряжения или деформации, а сами зависимости включают кроме аргументов константы материалов и размеры поперечных сечений [2, С.90].

Если исходить из того, что прочностные расчеты могут оправдываться лишь при таких величинах деформаций, при которых не утрачивается устойчивость материалов, то создается возможность существенно упростить расчетные формулы для одномерных задач и одновременно придать им большую общность.

Упрощение может быть достигнуто, если все параметры, в том числе упругие константы, численные значения которых не изменяются с развитием пластической деформации в границах устойчивости материалов, могут быть скомпонованы в независимые постоянные комплексы, определяющие размерности вычисляемых величин и их абсолютные значения при предельном упругом нагружении.

Общность же формул и дальнейшие упрощения могут быть достигнуты за счет использования таких расчетных параметров, которые в пластической области являются универсальными для всех материалов и всех способов нагружения. Предпосылкой для этого служит то, что процессы нагружения всех материалов после перехода границ упругого сопротивления описываются, в общем, сходными кривыми, очертания которых не зависят от упругих констант и не изменяются принципиально для разных способов нагружения [1, С.35].

Однако прежде чем говорить о более универсальных параметрах, необходимо отметить, что в результате обработки диаграмм нагружения обычно получают такие характеристики, как пределы пропорциональности и текучести, вре-

менное сопротивление, относительное удлинение, относительный сдвиг и поперечное сужение. С помощью названных характеристик диаграммы нагружения полностью не обрисовываются, поскольку на участках деформаций от известных величин пределов пропорциональности или текучести до известных величин временного сопротивления можно представить множество кривых с различной кривизной.

В результате регламентируемый стандартами объем информации о свойствах материалов не обеспечивает отражения закономерностей на пластических участках и обязывает прибегать к различным схематизациям, в числе которых линейная аппроксимация является наиболее распространенной.

В ряде случаев особенности реальных кривых учитываются теми или иными способами. Поскольку же для этого приходится прибегать к индивидуальным обработкам диаграмм при отсутствии каких-либо стандартов на методику, то нельзя исключать ни субъективизма в выборе схематизации, ни различия получаемых результатов при решении полностью тождественных задач.

Переходя к вопросу о физических предпосылках использования более удобных параметров, следует подчеркнуть, что широко распространенное истолкование криволинейных участков диаграмм нагружения в качестве символизирующих упрочнение материалов не может быть положено в основу выбора расчетных параметров. Дело в том, что представление об упрочнении не приводит к количественным критериям, с помощью которых закономерности в пластической области можно было бы описывать математическими средствами.

О повышении сопротивления материалов, подвергавшихся пластической деформации, можно говорить лишь тогда, когда за меру сравнения напряжений в каких-либо точках на нелинейных участках диаграмм принимать любые предшествующие величины и в том числе начальные пределы пропорциональности. Подобное сравнение, однако, неправомерно в математическом отношении, так как при этом не выполняется требование равенства деформаций, отвечающих сравниваемым напряжениям. Это несоответствие можно исключить, если количественную оценку происходящих изменений подчинить признанию того, что развитие пластической деформации символизирует не упрочнение, а непрерывное понижение жесткости материалов по сравнению с предельно высокими и постоянными ее величинами в упругой области.

При таком приеме оценки пластического процесса на нелинейных участках диаграмм величинам напряжений отвечают вполне определенные для данного материала предельные напряжения, называемые фиктивными. По сравнению с ними непрерывно возрастающие величины являются уже не большими, а меньшими при одних и тех же величинах деформации. Мерой подобных изменений служит отношение которое принимается в дальнейшем в качестве основного параметра для оценки развития пластической деформации.

Предлагаемый прием не является формальным, поскольку теоретические уровни упругого сопротивления очень высоки по сравнению с наблюдаемыми в действительности и, если у реальных материалов переходы в пластическую область наблюдаются в ранних стадиях, то это свидетельствует лишь об отрицательном влиянии дефектов в их структурах.

Очевидно, нельзя исходить из того, что средства борьбы с небла-

гоприятным влиянием дефектов полностью исчерпаны, а следовательно, нельзя признавать удачным понятие о «фиктивных» напряжениях, которые с физической точки зрения более правильно называть идеальными, имея в виду вероятность последующего более тесного приближения к этим величинам за счет технологических усовершенствований.

Существующий оценочный параметр, отражая отклонения от линейной зависимости, характеризует, таким образом, меру остающегося упругого сопротивления в каждой стадии деформации по сравнению с идеальными величинами, определяемыми модулями каждого материала при рассматриваемом способе нагружения. Поскольку уровни упругого сопротивления все же возрастают в результате применения пластических процессов по сравнению с начальными или предшествующими их значениями, то подобные возрастания являются лишь частичными и происходят за счет уменьшения полных деформаций на величины остаточных составляющих после этапов разгрузок. Остающиеся запасы деформационной способности, которые представляют собой новые границы устойчивости материалов, при этом уменьшаются и могут полностью утрачиваться.

По ряду причин приходится отказываться, от упрощающей линейной схематизации диаграмм нагружения, то в качестве второго параметра может быть принята любая величина, характеризующая интенсивность нелинейного изменения жесткости. В целом отпадает необходимость оперирования функциями напряжений и деформаций в качестве аргументов в промежуточных фазах решений, а также при различных исследованиях интересующих закономерностей.

Достоинством является также и то, что рассматриваемые параметры пригодны для описания закономерностей процесса деформирования любого материала, независимо от их констант и размеров, поскольку диаграммы нагружения всех упруго-пластичных материалов имеют принципиально один и тот же вид. Поэтому устанавливаемые связи для каждого способа нагружения и формы поперечного сечения оказываются общими для всех материалов и в том числе для неметаллов, если для них соблюдаются принимаемые гипотезы.

Далее благоприятной особенностью исследуемых параметров является их способность к значительному «развертыванию» масштабов области малых пластических деформаций и к соответственному «суживанию» области больших деформаций. В такой особенности, которая сводится к представлению деформаций в равномерном линейном масштабе, кроются определенные преимущества при изучении общих закономерностей, так как и в действительности все эффекты пластического процесса, имеющие отношение к оценке прочности, наиболее интенсивно развиваются вблизи упругой области и далее носят затухающий характер [3, С.10].

Приступая к определению объектов исследования, заметим, что поскольку в задачу ставится необходимость учитывать в оценке прочности не только изменения упругого сопротивления материалов (упрочнение), но и остаточные напряжения первого рода, то предстоит рассмотреть такие виды нагружения, при которых возникновение остаточных напряжений в принципе возможно.

Известно, что возникновение остаточных напряжений всегда является результатом неодинакового развития в сечениях пластических деформаций, обу-

словливаемым или внешними силовыми воздействиями, или тепловыми процессами. Материалы стержней предполагаются однородными и одинаково сопротивляющимися растяжению и сжатию, и, кроме того, перед первичными нагружениями в пластической области они свободны от остаточных напряжений первого рода.

Рассматривая вопрос о границах практической применимости выводимых зависимостей, следует подчеркнуть, что, поскольку они должны учитывать изменения порогов упругого сопротивления, следовательно, физическим ограничением служат деформации, в рамках которых наблюдаются такие изменения. Для конструктивных элементов машин и приборов деформации вблизи границы образования шеек недопустимы, следовательно, применимость формул за этим пределом полностью исключена.

Численные значения допустимых деформаций при указанном ограничении, разумеется, должны быть различными, так как различные материалы к моменту образования шеек или к моменту появления других признаков, характеризующих начало потери устойчивости материалов, способны претерпевать неодинаковые деформации, которые принято называть равномерными.

У более мягких материалов, в частности у аустенитных сталей и у алюминиевых сплавов, равномерные деформации могут достигать десятков процентов, поэтому все формулы не могут встретить узких ограничений.

У более твердых или высокопрочных марок стали величины модуля упругости, напротив, могут ограничиваться долями одного процента, и поэтому границами применимости всех формул должны служить относительно малые допустимые деформации. Следовательно, вводимые ограничения связаны с особенностями кривых нагружения, благодаря чему они в каждом случае легко устанавливаются из информации о свойствах материалов [4, С.150].

Таким образом, в настоящей работе не рассматриваются вопросы пластического течения и поэтому исключается распространение формул на такие технологические процессы, как гибка, штамповка, высадка и другие операции, самоцелью которых служит изменение форм, а средствами, в частности, является изгиб, выполняемый, однако, далеко за рамками равномерных деформаций. Отмеченное ограничение, а также заимствование параметров непосредственно из диаграмм, в свою очередь, освобождает от необходимости оперирования такими понятиями, как монотонная деформация, степень и интенсивность деформации, несовпадение координатных осей и другими категориями, свойственными широкой проблеме пластического течения.

Самостоятельными объектами применения расчетной системы могут служить определения самих остаточных напряжений с помощью выводимых формул. Такие задачи могут возникать даже и вне связи с оценкой прочности, поскольку оценка аккумулированной энергии деформации представляет самостоятельный интерес, например для прогнозирования изменений первоначальных форм и размеров изделий при всяких нарушениях равновесия внутренних сил.

*Литература*

1. Макаров П.В., Романова В.А., Балахонов Р.Р. Моделирование неоднородной пластической деформации с учетом зарождения локализованных пластических сдвигов на границах раздела // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 5. С.29-39.
2. Мельников Б.Е., Семёнов А.С. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и элементов конструкций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. Том 49. № 1. С. 86-97.
3. Мосолов А.Б. Описание сложных упругопластических процессов на основе эндохронной теории пластичности // Проблемы прочности. 1991. № 4. С.8-11.
4. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжения в конструкционных материалах // Л.: Машиностроение. 1990. 223 с.

УДК 621.762

**Многокритериальная оптимизация технологических параметров  
получения композиционного материала Pb-C  
и углеродного покрытия**

**С.Н. Сергеенко**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
доцент кафедры «Технология машиностроения, технологические машины  
и оборудование»,

**А.Н. Васильев**, аспирант кафедры «Технология машиностроения,  
технологические машины и оборудование»,

**Д.В. Василенко**, аспирант кафедры «Технология машиностроения,  
технологические машины и оборудование»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова», ЮРГПУ (НПИ),  
г. Новочеркасск, Ростовская область

*Предложена методика и проведена многокритериальная оптимизация значений технологических факторов получения порошкового композиционного материала Pb-C и углеродных покрытий. Определены оптимальные значения:*

*– содержания и типа армирующих нитей, обеспечивающих повышенный комплекс механических свойств при минимальном содержании армирующих нитей;*

*– содержания графита и продолжительности механической активации шихты, обеспечивающих повышенные значения прочности на срез и твердости композиционного материала Pb-C электрода свинцово-кислотного аккумулятора при утилизации отходов.*

*На основе проведенной многокритериальной оптимизации предложены улучшенные технологические схемы изготовления композитов.*

Многокритериальная оптимизация, композиционные материалы, порошковая металлургия.

**Multicriteria optimization of technological parameters for obtaining  
composite material Pb-C and carbon coating**

**S.N. Sergeenko**, Candidate of Technical Sciences, senior researcher, docent of the  
«Department of Mechanical Engineering, Technological Machines and Equipment»,  
**A.N. Vasiliev**, graduate student of the department Engineering Technology, Techno-  
logical Machines and Equipment,

**D.V. Vasilenko**, graduate student of the department Engineering Technology, Tech-  
nological Machines and Equipment,  
«Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)»,  
SRSPU (NPI), Novocherkassk, Rostov Region

*A technique is proposed and a multicriteria optimization of the values of technological factors for obtaining a powder composite material Pb-C and carbon coatings is carried out. The optimal values have been determined:*

- the content and type of reinforcing threads, providing an increased set of mechanical properties with a minimum content of reinforcing threads;

- the graphite content and the duration of the mechanical activation of the mixture, providing increased values of shear strength and hardness of the composite material Pb-C lead-acid battery electrode during waste disposal.

*Basierend auf der Multikriterien-Optimierung werden verbesserte technologische Schemata für die Herstellung von Verbundwerkstoffen vorgeschlagen.*

Multicriteria optimization, composite materials, powder metallurgy.

**Введение.** Методика многокритериальной оптимизации (МКО) нашла применение при исследовании и разработке технологий получения порошковых и композиционных материалов [1-3]. С целью повышения коррозионной стойкости в работе [4] предложена технология формирования углеродного покрытия на поверхности изделия. В качестве исходного компонента используют порошок графита ГК-1. На первом этапе порошок ГК-1 измельчают (2,4 кг) в мельнице АГО-2С с последующим введением гептана (в соотношении 1:1) и повторным размолотом (0,6 кг). Полученную смесь гептан-графит наносят (толщина покрытия 10 мкм) на стальную поверхность с последующей сушкой и лазерной обработкой в специальном устройстве. Устройство состоит из импульсного иттербиевого оптоволоконного лазера (мощность 50 Вт, длина волны 1,065 мкм) и рабочей камеры с контролируемой средой.

В работе [5] рассмотрен метод антикоррозионного покрытия с углеродными нанотрубками. Технология получения включает очистку металла от ржавчины, обезжиривание, нанесение грунтовочного и промежуточного слоя, с последующим нанесением покрытия углеродных нанотрубок. Данный метод позволяет повысить стойкость к воздействию агрессивной среды и продлить срок службы покрытия.

Рассмотренный метод эффективен для антикоррозионной защиты металлических конструкций. Однако необходимо учитывать повышенную стоимость нанотрубок по сравнению с углеродными волокнами типа ПАН. При проведении анализа способов нанесения покрытий учитывалась и безопасность воздействия углеродных нанотрубок. Проведенные исследования показали, что использование углеродных нанотрубок негативно влияет на здоровье человека [5].

Одним из перспективных направлений совершенствования технологии изготовления электродной пластины свинцово-кислотного аккумулятора является способ искрового плазменного спекания (ИПС). В работе [6] рассмотрен способ ИПС решетки электрода для свинцово-кислотного аккумулятора (СКА). В качестве исходных компонентов использовали свинец и свинцовый сплав, содержащий (масс.%): Sb-2; Cd-2; Pb-остальное для изготовления проволоки методом прессования с плавлением (диаметр волокон 8 и 15 мкм) с последующим нанесением Cd на их поверхность, после чего разрезали на кусочки (1 мм для Pb и 2,5 мм для свинцового сплава). Следует отметить, что волокна из свинцового сплава обладают повышенной прочностью и устойчивостью к коррозии в кислых средах. Полученные волокна смешивали в соотношении 9:1 в среде глицерина с последующим удалением глицерина вакуумным насосом, очисткой и сушкой. На

заключительном этапе производили твердофазное искровое плазменное спекание под давлением. Полученная пористая пластина электрода характеризуется равномерным распределением волокон и частиц порошка по объему и повышенной электропроводимостью за счет возможности заполнения пор электролитом [6]. При изготовлении электродов методами порошковой металлургии используют углерод в качестве легирующей добавки, обеспечивающей повышение эксплуатационной надежности АКБ. При исследовании различных форм графита установлено, что вид графита незначительно влияет на проводимость материала электрода, продлевает срок службы электродов, увеличивает их емкость, повышает коррозионную стойкость электрода и устойчивость к деградации [7, 8].

В ЮРГПУ (НПИ) предложена технология утилизации свинцового сплава решеток отработанного аккумулятора, обеспечивающая получение композиционного материала Pb-C на основе механически активированной шихты. С целью формирования композиционного материала Pb-C с повышенным комплексом механических свойств целесообразно провести многокритериальную оптимизацию технологических параметров механической активации шихты Pb-C.

**Постановка цели.** Цель – многокритериальная оптимизация значений технологических факторов, обеспечивающих повышенный комплекс механических и функциональных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи:

- МКО типа и содержание армирующих нитей, обеспечивающих повышенный комплекс механических свойств при минимальном содержании армирующих нитей;

- МКО содержания графита и продолжительности механической активации шихты, обеспечивающие повышенные значения прочности на срез и твердости композиционного материала Pb-C электрода свинцово-кислотного аккумулятора при утилизации отходов.

**Многокритериальная оптимизация технологических параметров получения композиционного материала Pb-C.** При МКО технологических параметров, обеспечивающих повышенные значения механических свойств, перспективным является использование комплексного показателя качества. Количественной оценкой такого показателя может служить обобщенная функция желательности  $D$ . Оптимизацию технологии производили, используя следующую шкалу «желательности»: превосходный ( $D=0,76-1$ ); высокий ( $D=0,68-0,76$ ); допустимый ( $D=0,6-0,68$ ), достаточный ( $D=0,5-0,60$ ), менее 0,5 – недопустимый уровень качества. Показатель  $D$  представляет собой среднее геометрическое желательностей:

- для двух выходных параметров

$$(1) \quad D_{12} = (d_1 d_2)^{1/2};$$

- для трех выходных параметров

$$(2) \quad D_{123} = (d_1 d_2 d_3)^{1/3},$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – значения желательностей, определяемых по формуле:

$$(3) \quad d_i = \exp(-\exp^{-y_i}),$$

где  $y_i$  – безразмерные величины, линейно связанные с  $i$ -ми выходными параметрами.



**Полученные результаты. Углеродное покрытие.** На основе результатов экспериментальных исследований технологии нанесения углеродных покрытий [4, 5] проведена многокритериальная оптимизация технологических параметров: линейной плотности ( $\rho$ ), толщины нитей ( $l$ ) и типа нитей, обеспечивающих повышенные значения прочности на разрыв ( $\sigma_b$ ), упругости ( $\epsilon$ ) и содержание армирующих нитей ( $C$ ) (таблица 1).

**Таблица 1 – Результаты многокритериальной оптимизации нанесения углеродного покрытия**

Технологические параметры		Параметры оптимизации [5]			Безразмерные величины			Уровень качества	
Тип нитей	$l$ , мм	$\sigma_b$ , МПа	$\epsilon$ , %	$C$ , масс. %	$u\sigma'$	$u\epsilon'$	$uC'$	$D_{123}$	Шкала «желательности»
ПАН	0,10	30	10	5	1,14	0,32	1,6	0,66	Допустимый
ПЕК	0,12	32	9	7	1,6	0	0,94	0,59	Достаточный
ПАН	0,13	28	14	10	0,69	1,6	0	0,57	
Вискоза	0,10	25	11	8	0	0,64	0,64	0,5	Не допустимый

Анализ результатов МКО (таблица 1) показал, что допустимый уровень качества ( $D_{123} = 0,66$ ) обеспечивается при максимальной линейной плотности (35 текс) и минимальных значениях толщины нити (0,10 мм). Заготовка с допустимым уровнем качества имела наивысшие показатели по плотности среди других (0,2 г/см<sup>3</sup>), а также прочность на разрыв конечного образца (30 МПа).

**Композиционный материал (КМ) Рb-С.** В ЮРГПУ (НПИ) рассмотрена технология получения горячекомпактированных композиционных материалов (КМ) Рb-С на основе стружковых отходов утилизированных электродов аккумуляторных батарей. На основе двухфакторного эксперимента изучено влияние содержания графита  $C_{ГК}$  и времени механической активации (МА)  $\tau_{МА}$  на относительную плотность формовок, твердость (HRR) и прочность на срез ( $\tau_b$ ) горячекомпактированного композиционного материала Рb-С.

Технология изготовления образцов при исследовании КМ Рb-С включала: утилизацию электродов АКБ путем переплава; получение крупных частиц (+450 мкм) свинцового сплава путем резания; приготовление шихты путем смешивания частиц сплава с порошком графита; механическую активацию (МА) шихты Рb-С в жидкой среде этилового спирта; рассев шихты; холодное прессование формовок; горячую штамповку с элементами экструзии (ГШЭЭ), определение механических свойств.

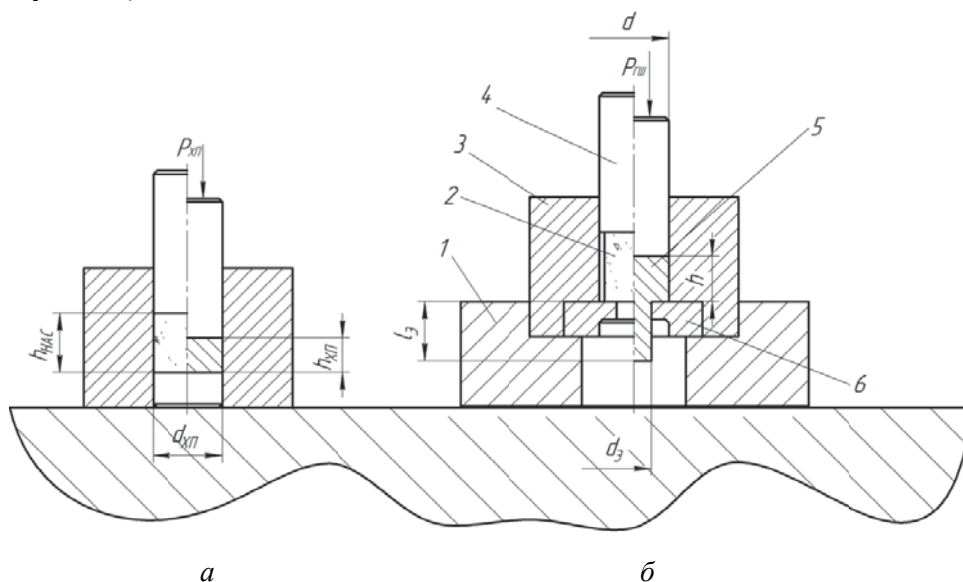
В качестве исходных материалов использовали стружку свинцового сплава (99,9% масс Рb и 0,1% масс Са), полученную из решеток отработанного кальциевого свинцово-кислотного аккумулятора [9] с неправильной, осколочной формой частиц, и порошок графита карандашного (ГОСТ 4404-78) ГК-3 (0-1

масс.%). Стружка свинца имела размеры 4x0,5x0,5 мм. Гранулометрический состав стружки представлен в таблице 2.

**Таблица 2 – Гранулометрический состав стружки свинцового сплава**

Массовая доля фракций, оставшихся на каждом сите, $\Delta R_i$ , масс.%									
< 35	$\geq 35$ < 63	$\geq 63$ < 100	$\geq 100$ < 160	$\geq 160$ < 200	$\geq 200$ < 250	$\geq 250$ < 315	$\geq 315$ < 400	$\geq 400$ < 450	$\geq 450$
0,1	0,1	0,3	0,6	0,3	0,4	2,9	5,0	3,3	87,2

Холоднопрессованную формовку (рисунок 1а) получали на гидравлическом прессе при давлении ( $P_{ХП}$ ) 500 МПа по схеме одностороннего прессования в жесткой матрице. Горячую штамповку с элементами экструзии проводили на копре с массой падающих частей 50 кг при температуре нагрева образца 473 К (рисунок 1б).



**Рисунок 1 – Схемы ХП (а), ГШЭЭ (б): 1 – подставка, 2 – нагретая пористая порошковая заготовка, 3 – матрица, 4 – пуансон, 5 – горячедеформированный порошковый материал, 6 – экструдер**

В результате исследования гранулометрического состава активированных шихт Рв-С выявлена агломерация мелких и крупных частиц при получении шихты в режиме смешивания. Увеличение продолжительности МА до экстремальных значений ( $\tau_{МА}=1,8$  кс) приводит к разрушению агломератов. Показано, что минимальные значения относительной плотности формовки зависят от содержания в шихте фракции с размерами +35-63 мкм, наблюдаются при введении 0,5 масс.% графита и продолжительности МА 1,8 кс.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено влияние продолжительности механической активации и содержания графита в шихте на гранулометрический состав шихты, параметры холодного прессования формовки, горячей штамповки с элементами экструзии и на свойства горячеком-

пактированного композиционного материала Pb-C. Выявлена агломерация мелких и крупных частиц при получении шихты в режимах смешивания и разрушения агломератов в процессе механической активации шихты Pb-C. Установлена взаимосвязь процессов размол и компактирования материала. Минимальные значения относительной плотности формовки наблюдаются при повышенном содержании в шихте фракции (+35-63 мкм). Установлена зависимость влияния содержания графита в шихте на выход фракции с размерами частиц менее 63 мкм, достигающая максимальных значений при  $C_{ГК}$ , равном 0,5 масс. %.

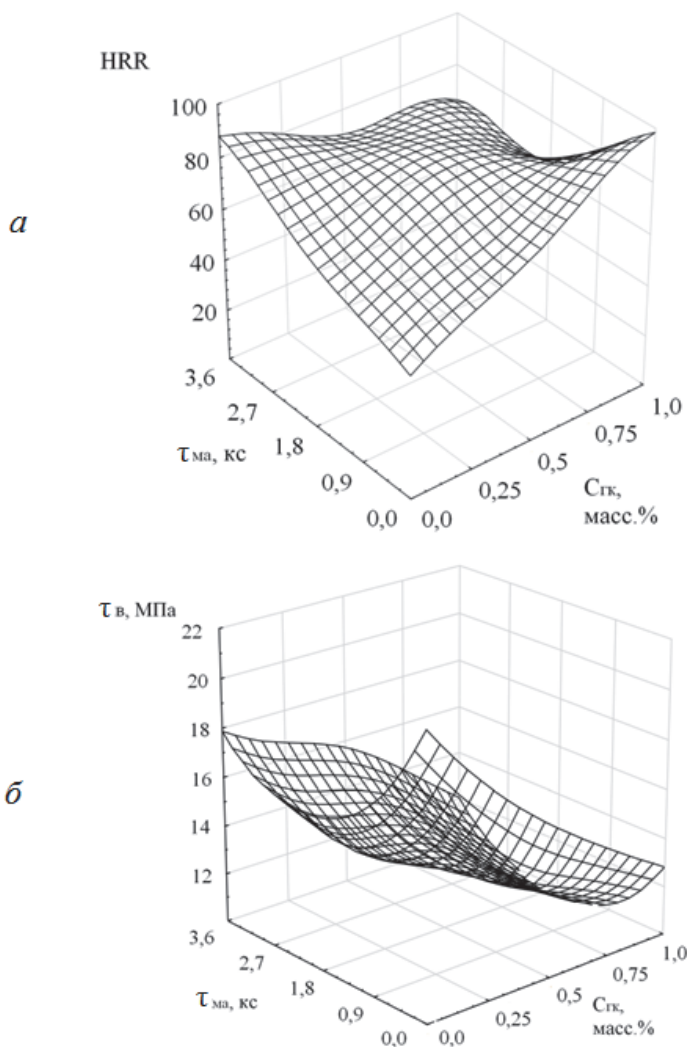


Рисунок 2 – 3D Spline модели влияния  $\tau_{МА}$  и  $C_{ГК}$  на HRR(а) и  $\tau_{В}$ (б)

Анализ 3D Spline моделей (построенных в среде Statistica) влияния технологических факторов на предел прочности при испытаниях на срез горячештампованного композиционного материала Pb-C показал следующее. Наибольшая

твердость HRR наблюдается при содержании графита в шихте 0,5 масс.%, и времени механической активации 1,8 кс, а также при  $C_{ГК}$  равном 0,75-1,0 масс.%, и продолжительности механической активации 0,9 кс (рисунок 2а, б). Увеличение содержания графита до критических значений  $C_{ГК}$  приводит к снижению предела прочности  $\tau_B$ .

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований горячештампованного композиционного материала Pb-C на основе активированной шихты проведена многокритериальная оптимизация содержания графита в шихте ( $C_{ГК}$ ) и времени механической активации ( $\tau_{МА}$ ), обеспечивающей повышенный комплекс значений предела прочности на срез ( $\tau_B$ ) и твердости (HRR) (таблица 3).

С учетом формул (1), (2) определили значения обобщенной функции желательности  $D_{123}$  для HRR,  $\tau_B$  и параметра, характеризующего наличие дефектов (в виде трещин) структуры материала.

**Таблица 3 – Результаты многокритериальной оптимизации технологических факторов получения КМ Pb-C**

Технологические параметры		Параметры оптимизации			Безразмерные величины $y_{HRR}$ , $y_{\tau_B}$ , $y_{уд}$			Уровень качества	
$C_{ГК}$ , масс. %	$\tau_{МА}$ , кс	HRR	$\tau_B$ , МПа	Дефект*	$y_{HRR}$	$y_{\tau_B}$	$y_{уд}$	D123	Шкала «желательности»
0,15	3,0	85	15,6	1	1,23	1,18	1,6	0,76	Превосходный
0,5	0	75	17,7	0	0,78	1,59	0	0,57	Достаточный
	1,8	84	13,7		1,17	0,8		0,55	
Примечание: *0 – трещина, наблюдаемая в микроструктуре материала образца; 1 – трещина не наблюдается в микроструктуре материала образца									

При оптимальных значениях технологических факторов ( $\tau_{МА}=3$  кс,  $C_{ГК}=0,15$  масс.%) обеспечивается повышенное качество консолидации композиционного материала, характеризующееся отсутствием выявленных границ раздела на межчастичных поверхностях свинцового сплава (рисунок 3) и повышенными значениями механических свойств (твердость 85 HRR и прочность при испытаниях на срез  $\tau_B=15,6$  МПа).

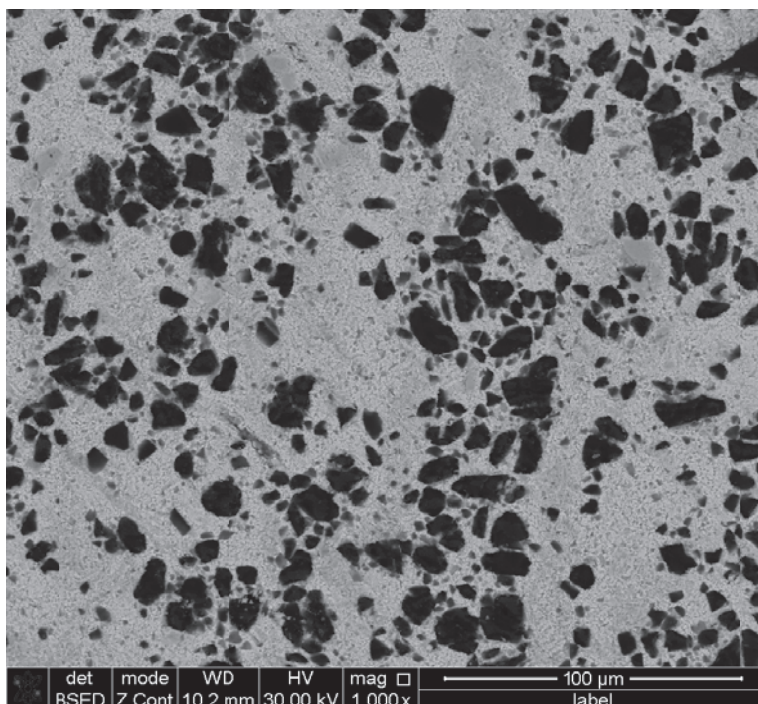


Рисунок 3 – РЭМ - изображение структуры КМ Рb-С

При переходе от технологии горячей штамповки к искровому плазменному спеканию под давлением обеспечивается консолидация КМ Рb-С без видимых границ раздела при использовании шихты, полученной смешиванием без механоактивации.

**Обобщение результатов МКО.** В результате проведенной многокритериальной оптимизации определены значения технологических факторов, обеспечивающих повышенный комплекс механических и функциональных свойств композитов (таблица 4). На основе проведенной МКО предложены улучшенные технологические схемы изготовления композитов.

Таблица 4 – Оптимальные значения технологических факторов

Исследованный композит	Оптимальные значения технологических факторов	Механические и функциональные свойства
Армирующие нити углеродного покрытия	Тип армирующих нитей – ПАН; содержание армирующих нитей 5 масс.%; длина нитей 0,1 мм	Предел прочности 30 МПа; относительное удлинение 10%
Композиционный материал Рb-С	Содержание графита в шихте 0,15 масс.%; продолжительность механической активации 3,0 кс	Твердость 85 HRR, предел прочности на срез 15,6 МПа

**Выводы.** При получении углеродного покрытия в качестве исходного

материала, в отличие от прототипа [5], используют не только порошок графита ГК-1, но и углеродные волокна. На основе многокритериальной оптимизации определены тип (ПАН) и содержание армирующих нитей (5 масс.%) при толщине нитей, равных 0,1 мм. Введение армирующих нитей обеспечивает получение сплошной пленки с повышенной прочностью.

В ЮРГПУ (НПИ) на основе многокритериальной оптимизации предложена усовершенствованная технологическая схема получения композиционного материала Pb-C на основе механически активированной шихты из утилизированных решеток свинцового сплава отработанного аккумулятора. Определены оптимальные значения технологических факторов: содержание графита (0,15 масс.%) и время механической активации (3,0 кс), обеспечивающие повышенные показатели твердости и предела прочности для материала электрода свинцово-кислотного аккумулятора.

#### *Литература*

1. Дорофеев Ю.Г., Сергеенко С.Н., Коломиец Р.В., Скрипец А.В. Оптимизация новой технологии изготовления высокопористых материалов, получаемых при обработке порошковых шихт Ni-Fe в высокоэнергетических мельницах для электродов химических источников тока // Перспективные материалы. 2008. № 3. С. 82-85.
2. Дорофеев Ю.Г., Дорофеев В.Ю., Сергеенко С.Н., Шевченко В.В. Многокритериальная оптимизация технологии компактирования триметаллических материалов с порошковыми поверхностными слоями и компактной подложкой // Перспективные материалы. 2005. № 6. С. 86-89.
3. Дорофеев Ю.Г., Сергеенко С.Н., Ромачевский Е.В. Многокритериальная оптимизация инфильтрации порошковых материалов железо-бронза // Новые материалы и технологии их получения: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., 15 окт. 2013 г., г. Новочеркасск. Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова // Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). 2013. С. 32-35.
4. Решетников С.М., Гильмутдинов Ф.З., Писарева Т.А., Харанжевский Е.В. Патент RU2591826. Способ нанесения коррозионно-стойкого углеродного покрытия на поверхности стали. Опубликовано 10.04.2016. Бюл. № 10.
5. Колпаков А.Я., Инкин В.Н., Уханов С.И. Патент RU2240376. Способ формирования сверхтвердого аморфного углеродного покрытия в вакууме. Опубликовано 20.11.2004. Бюл. № 15.
6. Жао Юннуо. Патент CN2152111. Электродная пластина свинцового кислотного аккумулятора и способ ее изготовления. Опубликовано 27.06.00. Бюл. № 18.
7. Wislei R. Osotio. Electrochemical corrosion of Pb–1 wt% Sn and Pb–2.5 wt% Sn alloys for lead-acid battery applications // Journal of Power Sources. 2009. № 194. P. 1120-1127.
8. Huanhuan Nao, Kailun Chen, Hao Liu, Hao Wang, Jingbing Liu. A Review of the Positive Electrode Additives in Lead-Acid Batteries // International Journal of Electrochemical Science. 2018. № 13. P. 2329-2340.
9. Торговый дом АКОМ (АО «ТД АКОМ») [Электронный ресурс]. URL: <http://akom.su/> (дата обращения 25.02.2019).

*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

---

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 17.09.2020  
Формат В5  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,0  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 82-12  
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