

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средствам массовой коммуникации (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-64098  
от 18 декабря 2015 г.

Издается с сентября 2014 г.  
Выходит 4 раза в год  
ISSN 2409-1650

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

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:  
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов, 05.07.03 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности],  
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],  
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)]

Подписной индекс в каталоге  
НТИ-Роспечать 62190

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

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

Адрес редакции:  
141070, Королев,  
Ул. Октябрьская, 10а  
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),  
E-mail : rio-kimes@mail.ru,  
Site:www.unitech-mo.ru

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Информационно-технологический вестник», допускается только с письменного разрешения редакции.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### *АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА*

В.М. Артюшенко, Д.Ю. Виноградов  
**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТ НА УСЛОВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ.....**3

В.Г. Исаев, Н.Г. Серёгин, Н.Н. Гречаная  
**ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ.....**14

А.В. Струкова  
**ЗАДАЧА ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОПАСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ.....**25

В.И. Суханов, А.Б. Грабов  
**ТОНКОПЛЕНЧНЫЕ МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ДАТЧИКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ.....**35

### *ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

В.М. Артюшенко, В.И. Воловач  
**ФОРМИРОВАНИЕ НЕГАУССОВСКИХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, СИГНАЛОВ И ПОМЕХ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....**45

В.Я. Вилисов  
**МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАДАНИЙ В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ.....**59

С.В. Григорьева, А.В. Ольшанский  
**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ КОНСТРУКТИВНОЙ ЧАСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ 35-220 КВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЕВЕРНЫХ РАЙОНАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ.....**69

Т.Ю. Кирилина, Е.Н. Горбанева, А.В. Познякевич  
**НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ.....**78

О.В. Ковалева  
**ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА.....**86

#### 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 01.06.2018

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,8

Тираж 500 экз.

Заказ № 17-14

Отпечатано

в типографии

ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

А.В. Маслобоев

**МУЛЬТИАГЕНТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ.....92**

В.В. Нефедьев

**МЕТОДИКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ  
СЕТЕЙ.....103**

А.В. Поначугин, В.А. Соколов

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И  
ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ НА ГОРОДСКОМ ПАССАЖИРСКОМ  
ТРАНСПОРТЕ.....111**

#### *МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ*

В.Г. Исаев, А.Г. Костылев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПЫЛЯЕМОГО  
МАТЕРИАЛА НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ТЕПЛОВЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМАТРОНА.....122**

Е.А. Николаева, А.Н. Тимофеев, К.В. Михайловский

**ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫЙ УГЛЕПЛАСТИК  
НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ИЗ ПЕКА  
И ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННОЙ МАТРИЦЫ ЭНФБ....130**

М.Д. Озерский, А.М. Шамаев, В.М. Просвириков

**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ  
ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАТЕРИАЛОВ НА ИНТЕГРАЛЬНОМ ФОТОМЕТРЕ  
ФМ-59М И ТЕРМОРАДИОМЕТРЕ ТРМ-И.....138**

А.С. Разина, Н.П. Асташева

**ВЫБОР СОСТАВА МЕТАЛЛОПЕРЕХОДА ДЛЯ  
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ.....149**

А.М. Шамаев, М.Д. Озерский

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ НА  
ЗАЩИТНЫЕ И ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИЕ  
ПОКРЫТИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....156**

УДК [521.322+531.391.5]:[629.78:528]

**Анализ влияния эволюции параметров солнечно-синхронных орбит на условия использования космических аппаратов дистанционного зондирования Земли**

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,

**Д.Ю. Виноградов**, аспирант кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев Московская область

*В статье проведен краткий анализ влияния возмущающих факторов на динамику солнечно-синхронной орбиты. Показано, что в результате смещения местного среднего солнечного времени от начального значения, время использования космического аппарата по целевому назначению значительно сокращается. При длительных сроках существования космического аппарата обеспечение минимального изменения условий освещённости трассы полёта возможно двумя путями. Первый – за счёт проведения периодических коррекций наклона плоскости солнечно-синхронных орбит и поддержания средней высоты орбиты. Второй – за счёт выбора, формирования и поддержания параметров устойчивой солнечно-синхронной орбиты, на которой обеспечивается максимальный интервал времени использования космического аппарата по целевому назначению без проведения коррекций наклона плоскости орбиты.*

Космический аппарат, солнечно-синхронная орбита, коррекция наклона плоскости орбиты.

**Analysis of the impact of evolution of sun-synchronous orbits in terms of use of spacecraft for remote sensing of the Earth**

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,

**D.Y. Vinogradov**, graduate student «Information technology and control systems»,  
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The article gives a brief analysis of the influence of disturbing factors on the dynamics of the sun-synchronous orbit. It is shown that the result of the displacement of the local average solar time from the initial value, the usage time of the spacecraft for its intended purpose is greatly reduced. The long term existence of the spacecraft to ensure that minimal changes in the lighting conditions of the*

*route of flight is possible in two ways. The first is due to the periodic adjustments of the inclination of the plane of the sun-synchronous orbit and maintaining medium honeycomb orbit. Second – due to the choice, formation and maintenance of sustainable, sun-synchronous orbit, which provides a maximum time interval of use of the spacecraft for its intended purpose without carrying out the correction of the inclination of the orbital plane.*

Spacecraft sun-synchronous orbit, correction of the inclination of the orbital plane.

**Введение.** Создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время является одним из важнейших направлений применения космической техники для социально-экономических и научных целей. В мире уже успешно эксплуатируются десятки космических аппаратов (КА) ДЗЗ. На различных стадиях разработки находятся сотни новых проектов по реализации перспективных возможностей наблюдения и съёмки Земли из космоса. Наблюдается быстрый прогресс в области повышения технического уровня КА и сокращения затрат на их создание и эксплуатацию [2].

К настоящему времени для решения большинства задач ДЗЗ (например, задач космической разведки заданных районов Земли в интересах различных ведомств, задач гидрометеорологии, экологического мониторинга, мониторинга чрезвычайных ситуаций, картографии и т.д.) появилась необходимость применять совокупность согласованно функционирующих КА, образующих космические системы (КС) или орбитальные группировки КА. При этом можно выделить следующие тенденции развития, в соответствии с которыми разрабатываются перспективные системы КА наблюдения Земли [2]:

- увеличение сроков активного существования до 7-10 и более лет;
- увеличение относительного количества малоразмерных КА;
- обеспечение режима автономного функционирования КА (многочисленных группировок малых КА);
- непрерывное возрастание детальности космических снимков (уменьшение пространственного разрешения до 0,5-1 м);
- начало интенсивного освоения микро- и нанотехнологий и создания сверхбольших кластерных КС из микро- и наноспутников;
- активные организационные усилия ведущих космических держав по началу формирования КС глобального наблюдения Земли в рамках международного сотрудничества.

На сегодняшний день [1-3] решение большинства задач ДЗЗ обеспечивается аппаратурой, функционирующей в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра электромагнитных излучений. При этом наблюдение поверхности Земли возможно только в дневное время при возможно большей высоте Солнца над местным горизонтом в точке съёмки. Если требуемые условия освещённости не выполняются, то использование КА по целевому назначению оказывается невозможным. Поэтому КС с аппаратурой наблюдения

данного типа, как правило, размещаются на околокруговых солнечно-синхронных орбитах (ССО).

**Анализ влияния внешних возмущающих факторов на устойчивость солнечно-синхронных орбит.** Анализ влияния внешних возмущающих факторов показывает, что, при условии поддержания средней высоты рабочей орбиты при помощи коррекций, основное влияние на устойчивость ССО оказывает сила гравитационного притяжения со стороны Солнца. Влияние притяжения Солнца на длительных интервалах времени может привести к значительному вековому уходу наклона плоскости ССО, т.е. к нарушению условия солнечной синхронности орбиты (смещению местного среднего солнечного времени (МССВ) от номинального значения). Величина векового ухода наклона зависит от заданного начального значения МССВ в узле ССО, а также срока эксплуатации космического аппарата (КА) [1-3].

Согласно [4] величина изменения наклона плоскости ССО за виток полёта КА  $\delta i$ , обусловленная влиянием силы притяжения Солнца, вычисляется по формуле:

$$\delta i = -\frac{3\pi}{2} k_m k_r^3 \sin 2\gamma_{cp}, \quad (1)$$

где  $k_m = M_{\odot}/M_E$  – коэффициент, равный отношению массы Солнца  $M_{\odot}$  к массе Земли  $M_E$ ;  $k_r = r/r_{\odot}$  – отношение радиуса околокруговой орбиты  $r$  к расстоянию от центра Земли до центра Солнца  $r_{\odot}$ ;  $\gamma_{cp}$  – среднее значение угла между направлением на Солнце и плоскостью орбиты.

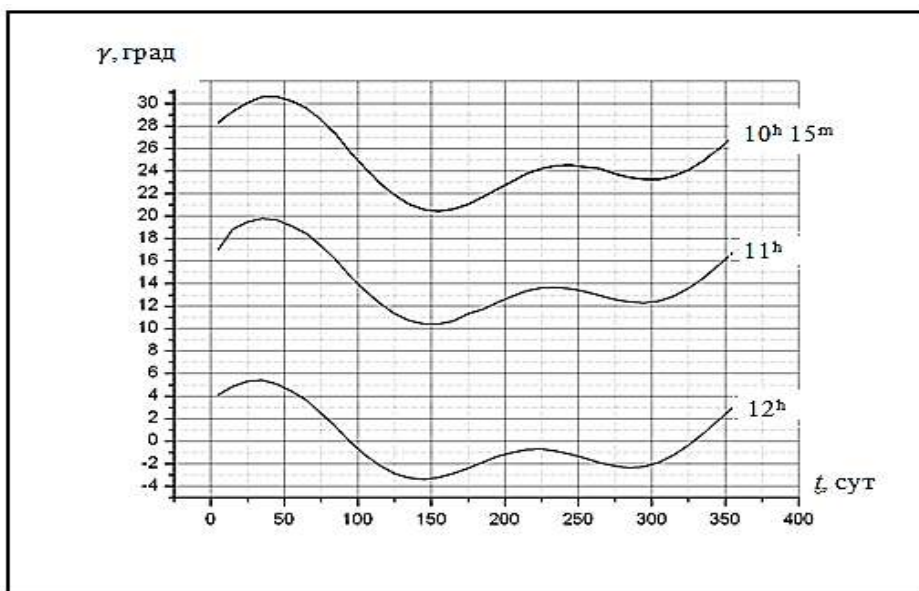


Рисунок 1 – Изменения угла между направлением на Солнце и плоскостью орбиты в течение года для солнечно-синхронных орбит с различными смещениями местного среднего солнечного времени в узле орбиты

На рисунке 1 показан характер изменения угла  $\gamma$  в течение года для значений МССВ в восходящем (или нисходящем) узле орбиты  $t_{\text{МССВ}} = 10^h \div 12^h$ , где  $h$  – обозначает размерность – час.

Заметим, что значения  $\gamma$  получены с учетом истинного положения Солнца относительно плоскости ССО.

Из графиков, представленных на рисунке 1, следует, что значение  $\gamma$  в течение года изменяется в диапазоне  $\pm 5^\circ$  относительно своего среднего значения. Например, при значении МССВ в узле ССО  $t_{\text{МССВ}} = 12^h$  в момент весеннего равноденствия значение  $\gamma \approx 0$ .

Анализируя изменение  $\gamma$  в течение года, можно принять, что при значении  $t_{\text{МССВ}} = 12^h$  в узле орбиты, среднее значение  $\gamma_{\text{ср}} \approx 0$ . В результате при заданном значении  $t_{\text{МССВ}}$  значение угла  $\gamma_{\text{ср}}$  с достаточной точностью определяется как:

$$\gamma_{\text{ср}} \approx \pi \left( 1 - \frac{t_{\text{МССВ}}}{12} \right), \quad (2)$$

где  $t_{\text{МССВ}}$  – МССВ в восходящем (или нисходящем) узле орбиты, час.

Анализ зависимостей (1) и (2) показывает, что скорость векового ухода наклона зависит от заданного значения  $t_{\text{МССВ}}$  в восходящем (нисходящем) узле орбиты, которое определяет среднее значение угла между направлением на Солнце и плоскостью орбиты.

Проанализируем возможные условия освещённости трассы полёта, необходимые для проведения съёмки. Известно, что угол места Солнца  $h_{\odot}$  определяет условия съёмки по трассе КА. Выражение для определения  $h_{\odot}$  имеет вид [3]:

$$\sin h_{\odot} = \sin \delta_{\odot} \sin \varphi + \cos \delta_{\odot} \cos \varphi \cos \xi, \quad (3)$$

где  $\delta_{\odot}$  – склонение Солнца;  $\varphi$  – географическая широта КА;  $\xi$  – часовой угол Солнца относительно КА, равный

$$\xi = t_{\text{МССВ}\uparrow} - 12^h + \frac{12}{\pi} \arcsin \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } i};$$

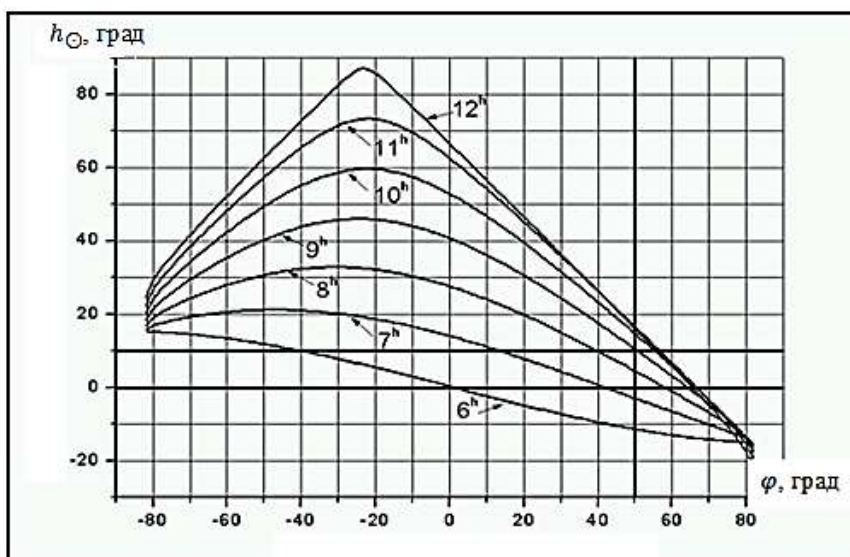
$$\xi = t_{\text{МССВ}\downarrow} + \frac{12}{\pi} \arcsin \frac{\text{tg } \varphi}{\text{tg } i},$$

где  $t_{\text{МССВ}\uparrow}$ ,  $t_{\text{МССВ}\downarrow}$  – значение МССВ соответственно в восходящем и нисходящем узлах;  $i$  – наклонение плоскости орбиты.

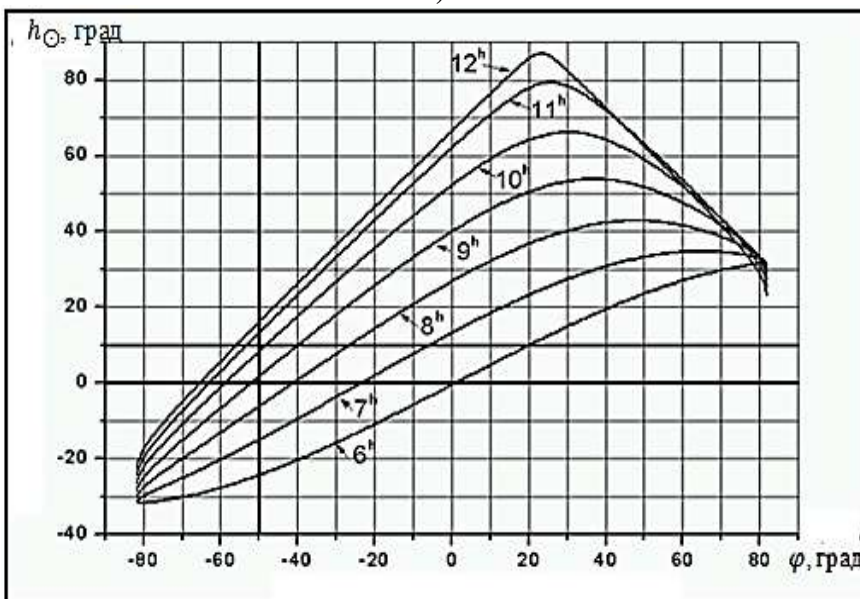
Условия выполнения требования к величине угла места Солнца, согласно выражению (3), зависят от выбранного значения  $t_{\text{МССВ}\uparrow}$  ( $t_{\text{МССВ}\downarrow}$ ), от географической широты подспутниковой точки, а также от времени года проведения съёмки.

От выбора  $t_{\text{МССВ}\uparrow}$  ( $t_{\text{МССВ}\downarrow}$ ), (при заданных параметрах ССО) зависит ширина области на поверхности Земли вдоль географической широты, в каждой точке которой угол места Солнца удовлетворяет неравенству  $h_{\odot} \geq 10^\circ$ .

На рисунке 2 приведены зависимости угла места Солнца от географической широты КА при съёмке на нисходящих ветвях орбиты для различных значений МССВ, которое варьировалось от  $6^h$  до  $12^h$ .



а)



б)

Рисунок 2 – Высота Солнца над местным горизонтом в подспутниковой точке на нисходящей ветви ССО на: а – 21 декабря; б – 21 июня

Приведенные зависимости соответствуют ССО 2-х суточной кратности с замыканием трассы полёта через 29 витков с параметрами:

$$h_{\text{ср}} = 726 \text{ км}; T_{\text{др}} = 99,31 \text{ мин}; i = 98,3^\circ,$$

где  $T_{\text{др}}$  – драконический период обращения КА;  $h_{\text{ср}}$  – средняя высота,

под которой в данном случае понимается разность между оскулирующим значением большой полуоси  $a$  орбиты в восходящем узле и экваториальным радиусом Земли  $R_e = 6378,136$  км:

$$h_{cp} = a - R_e. \quad (4)$$

Географическая широта подспутниковой точки соответствует движению КА по нисходящей ветви орбиты от точки с аргументом широты  $u = 90^\circ$  до точки с аргументом широты  $u = 270^\circ$ . Условия освещённости трассы полёта даны для двух дат: на дату 21 декабря (см. рисунок 2а) и на дату 21 июня (см. рисунок 2б).

Как следует из рисунка 2, угол места Солнца  $h_\odot$  в течение года вследствие изменения склонения  $\delta_\odot$  на одной и той же широте  $\varphi$  при съёмке с ССО претерпевает значительные изменения. Так «утренняя» ССО с  $t_{\text{МССВ}\downarrow} = 7^h$  для съёмок в северном полушарии Земли в декабре (см. рисунок 2а) имеет достаточную высоту Солнца по трассе КА только в районах с широтой  $\varphi = 0 \dots 10^\circ$  с. ш. Переход к более «поздним» орбитам значительно расширяет область съёмки. Для ССО с  $t_{\text{МССВ}\downarrow} = 9^h$  в зимнее время года съёмка возможна в диапазоне широт  $\varphi = 0 \dots 45^\circ$  с. ш. В летние месяцы (см. рисунок 2б) в северном полушарии съёмка возможна практически на всех широтах в независимости от МССВ прохождения КА нисходящего узла орбиты.

При  $t_{\text{МССВ}\downarrow} = 12^h$ , т.е. для «полуденных орбит», ширина области, где  $h_\odot \geq 10^\circ$ , максимальна. Однако на «полуденных орбитах» длительность пребывания КА в тени Земли больше, чем на «дополуденных» («утренних») и «послеполуденных» орбитах, что ухудшает качество энергоснабжения КА.

На «полуденной» орбите Солнце может находиться как слева, так и справа от КА, а это усложняет работу бортовой аппаратуры (меняется направление тени) и системы терморегулирования. Поиск компромисса приводит к тому, что, как правило, «дополуденные» КА имеют МССВ прохождения восходящего (нисходящего) узла орбиты  $t_{\text{МССВ}\uparrow} (t_{\text{МССВ}\downarrow}) = 9^h \div 11^h$ , а «послеполуденные» —  $t_{\text{МССВ}\uparrow} (t_{\text{МССВ}\downarrow}) = 13^h \div 15^h$  [3].

Срок эксплуатации КА ДЗЗ в настоящее время составляет около 5 лет с перспективой увеличения до 10 лет. За это время, особенно к концу срока активной существования КА, возмущения параметров ССО могут привести к значительному уходу МССВ в узле орбиты от своего номинального значения. В результате к концу срока эксплуатации в верхних широтах в зимние месяцы года ширина области  $h_\odot \geq 10^\circ$ , где возможно проведение съёмки, уменьшается. Степень сокращения этой области зависит от длительности эксплуатации КА и величины смещения МССВ от номинального значения (дрейфа МССВ).

Характер дрейфа МССВ во времени наглядно можно проследить, используя понятие фазовой траектории в координатах  $\delta t_{\text{МССВ}}(t) = t_{\text{МССВ}}^\phi(t) - t_{\text{МССВ}}^0$  и  $\delta i(t) = i^\phi(t) - i^0$ , выражающей смещение МССВ  $\delta t_{\text{МССВ}}$  от начального значения  $t_{\text{МССВ}}^0$  в зависимости от векового ухода  $\delta i$  наклонения плоскости ССО от номинального значения  $i^0$ .



На рисунке 3 приведена фазовая траектория изменения координат  $\delta t_{\text{МССВ}}(t)$  и  $\delta i(t)$  в течение времени эксплуатации  $T_3 = 5$  лет для ССО с указанными ранее параметрами.

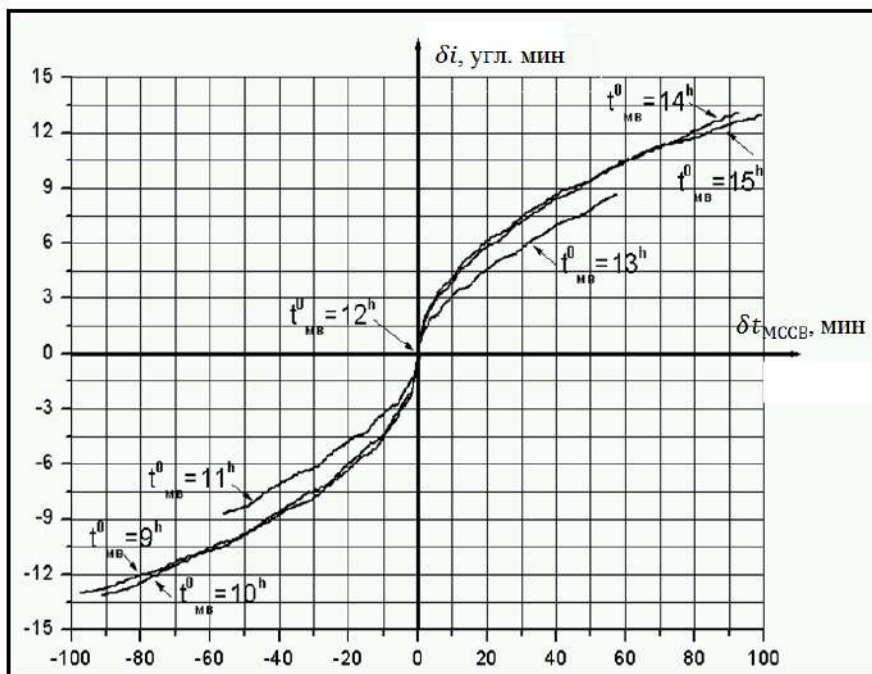


Рисунок 3 – Связь между координатами  $\delta t_{\text{МССВ}}(t)$  и  $\delta i(t)$  для ССО в течение  $T_3 = 5$  лет

При расчёте фазовой траектории на рисунке 3 предполагалось, что МССВ прохождения КА нисходящего узла орбиты в момент  $t = 0$  имело значение  $t_{\text{МССВ}}^0$ , которое варьировалось от  $9^h$  до  $15^h$ . В момент  $t = 0$  отклонения  $\delta t_{\text{МССВ}}$  и  $\delta i$  равны нулю.

Расчет фазовой траектории осуществлялся в модели ГПЗ 32×32 (ГПЗ – гравитационное поле Земли), а также сил притяжения со стороны Луны и Солнца. Предполагается, что влияние атмосферы и других неучтённых сил компенсируется в процессе поддержания орбиты.

Из рисунка 3 следует, что для «утренних» ССО, когда  $\gamma_{\text{cp}} > 0$ , отклонения  $\delta i(t) < 0$  и  $\delta t_{\text{МССВ}}(t) < 0$ . Для «послеполуденных» ССО, когда  $\gamma_{\text{cp}} < 0$ , отклонения  $\delta i(t) > 0$  и  $\delta t_{\text{МССВ}}(t) > 0$ . Для «полуденной» ССО ( $t_{\text{МССВ}}^0 = 12^h$ ), когда  $\gamma_{\text{cp}} \approx 0$ , отклонения  $\delta i(t) \approx 0$  и  $\delta t_{\text{МССВ}}(t) \approx 0$  близки к нулю.

Так, для ССО с начальным значением  $t_{\text{МССВ}}^0 = 11^h$  (см. рисунок 3) в конце срока эксплуатации  $T_3 = 5$  лет смещение МССВ достигает величины  $\delta t_{\text{МССВ}}(T_3) \approx -58^m$ , где  $m$  – обозначает размерность – минута.

Из сопоставления данной величины смещения МССВ с характери-

ками освещённости рабочего участка трассы (см. рисунок 2) следует, что для ССО с начальным значением  $t_{\text{МССВ}}^0 = 11^h$  в конце срока активного существования в зимнее время года проведение съёмки при условии  $h_{\odot} \geq 10^\circ$  в северных широтах оказывается возможным только до широты  $\varphi \approx 50^\circ$ , хотя в начале срока эксплуатации КА съёмка в зимнее время была возможна до  $\varphi \approx 55^\circ$ .

Увеличение срока эксплуатации до 10 лет приводит к ещё более значительному сокращению размера области  $h_{\odot} \geq 10^\circ$ , где возможно проведение съёмки в зимнее время года.

На рисунке 4 приведена фазовая траектория изменения координат  $\delta t_{\text{МССВ}}(t)$  и  $\delta i(t)$  в течении срока  $T_3 = 10$  лет.

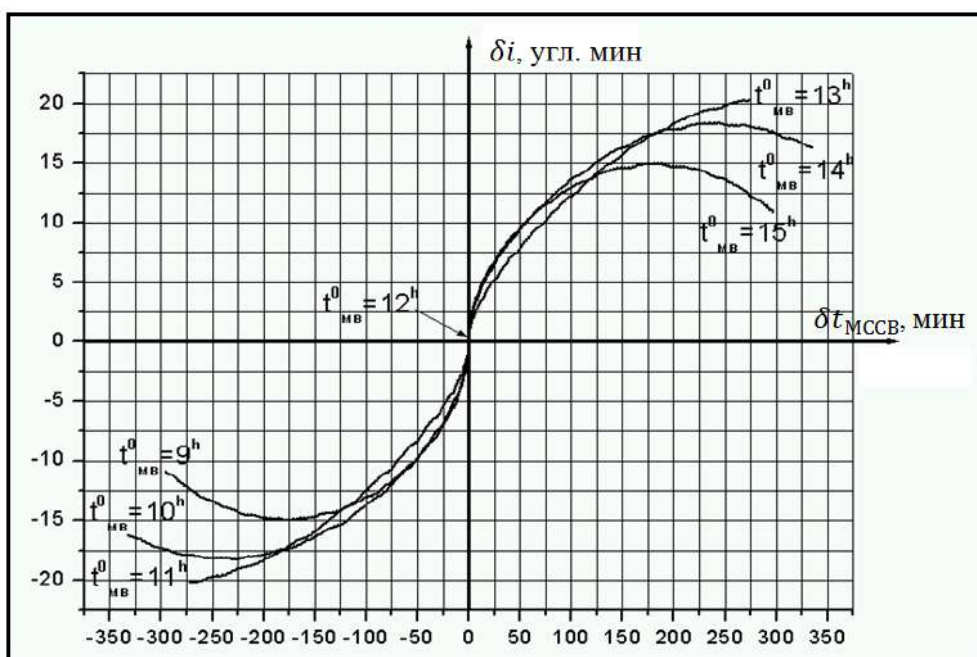


Рисунок 4 – Связь между координатами  $\delta t_{\text{МССВ}}(t)$  и  $\delta i(t)$  для ССО в течение  $T_3 = 10$  лет

Для ССО с начальным значением  $t_{\text{МССВ}}^0 = 11^h$  (рисунок 4) в конце срока  $T_3 = 10$  лет смещение МССВ достигает величины  $\delta t_{\text{МССВ}}(T_3) \approx -4,5^h$ .

Из сопоставления величины смещения МССВ в конце срока  $T_3$  с характеристиками освещённости рабочего участка трассы (см. рисунок 2) следует, что для ССО с начальным значением  $t_{\text{МССВ}}^0 = 11^h$  в конце срока  $T_3$  в зимнее время года проведение съёмки при условии  $h_{\odot} \geq 10^\circ$  в северных широтах оказывается возможным только до широты  $\varphi \approx 20^\circ$ , хотя в начале срока эксплуатации КА съёмка в зимнее время была возможна до  $\varphi \approx 55^\circ$ . Также при этом значительно сокращается размер области, где возможно проведение

съёмки в летнее время.

Таким образом, вследствие векового ухода наклона плоскости орбиты под действием силы притяжения со стороны Солнца с течением времени соответствие между высотой орбиты и наклоном нарушается, в результате чего орбита перестаёт быть солнечно-синхронной. В этом случае для восстановления и поддержания условия солнечной синхронности (обеспечения минимального изменения МССВ в узле орбиты) необходимо проведение коррекций рабочей орбиты КА.

Рассмотрим два способа проведения коррекций поддержания номинальных параметров ССО:

– способ 1, традиционный, когда корректируются два параметра: наклонение с целью поддержания условия солнечной синхронности рабочей орбиты и средняя высота (драконический период) с целью компенсации торможения КА в атмосфере и обеспечения минимального ухода МССВ от начального значения;

– способ 2, предлагаемый, когда корректируется только средняя высота (драконический период) с целью компенсации торможения КА в атмосфере и обеспечения минимального ухода МССВ от начального значения.

Отметим, что, производя коррекцию только наклона или только средней высоты ССО, формируется новая ССО, отличная от номинальной, и, восстановив её солнечную синхронность, в общем случае теряем другие её свойства, например, кратность или расположение трассы. Поэтому в идеальном случае поддержание солнечной синхронности орбиты может быть обеспечено только при первом способе проведения коррекций, т.е. путём коррекций средней высоты и наклона плоскости орбиты. Средняя высота рабочей орбиты (если требование к кратности орбиты не предъявляется) может выбираться по фактическому значению наклона орбиты выведения КА, так как для ССО между этими параметрами существует однозначное соответствие. В случае обеспечения заданного значения драконического периода рабочей орбиты (требуемой кратности) фактическое значение наклона орбиты выведения необходимо привести в соответствие с требуемым наклоном плоскости ССО путём проведения коррекции.

В дальнейшем стабильность МССВ в узле орбиты обеспечивается периодическими коррекциями наклона и средней высоты (драконического периода) в окрестности их номинальных значений. При этом в качестве возможной стратегии поддержания солнечной синхронности орбиты может быть выбрана стратегия удержания заданного значения МССВ в узле орбиты в узком диапазоне.

Предлагаемый второй способ поддержания солнечной синхронности рабочей орбиты основан на выборе и последующем поддержании параметров ССО, обладающих свойством устойчивости. ССО будем считать *устойчивой*, если в течение заданного срока эксплуатации КА обеспечивается:

– нахождение МССВ в восходящем (нисходящем) узле орбиты в заданном диапазоне;

– стабильность освещённости трассы полёта КА при возможно большей высоте Солнца над местным горизонтом в точке съёмки;

– геометрическая устойчивость орбиты, характеризуемая постоянством во времени профиля высоты ССО относительно общеземного эллипсоида (ОЗЭ) и минимальным изменением экстремальных высот на витках полёта.

Начальные значения параметров устойчивой ССО, определённые в восходящем узле орбиты, необходимо учесть при выборе номинальных параметров орбиты выведения КА. Предполагается, что ошибки выведения КА компенсируются манёврами формирования параметров рабочей орбиты. В процессе полёта КА осуществляется только компенсация торможения КА в атмосфере путём коррекции драконического периода обращения КА (поддержание средней высоты орбиты). Размещение КА на устойчивой ССО позволяет максимизировать интервал времени его использования по целевому назначению без проведения коррекций наклона плоскости орбиты.

**Выводы.** Таким образом, из проведённого анализа влияния эволюции параметров ССО на условия использования КА ДЗЗ по целевому назначению и способов поддержания солнечной синхронности орбиты можно сделать следующие выводы:

1. В результате векового ухода наклона плоскости ССО, являющегося причиной смещения МССВ от начального значения, к концу срока эксплуатации КА размер области на поверхности Земли, в каждой точке которой угол места Солнца удовлетворяет неравенству  $h_{\odot} \geq 10^{\circ}$ , определяющему условия проведение съёмки, в зимнее время года значительно сокращается. Величина сокращения области зависит от начального значения  $t_{\text{МССВ}}^0$  в узле ССО и срока эксплуатации КА. В конце длительного срока существования (7÷10 лет) значительное сокращение размера области в зимнее время года, где возможно проведение съёмки, приводит к значительному сокращению времени, в течение которого обеспечиваются условия использования КА по целевому назначению.

2. Обеспечение минимального изменения условий освещённости трассы полёта при длительных сроках существования КА возможно:

– либо за счёт проведения периодических коррекций наклона плоскости ССО и поддержания средней высоты орбиты (драконического периода);

– либо за счёт выбора, формирования и поддержания параметров устойчивой ССО, на которой обеспечивается максимальный интервал времени использования КА по целевому назначению без проведения коррекций наклона плоскости орбиты.

3. Выбор устойчивой ССО в качестве рабочей орбиты КА обеспечивает выполнение основных баллистических требований, предъявляемых к функционированию перспективных КА ДЗЗ, изложенных в [2, 3].

#### *Литература*

1. Артюшенко В.М., Виноградов Д.Ю. Анализ свойств орбит минимального изменения высоты // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4 (14). С.3-15.

2. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года // М: Российское космическое агенство. 2006. 2 с.
3. Чернов А.А., Чернявский Г.М. Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли // М: Радио и связь. 2004. 202 с.
4. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полёта искусственных спутников Земли // М: Наука. 1965. 540 с.

УДК: 681.586:629.78

**Измерение деформаций конструктивных элементов  
технических систем летательных аппаратов  
волоконно-оптическими устройствами**

**В.Г. Исаев**, кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «управление качеством и стандартизации»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

**Н.Г. Серёгин**, кандидат технических наук, доцент,  
заместитель директора завода,

**Н.Н. Гречаная**, инженер,

Завод «Импульс» акционерного общества «Научно-производственное  
объединение измерительной техники» (АО «НПО ИТ»), г. Королев,  
Московская область

*В статье рассмотрены вопросы измерения деформаций конструктивных элементов технических систем. Проведён анализ повреждений и деформаций, возникающих в элементах конструкций летательных аппаратов в процессе эксплуатации. Проведённые исследования волоконно-оптического датчика (ВОД) на основе интерферометра Фабри-Перо подтвердили его точность и надёжность работы, так как база интерферометра значительно меньше длины крепёжного элемента. Влияние изменения температуры окружающего воздуха на изменение базы ничтожно. Таким образом, применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет обеспечивать высокую точность и надёжность измерения деформаций конструктивных элементов технических систем в процессе их исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации, что позволяет рекомендовать применение на основе интерферометра Фабри-Перо в качестве первичных преобразователей (датчиков) в составе измерительных систем. Разработана технология изготовления и проведены испытания чувствительных элементов ВОД температуры, выполненных на основе интерферометра Фабри-Перо, показавшие их надёжность и перспективность применения в автоматизированных измерительных системах.*

Измерение деформаций, конструктивные элементы, технические системы, волоконно-оптические устройства, волоконно-оптический датчик, чувствительный элемент, интерферометр Фабри-Перо.

**Measurement of deformations of structural elements technical systems  
of aircraft by fiber optic devices**

**V.G. Isaev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Head of the Department of «Quality Management and Standardization»,  
State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

**N.G. Seregin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
deputy director of the plant,

**N.N. Grechanaya**, engineer,

Plant «Impulse» of the joint-stock company «Scientific and Production Association  
of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region

*The article deals with the measurement of deformations of structural elements of technical systems. The analysis of damages and deformations arising in the elements of aircraft structures during operation is carried out. The conducted researches of the fiber-optical sensor (VOD) based on the Fabry-Perot interferometer confirmed its accuracy and reliability of operation, since the interferometer base is significantly less than the length of the fastening element. The influence of the change in ambient temperature on the change in the base is negligible. Thus, the application of the method of fiber-optic low-coherence interferometry makes it possible to provide high accuracy and reliable measurement of the deformations of the structural elements of technical systems in the process of their research, design, manufacture and operation, which makes it possible to recommend the use of the Fabry-Perot interferometer as primary transducers (sensors) as part of measuring systems. The manufacturing technology has been developed and the sensitivity of the VOD temperature sensors made on the basis of the Fabry-Perot interferometer has been tested, which have shown their reliability and future application in automated measuring systems.*

Measurement of deformations, structural elements, technical systems, fiber-optic devices, fiber-optic sensor, sensitive element, Fabry-Perot interferometer.

#### **Постановка задачи.**

Анализ повреждений и деформаций, возникающих в элементах конструкций летательных аппаратов в процессе эксплуатации, показывает, что существуют четыре основные причины их возникновения: трещины, вмятины или забоины, коррозия, люфты или зазоры (табл. 1).

**Таблица 1 – Виды повреждений элементов конструкций летательных аппаратов**

Повреждения	Причины	Распределение	Частота повторяемости, %
Трещины	Усталостные напряжения	Логарифмически нормальное	40
Вмятины или забоины	Удары посторонними предметами	Экспоненциальное	20
Коррозия	Воздействие окружающей среды	Вейбулла	10
Люфты или зазоры	Износ	Нормальное	30

К ним относятся усталостные напряжения от перегрузок в полёте и при посадке, износ в результате трения или фреттинг-коррозии, воздействие окружающей среды и случайные повреждения посторонними предметами.

Единичные случаи повреждения конструкций от чрезмерных перегрузок за счёт грубых посадок, полёта в турбулентной атмосфере, непредусмотренного маневрирования, как правило, приводят к общему повреждению конструкций, потере устойчивости их конструктивных элементов и недопустимым остаточным деформациям.

Например, топливная система летательных аппаратов наиболее подвержена влиянию аэроклиматических факторов. Из-за того, что авиационное топливо обладает свойством обратимой гигроскопичности, а именно, при высокой температуре и влажности топливо насыщается водой из воздуха, а при низкой – влага выделяется из топлива в виде микрокапель, замерзающих в топливе и в виде инея, оседающего незаполненных топливом баках и агрегатах топливной системы.

В полёте температура топлива в баках летательных аппаратов устанавливается на 5-25 °С выше температуры окружающего воздуха. В подавляющем большинстве случаев минимальная температура топлива в баках не бывает ниже –45 °С. Из-за понижения в полёте температуры топлива и давления в надтопливном пространстве растворимость воды резко уменьшается. При охлаждении топлива от 20 до 0 °С из каждой тонны топлива может выделиться в виде эмульсии до 6-7 л. воды.

Вода, при изменении температуры от положительной у земли до отрицательной на высоте, попадая в зазоры и трещины герметизирующего слоя кессон-баков, расклинивает швы и трещины. Отрывает покрытие от стенок бака, что приводит к течи топлива. Образующийся на стенках топливных баков и дренажных трубопроводов иней, приводит к забивке дренажа и деформации топливных баков в виде их смятия при снижении летательного аппарата.

Поэтому измерению деформаций конструктивных элементов технических систем летательных аппаратов уделяется большое значение при их исследовании, проектировании, изготовлении и эксплуатации.

#### **Методы и средства решения задачи.**

Целью измерения деформаций конструктивных элементов технических систем является обнаружение их деформаций до того момента, когда вероятность разрушений, вследствие деформаций, превысит допустимые нормы.

Основными диагностическими средствами неразрушающего контроля являются ультразвуковые и вихретоковые устройства, магнитные, порошковые и люминесцентные дефектоскопы и рентгенография.

Обоснованность выбора уровня контроля деформаций конструктивных элементов определяется: степенью влияния конкретного элемента на безопасность эксплуатации технической системы, доступностью контроля, критическим размером деформации, скоростью её роста и предполагаемым



сроком обнаружения. Следует учитывать и экономические критерии: трудоёмкость контроля, стоимость средств контроля, повторяемость контроля и т.д.

В настоящее время широкое распространение получили волоконно-оптические измерительные устройства и системы на базе волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин [1].

Волоконно-оптические системы измерения обладают следующими преимуществами [2]:

- высокой точностью;
- высокой чувствительностью;
- малыми габаритами и весом;
- электроизоляционной прочностью;
- помехозащищённостью от магнитных полей;
- высокой коррозионной и радиационной стойкостью;
- возможностью получения цифрового сигнала, а не аналогового, что упрощает обработку информации.

Наиболее точными являются ВОД, действие которых основано на фазовой модуляции света. ВВОД с фазовой модуляцией на световодное волокно воздействуют регистрируемые физические возмущения, вызывая изменение фазы проходящего по волокну света. Возникающий сдвиг фазы регистрируется интерферометром Фабри-Перо [3]. Сенсорные ВОД с фазовой модуляцией значительно сложнее ВОД с амплитудной модуляцией, дороже их, но точность и чувствительность ВОД с фазовой модуляцией значительно выше.

Измерение деформаций конструктивных элементов технических систем может быть осуществлён волоконно-оптическим устройством измерения абсолютных малых расстояний базы интерферометра Фабри-Перо, образованного терцем волокна и отражающей поверхностью в пределах от 30 до 250 мкм. С разрешением не ниже 50 нм.

В последние годы, благодаря освоению волоконно-оптических технологий, получили развитие волоконно-оптические методы и устройства измерения расстояний и перемещений. В частности, спектральный метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии [4]. Метод волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет проводить измерения базы интерферометра Фабри-Перо с погрешностью измерения не более 30 нм. При постоянных или медленно меняющихся значениях перемещений. Основным отличием низкокогерентной интерферометрии от классической когерентной является применение низкокогерентных источников излучения. Длина волны, которых может быть меньше длины измеряемого оптического пути, например, суперлюминесцентных светодиодов.

#### **Описание и конструктивный анализ измерительных устройств.**

Волоконно-оптическое измерительное устройство измерения деформаций конструктивных элементов технических систем разработано с учётом ранее проведённых исследований ВОД [5], основанного на чувствительном элементе, схема которого изображена на рисунке 1.

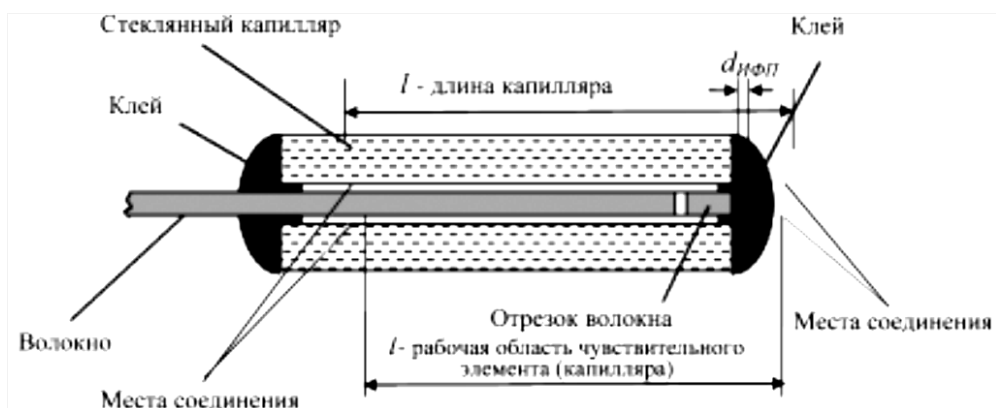


Рисунок 1 – Схема чувствительного элемента ВОД

Главным требованием к чувствительным элементам ВОД является их устойчивость и воспроизводимость результатов измерений. Если капилляр чувствительного элемента подобран правильно и не имеет дефектов, то основными узлами, определяющими качество и надёжность чувствительного элемента, являются места соединения капилляра с оптическим волокном и отражателем (рис. 1).

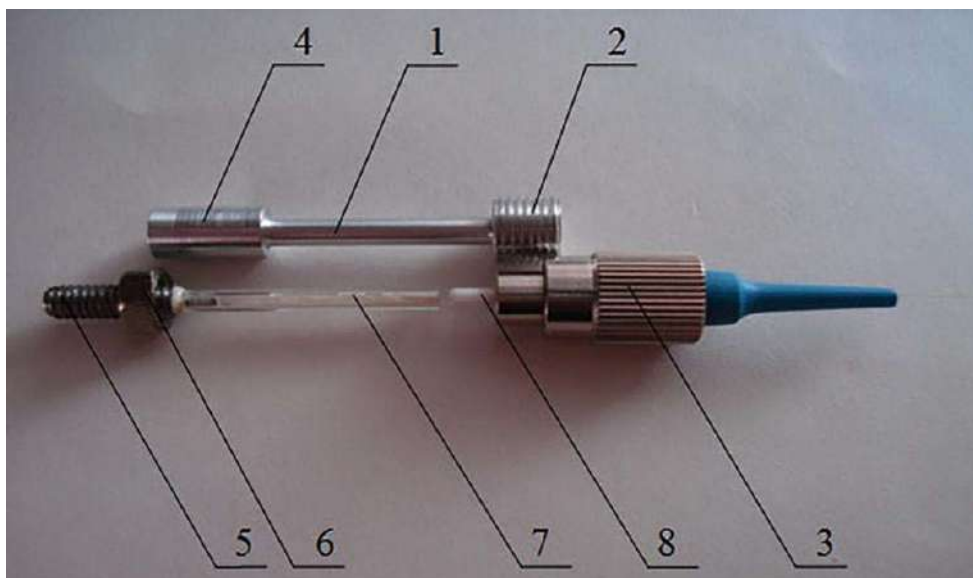


Рисунок 2 – Экспериментальный образец ВОД

Непосредственно экспериментальный образец ВОД был изготовлен из корпуса 1, изготовленного из алюминиевого сплава АМг6 и имеющего с двух сторон две резьбовые поверхности (рис. 2). С одной стороны наружная резьба 2 для соединения с волоконно-оптическим разъёмом (коннектором) 3, а с другой стороны внутренняя резьба 4. Внутренняя резьба 4 предназначена для вы-

полнения винтом 5 с контргайкой 6 настроечных перемещений зеркального торца оптического капилляра 7 относительно торца оптического волокна 8, закреплённого в коннекторе 3 [5].

Точность измерения ВОД и его чувствительность определяются точностью измерения длины волны и ширины спектра излучения, т. е. спектральными характеристиками анализатора спектра [6]. Анализатор спектра изображён на рисунке 3.

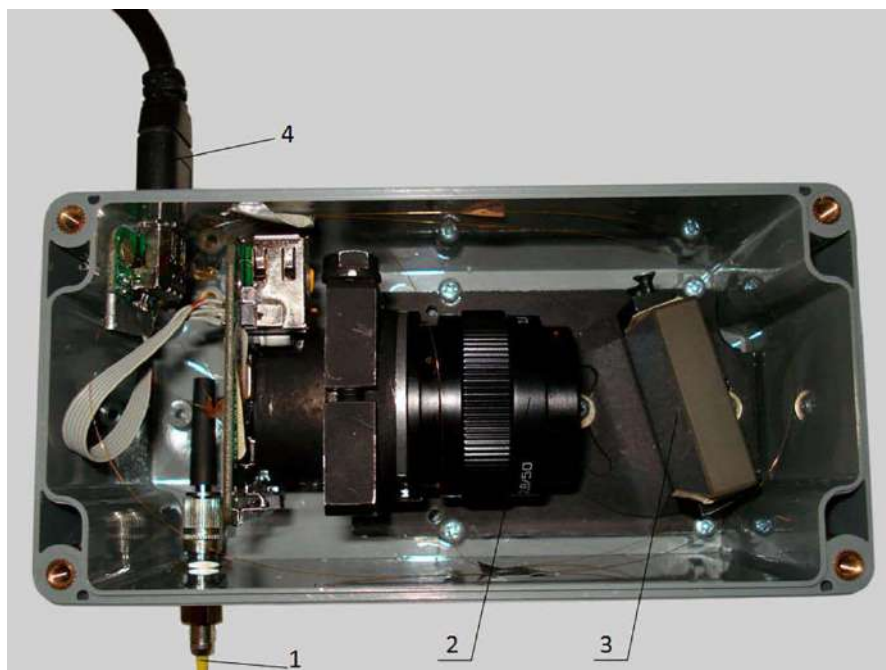


Рисунок 3 – Анализатор спектра

Сигнал проходит по оптоволокну 1 и направляется через объектив 2 на дифракционную решётку 3, на которой он раскладывается на дифракции нескольких порядков. И уже дифракции первого и второго порядка в виде информационного сигнала по кабелю поступают в регистрирующее устройство.

Что же касается измерения деформаций конструктивных элементов технических систем, то известен ВОД деформаций конструктивных элементов [7], содержащий оптическое волокно с чувствительным элементом, заключённым в корпус, обеспечивающий воздействие на чувствительный элемент при деформации конструктивного элемента. Чувствительный элемент выполнен в виде нескольких витков оптического волокна. Действие ВОД основано на изменении кривизны оптического волокна при деформации конструктивного элемента, что приводит к изменению спектральных характеристик сигнала.

Однако данная конструкция обладает малой точностью измерения, так как амплитуда сигнала, который используется для получения информации, слабо связана с деформацией. К тому же на снижения точности измерения

сильно влияет изменение амплитуды, связанное с изменением в процессе эксплуатации характеристик оптической линии, соединяющей датчик с устройством обработки.

Из числа известных устройств измерения деформаций крепёжных элементов наиболее близким к рассматриваемому является устройство, представляющее собой крепёжный элемент, содержащий корпус с центральным каналом и ВОД деформации, установленный в центральном канале корпуса и состоящий из оптического волокна с чувствительным элементом [8]. ВОД зафиксирован на стенке центрального канала. Действие ВОД основано на изменении спектра светового сигнала при прохождении через Брегговскую решётку. При деформации крепёжного элемента происходит одновременная деформация волокна, что приводит к изменению спектра пропускания света волокном.

Но, при этом, точность измерения данной конструкцией остаётся невысокой.

Для повышения точности измерения деформации конструктивного элемента в центральном канале корпуса крепёжного устройства устанавливается ВОД деформации, состоящий из оптического волокна с чувствительным элементом, выполненным в виде интерферометра Фабри-Перо [6, 9]. Одно зеркало чувствительного элемента образовано отражательной поверхностью вкладыша, выполненного из оптического волокна и установленного напротив торца оптического волокна на расстоянии 20 мкм.

Эскиз крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций изображён на рисунке 4, а пример исполнения крепёжного устройства с ВОД для измерения деформации – на рисунке 5.

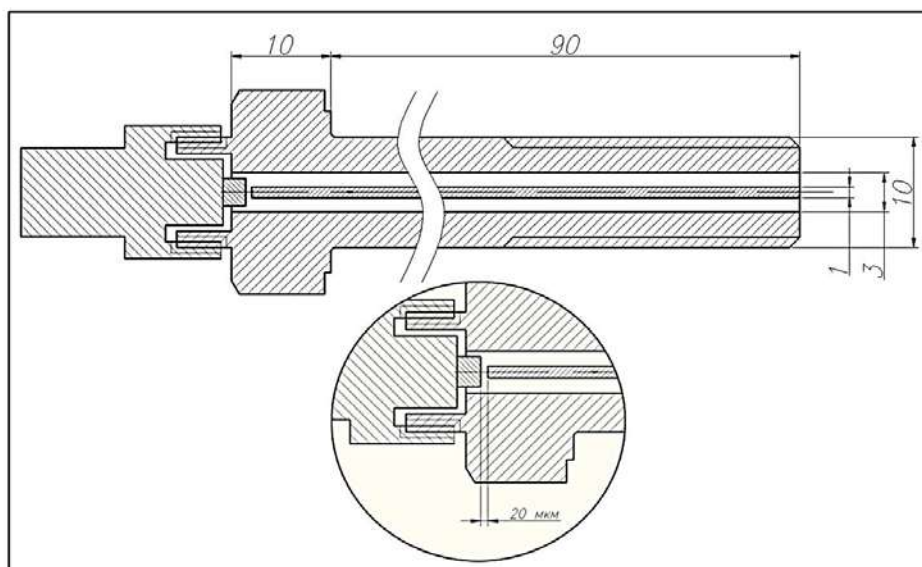


Рисунок 4 – Эскиз крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций



Рисунок 5 – Пример исполнения крепёжного устройства с ВОД для измерения деформации

**Расчёт крепёжного устройства для измерения деформаций.**

Расчётная схема крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем изображена на рисунке 6.

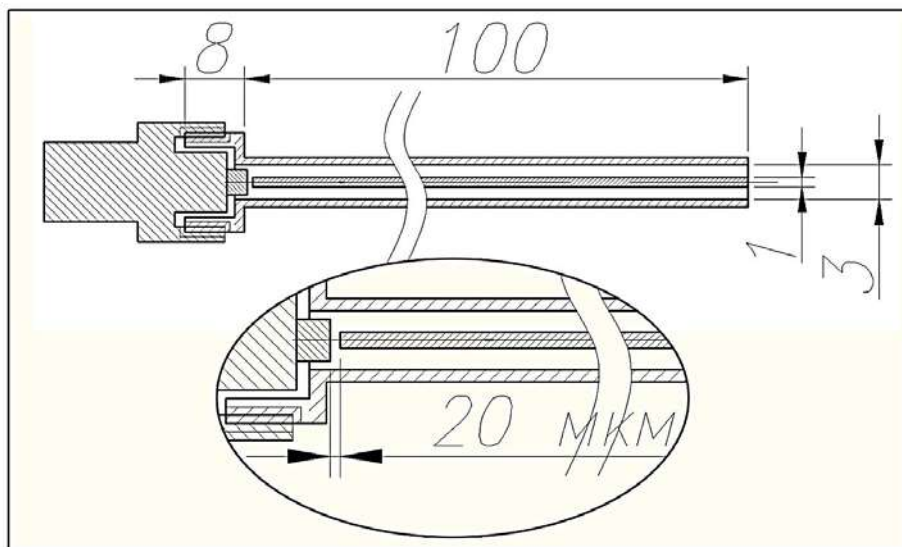


Рисунок 6 – Расчётная схема крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем

**Таблица 2 – Исходные данные для расчёта крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем**

Наименование расчётных параметров	Обозначение расчётных параметров	Значения расчётных параметров
Длина крепёжного устройства	$L$ (См. рис. 6)	100 мм
Внешний диаметр крепёжного устройства	$D$ (См. рис. 4)	10 мм
Коэффициент линейного расширения стали	$\alpha_{стали}$	$13 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$
Длина трубки	$l_{трубки}$ (См. рис. 6)	$100 \cdot 10^3$ мкм
Длина стержня	$L_{стержня}$ (См. рис. 6)	$99,98 \cdot 10^3$ мкм
Величина зазора	$L_{зазора}$ (См. рис. 6)	20 мкм
Диапазон температуры нагрева	$\Delta T_1$	40 °C
Диапазон температуры охлаждения	$\Delta T_2$	-60 °C
Допустимое удлинение стали при растяжении		0,1%

Исходные данные для расчёта крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем приведены в таблице 2.

**Таблица 3 – Результаты расчёта крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем**

Наименование расчётных параметров	Расчётные формулы	Результаты расчёта
Удлинение стальной трубки при нагреве	$\Delta l_{н.трубки} = \alpha_{стали} \cdot l_{трубки} \cdot \Delta T_1$	52 мкм
Сжатие стальной трубки при охлаждении	$\Delta l_{о.трубки} = \alpha_{стали} \cdot l_{трубки} \cdot \Delta T_2$	78 мкм
Удлинение стального стержня при нагреве	$\Delta l_{н.стержня} = \alpha_{стали} \cdot l_{стержня} \cdot \Delta T_1$	51,9896 мкм
Сжатие стального стержня при охлаждении	$\Delta l_{о.стержня} = \alpha_{стали} \cdot l_{стержня} \cdot \Delta T_2$	77,9844 мкм
Изменение расстояния между волокном и ограждающей поверхностью при нагреве	$\Delta z_{н.} = \Delta l_{н.трубки} - \Delta l_{н.стержня}$	0,0104 мкм
Изменение расстояния между волокном и ограждающей поверхностью при охлаждении	$\Delta z_{о.} = \Delta l_{о.трубки} - \Delta l_{о.стержня}$	0,0156 мкм
Изменение зазора вследствие температурных расширений между оптическим волокном и ограждающей поверхностью	$\Delta z = \Delta z_{н.} + \Delta z_{о.}$	0,026 мкм
Максимальное удлинение крепёжного устройства	$\Delta L_{max} = L \cdot 0,1\%$	100 мкм

Предел измерения определяется величиной допустимого удлинения материала при упругих деформациях.

Результаты расчёта крепёжного устройства с ВОД для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем приведены в таблице 3.

#### **Выводы и рекомендации.**

Проведённые исследования разработанного волоконно-оптического устройства для измерения деформаций конструктивных элементов технических систем летательных аппаратов различного назначения на основе интерферометра Фабри-Перо подтвердили его точность и надёжность. Расчёт устройства показал, что изменением зазора при температурных колебаниях от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно пренебречь, так как изменение зазора вследствие температурных расширений между оптическим волокном и ограждающей поверхностью составляет  $0,026\text{ мкм}$ , а максимальное удлинение крепёжного устройства –  $100\text{ мкм}$ . Точность измерения деформаций составляет  $0,3\text{ мкм}$ .

Таким образом, применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии позволяет обеспечивать высокую точность и надёжность измерения деформаций конструктивных элементов не только летательных аппаратов, но и сложных технических систем различного назначения в процессе их исследования, проектирования, изготовления и эксплуатации, что позволяет рекомендовать применение ВОД на основе интерферометра Фабри-Перо в качестве первичных преобразователей (датчиков) в составе измерительных систем.

#### *Литература*

1. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Научные основы создания устройств и систем волоконно-оптической техники: Монография // М.: ГОУ ВПО МГУЛ. 2008. 332с.
2. Серегин Н.Г., Сорокин С.В. Внедрение волоконно-оптических датчиков в систему тарировки и испытаний устройств измерительной техники // Вестник московского государственного университета леса «Лесной вестник». 2012. № 6 (89). С. 107-109.
3. Серегин Н.Г., Беляков В.А., Сорокин С.В., Яковлев А.В. Применение волоконно-оптического датчика для контроля, поверки и тарировки датчиков температуры // Инженерный вестник. 2014. № 06. С. 526-533.
4. Потапов В.Т., Жамалетдинов М.Н., Жамалетдинов Н.М., Мамедов А.М., Потапов Т.В. Волоконно-оптическое устройство для измерения абсолютных расстояний и перемещений с нанометрическим разрешением // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 103-107.
5. Шашурин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г., Сорокин С.В., Ветрова Н.А., Федоркова Н.В. Технология изготовления и результаты испытаний чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков температуры // Машиностроитель. 2016. № 5. С. 34-41.
6. Шашурин В.Д., Потапов В.Т., Серегин Н.Г., Сорокин С.В., Ветрова Н.А., Колесников Л.А. Применение метода волоконно-оптической низкокогерентной интерферометрии для контроля деформаций крепёжных элемен-

- тов строительных конструкций в процессе эксплуатации // Машиностроитель. 2016. № 8. С. 13-19.
7. Егоров Ф.А., Неугольников А.П., Поспелов В.И. Измеритель деформации и способы измерения деформации (варианты) // Патент 2322649 Российская Федерация. 2006. Бюл. № 11.
  8. Arthur D. Hay. BOLT, STUD OR FASTENER HAVING AN EMBEDDED FIBER OPTIC BRAGG GRATING SENSOR FOR SENSING TENSIONING STRAIN. Patent US 5,945,665. DateofPatent: Aug. 31. 1999.
  9. Серегин Н.Г., Гиясов Б.И. Измерительные системы диагностики и мониторинга технического состояния уникальных зданий и сооружений // Строительство: наука и образование. 2017. Том 7. Выпуск 3 (24). С. 19-35.



УДК 004.021

**Задача обнаружения и предотвращения опасных сближений при организации воздушного движения**

**А.В. Струкова**, аспирант кафедры информационных технологий и управляющих систем,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область

*В статье рассмотрены задачи обнаружения и предотвращения опасных сближений в составе перспективной системы организации воздушного движения. Приведено системное описание внедрения нового поколения систем связи, навигации и наблюдения, которое обеспечивает технические возможности для модернизации системы организации воздушного движения.*

Организация воздушного движения (ОрВД), самоэшелонирование, управление воздушным движением (УВД), техническое оснащение, воздушное пространство (ВП), воздушное судно (ВС).

**The setting of the task of detection and prevention of dangerous proximity as part of a prospective air traffic management system**

**A.V. Strukova**, graduate student of Department of Management, State Educational Institution of Higher Education Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The article deals with the tasks of detection and prevention of dangerous encounters as part of a prospective air traffic management system. A systematic description of the introduction of a new generation of communication, navigation and surveillance systems that provides technical capabilities for the modernization of the air traffic management system is given.*

Air traffic management (ATM), self-separation, air traffic control (ATC), technical equipment, airspace (VP).

**Введение.**

Современное состояние мировой авиатранспортной системы характеризуется стабильным увеличением объёмов авиаперевозок, интенсивности воздушного движения (ВД), которое уже приводит к достижению системой своих предельных возможностей. Оказывается исчерпанной пропускная способность системы. Дальнейшее увеличение интенсивности неизбежно приводит к снижению безопасности полётов, увеличению задержек воздушных судов (ВС) как на земле, так и в воздухе, увеличению расхода топлива и сниже-

нию эффективности выполнения полётов, неприемлемому увеличению экологических издержек [4-7]. С этой проблемой уже столкнулись в регионах с наиболее интенсивным ВД – в Западной Европе и США. Определённые проблемы ощущаются также и в районах РФ с наибольшей интенсивностью полётов – Московском, Санкт-Петербургском, Ростовском. Не случайно, как в Европе, так и в США приняты и выполняются крупнейшие программы модернизации систем организации воздушного движения (ОрВД) – соответственно программы SESAR и NextGen. Принципиальное решение проблем с пропускной способностью системы ОрВД и ее отдельных компонент, а также с обеспечением эффективности выполнения полётов требует внедрения новых методов, схем, алгоритмов управления воздушным движением (УВД).

С середины 90-х годов ведущими национальными и интернациональными авиационными организациями (ИКАО, FAA, Eurocontrol, NASA) проводятся активные исследования по формированию обоснованного общего взгляда на проблемы построения и конечную структуру перспективных систем обслуживания воздушного движения (ОВД), по разработке и согласованию программ перехода к принципиально новой организации ВД на основе технологий CNS/ATM. В настоящее время в наиболее экономически развитых регионах (США, Европа) такие программы поэтапно реализуются в соответствии с утверждёнными графиками проведения модернизаций и объёмов финансирования.

Согласно концепции перспективной усовершенствованной системы УВД (основанной на принципах «Free Flight»), пользователи (экипажи) будут иметь большую свободу по изменению (оптимизации) траектории и режимов полёта своих ВС, в том числе и непосредственно в полете, по своим собственным операционным критериям при безусловном выполнении ограничений по использованию ВП со стороны системы УВД. Существенным моментом, связанным с применением концепции «Free Flight», является изменение геометрии относительного движения пары ВС.

С точки зрения взаимодействия пилотов ВС и диспетчеров ОВД основными задачами проведения модернизации являются:

- уменьшение частоты и глубины директивных мер диспетчеров ОВД (общего числа вмешательств и степени изменения траекторий ВС) при сохранении высокого уровня безопасности ВД;

- предоставление пилотам ВС свободы выполнения предпочтительной 4-D траектории и гибкого маневрирования в ответ на изменение ситуации в полете, ограниченной только техническими возможностями и оснащённостью ВС, а также минимальными (при угрозе конфликтов) директивными мерами УВД.

#### **Информационное обеспечение функции самоэшелонирования.**

Имеющееся в настоящее время техническое оборудование систем управления воздушного движения определяет принципы и особенности современной организации УВД. Современные системы УВД основаны на использовании следующих технических средств связи, навигации и наблюдения:

Средства радиотелефонной связи и передачи данных по линии «земля-воздух».

Организация взаимодействия между экипажами ВС и наземными службами реализована с использованием радиотелефонной связи в УКВ диапазоне. Управление в отдельном трассовом секторе реализуется на специально отведённый сектору УКВ частоте. Поскольку УКВ связь обеспечивается в пределах прямой видимости, используются удалённые радиостанции (удалённые пункты связи – УПС), передающие по земле информацию по выделенным речевым каналам (арендуемым или специальным).

Средства навигации и посадки. Основой традиционной трассовой навигации является всенаправленная УКВ система VOR. Система состоит из сети стратегически размещённых наземных УКВ-передатчиков и обеспечивает направленное излучение сигналов. Это позволяет осуществлять самолётное вождение при переходе от одного радиомаяка системы к другому.

Недостатки: необходимость прямой видимости, наличие пересечений трасс в месте установки маяка, непрямолинейный (зигзагообразный) полет при выполнении рейса. Альтернатива появилась только при вводе в эксплуатацию Глобальной спутниковой системы навигации [2, 3].

Средства радиолокационного контроля. Контроль за выполнением полётов по воздушным трассам осуществляется с помощью обзорных трассовых радиолокаторов и вторичных РЛС [1].

Для увеличения производительности системы с вторичными радиолокаторами, для повышения точности измерения реализуется *S*-режим, основывающийся на использовании дискретных (индивидуальных) кодов самолёта. Это позволяет обеспечить:

- адресную работу с воздушными судами,
- плавный переход от существующей системы к перспективной,
- высокую точность определения координат самолёта (70 м по дальности, 0.02 град. по азимуту),
- основу для организации цифровой связи, в том числе и между самолётами.

Система вторичной радиолокации с режимом *S* представляет собой объединённую систему обзорной РЛС с активным ответом и линии передачи данных по каналу «земля – воздух – земля» с использованием адресного селективного запроса самолётов. Эта объединённая система позволяет производить обнаружение самолётов и передачу необходимой информации для эффективного управления в зонах с высокой плотностью ВД. Решение задач режима *S* возможно и с использованием общего канала активного запроса в рамках существующих средств ВРЛ, путём их модернизации. При этом решается проблема синхронного наложения и искажения ответных сигналов, особенно при близком расположении ВС. Использование режима *S* обеспечивает принципиально новые возможности при организации управления ВД.

Концепция и принципы организации и управления воздушным движением, основанные на указанной технической основе систем УВД имеют серье-

ёзные ограничения, которые связаны со следующими недостатками технического обеспечения:

- ограниченная точность оценивания параметров движения,
- ограниченный темп обмена информацией,
- зависимость от площади покрытия радиолокационного поля.

В свою очередь это приводит к следующим операционным недостаткам существующей системы УВД:

- неравномерное использование воздушного пространства,
- вынужденные ограничения на выбор не только траектории полёта, но и вертикального профиля,
- повышенные требования к разделению ВС в воздухе,
- повышенная загрузка диспетчеров управления,
- невозможность оперативных изменений выполняемого маршрута в ответ на изменение условий выполнения полёта.

Как следствие этих особенностей и недостатков, современная система УВД практически достигла своих предельных возможностей по интенсивности ВД и пропускной способности воздушного пространства. Возможности увеличения интенсивности ВД и повышения безопасности полётов практически исчерпаны. Дальнейшее увеличение интенсивности полётов приведёт к снижению эффективности управления: появлению больших задержек в вылете, а также собственно полётных времён (резком увеличении числа кругов ожидания). Кроме того, современная система УВД в силу значительных ограничений в использовании ВП, не позволяет в достаточной степени обеспечивать пользователям собственные предпочтения, оптимизировать режимы и траектории полёта.

**Техническое оснащение перспективных систем УВД в соответствии с концепцией CNS/ATM.**

Внедрение технологий CNS/ATM и повышение качества обмена информацией позволит реализовать принципиально новые процедуры организации взаимодействия пилотов и диспетчеров. В перспективе кардинально изменятся стратегии, определяющие, когда именно диспетчер должен предоставить свободу выполнения полёта экипажам ВС и когда взять инициативу по управлению ВД в свои руки.

Обеспечение условий безопасности полётов при сокращённых нормах эшелонирования будет достигнуто путём значительного повышения точности навигационных систем, внедрения усовершенствованных бортовых и наземных автоматизированных средств управления ВД на базе технологий CNS/ATM, использования новых принципов организации ВД и правил выполнения полётов.

Техническое оснащение включает технические средства оснащения «борта», диспетчерских пунктов и наземной инфраструктуры системы УВД в целом средствами наблюдения, навигации и связи (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Оснащение диспетчерского пункта и наземной инфраструктуры системы УВД**

#### **Системы связи.**

В рамках анализа перспектив внедрения концепций CNS/ATM и «Свободный полет» технические системы связи рассматриваются и исследуются в следующих программах:

- «Линия передачи данных диспетчер/пилот» (CPDLC);
- «Система связи следующего поколения» (NEXCOM);
- «Широковещательное Автоматическое Зависимое Наблюдение» (ADS-B).

Исследования при выполнении этих программ показали необходимость усовершенствования и разработки бортового оборудования, в том числе оборудования технологии связи борт/земля и борт/борт для комплексов авионики современных магистральных самолётов с целью повышения безопасного и эффективного их применения в воздушном пространстве с организацией управления воздушным движением, соответствующей этим концепциям.

Эти требования сводятся к необходимости оснащения комплексов авионики современных самолётов в той или иной комплектации новым бортовым оборудованием из числа:

- 1) Цифровые линии передачи речи и данных:
  - линии передачи данных системы ACARS;
  - ОБЧ линия передачи речи и данных режимов 2 и 3 (VDLM2, VDLM3);

- ВЧ линия передачи данных;
- линии передачи данных спутниковой системы SATCOM,
- линии передачи данных диспетчер/пилот CPDLC,
- линии передачи данных системы ATN,
- линии передачи данных приёмопередатчика универсального доступа (UAT),
- линия передачи данных режима S (VDLMS),
- ОБЧ линия передачи данных режима 4 (VDLM4) для приложений ADS-B.

2) Аппаратура интеграции и взаимодействия различных линий передачи речи и данных, представляемых системой ACARS, авионикой пакета FANS-1/A, системой ATN, удовлетворяющих требованиям SARPS ICAO.

3) Бортовые системы связи:

- многорежимные приёмопередатчики ОБЧ (VDL) линий передачи данных (режимы 2, 3, 4),
- блоки управления связью с добавлением VDL режимов 2 и 3, реализованных со стандартами SARPS ICAO,
- спутниковая система связи SATCOM.

Такие комплектации бортового оборудования продемонстрировали достижимость характеристик, определяющих возможность организации управления полётом ВС в рамках концепции CNS/ATM:

- - темп передачи посылок 0.5 до 10 сек на одно сообщение.
- длина сообщения от 112 до 372 бит.
- дальность связи в режиме борт/борт – от 40 до 125 м.миль.
- дальность связи в режиме борт/земля не менее 150 м.миль.

#### **Системы навигации.**

Необходимым условием обеспечения безопасности полётов при сокращённых нормах эшелонирования является соответствующее повышение требований к навигационным характеристикам. В частности, организацией Eurocontrol в конце 90-х г.г. принят обязательный для всех ВС, эксплуатируемых в европейском ВП, стандарт точности навигации (базовой зональной навигации, B-RNAV), соответствующий 5 nm.

Комитет по будущим аэронавигационным системам (FANS) разработал концепцию «навигации, основанной на характеристиках» PBN (Performance-based Navigation). Показателем точности навигации, реализуемой при применении концепции PBN, является уровень требуемых навигационных характеристик (RNP – Required Navigation Performance).

Суть «навигации, основанной на характеристиках» заключается в следующем: «RNP определяет характеристики навигации в пределах некоторого района воздушного пространства и, поэтому, влияет как на воздушное пространство, так и на воздушное судно. RNP предназначены характеризовать воздушное пространство с помощью показателя точности выдерживания навигационных характеристик (типа RNP), которая должна обеспечиваться в

пределах этого воздушного пространства. Тип RNP основывается на значении точности выдерживания навигационных характеристик, которое, как ожидается, будет обеспечиваться в течение, по крайней мере, 95% времени всеми типами воздушных судов, выполняющими полёты в пределах этого воздушного пространства».

Расширение возможностей децентрализованного управления, включая децентрализованное разрешение конфликтов, многократно повышает даже эти ужесточённые требования.

Совершенно очевидно, что в перспективной системе УВД в интересах навигации и наблюдения будет широко использоваться глобальная навигационная спутниковая система. Ее применение обеспечивает значительное повышение точности и частоту измерений координат

ВС, по сравнению с существующими навигационными средствами (бортовыми навигационными системами, средствами радионавигации).

С учетом этого бортовое оборудование ВС должно обеспечивать возможность использования при навигации данных глобальной спутниковой навигационной системы (GNSS), а также высокоточных бортовых и наземных радионавигационных датчиков с увеличенной помехозащищённостью:

- всенаправленных радиомаяков УКВ диапазона (VOR);
- оборудования для измерения дальности (DME) с быстрой перестройкой частот;
- инструментальных систем посадки (ILS);
- систем посадки сантиметрового диапазона (MLS)

#### **Системы наблюдения.**

Возложение в современной системе УВД обязанностей по непосредственному управлению воздушным движением (в том числе, для предотвращения опасных сближений) на диспетчера связано с тем, что только он обладает объективной и динамически изменяющейся целостной информацией о воздушной обстановке. В то же время непосредственно на борту ВС информация о параметрах собственного движения имеется. Кроме того, при наличии на борту инерциальной навигационной системы, корректируемой с помощью приёмника глобальной позиционной системы, точность определения параметров движения ВС гораздо выше точности информации диспетчера, обеспечиваемой наземными радиолокационными средствами. Для того чтобы эти данные стали доступны и другим участникам системы управления воздушным движением, предназначены системы автоматического зависимого наблюдения.

Концепция автоматического зависимого наблюдения заключается в следующем [4]: информация о местоположении ВС, вырабатываемая его бортовой навигационной системой, по цифровому каналу связи передаётся для использования системой слежения и управления. По этому же каналу связи (например, по каналу спутниковой связи), может быть обеспечена прямая связь между диспетчером и пилотом. Даже на первых этапах развития систем зависимого наблюдения обеспечивается обновление информации с частотой

0.1 Гц, что во много раз выше возможностей современной системы.

Таким образом, такая концепция АЗН является системой связи, навигации и наблюдения, основанной на спутниковых технологиях.

Информационный обмен такой системы включает команды диспетчера, ответы (запросы) пилота, сообщения собственно АЗН, сообщения о полётной и метеорологической информации.

Передаваемые с борта сообщения могут быть трёх типов:

1. Основное сообщение передаётся автоматически широта/долгота (с разрешающей способностью 0.8 угл. сек.), высота (2.4 м). Интервал обновления этих сообщений – 10 сек и менее (до 0.5-1.0 сек).

2. Расширенное сообщение выдаётся по запросу и содержит информацию о дальнейшем ходе полёта ВС в соответствии с решением, принятым пилотом. Содержит следующую информацию: следующая контрольная точка маршрута, высота в следующей контрольной точке (2.4 м), первая контрольная точка за следующей, высота в этой точке, курс (0.1 град), инструментальная воздушная скорость/число М (0.5 узла/0.001), вертикальная скорость (0.08 м/сек).

3. Вспомогательное сообщение содержит информацию о скорости ветра и температуре за бортом (величина ветра (2 км/час), направлении ветра (0.7 град), температуре (0.25 град. С). Эти данные передаются только по запросу и необходимы для вычисления путевой скорости этого ВС, а также для сбора и уточнения общей модели реальной метеорологической обстановки.

Сравнение АЗН и радиолокационного наблюдения показывает следующее. АЗН может рассматриваться как перспективная альтернатива радиолокационному наблюдению. Иногда данные АЗН так и называют «псевдорadiолокационными данными». Вектор наблюдаемых параметров АЗН – это координаты ВС в географической системе координат, в то время как РЛС выдаёт координаты ВС в полярной системе координат (дальность, азимут).

Преимуществом радиолокационного наблюдения является его независимость (от работы спутниковой навигационной системы, работы бортовых средств навигации и наблюдения).

Перекрытием радиолокационных полей радиолокаторов обеспечивается возможность комплексирования (следовательно, повышение точности наблюдения) и дублирования (следовательно, повышение надёжности системы).

Несомненными преимуществами АЗН являются:

- возможность совершенствования системы УВД путём автоматизации ее процессов за счёт CNS.
- возможность наблюдения и управления даже вне видимости радиолокаторов,
- возможность упреждающего управления на глубину прогноза.

#### **Бортовое оборудование.**

В ближайшие годы планируется полностью завершить внедрение линий цифровой связи, позволяющих увеличить темп и объем передачи инфор-



мации и обрабатывать ее в наземных и бортовых вычислительных комплексах (голосовая радиосвязь останется для запросов на выполнение операций и подтверждения получения команд, передачи дополнительной информации, советов и предупреждений). Пилоты ВС и диспетчеры УВД в перспективе получат усовершенствованные измерительные, вычислительные и визуальные (дисплейные) средства поддержки принятия решений.

Полное оборудование будет включать:

- линию цифровой связи «воздух-земля»;
- бортовой погодный радар (или доступ к информации наземных метеослужб);
- бортовой дисплей информации о ВД (CDTI);
- средства информации о параметрах движения соседних ВС (в т.ч. автоматического зависимого наблюдения (ADS));
- аппаратуру обнаружения и предупреждения конфликтов (TCAS, CD&R);
- вычислительные средства расчёта предпочтительных параметров 4-D траектории полёта и манёвров уклонения;
- бортовые системы интеллектуальной поддержки принятия решений (DST).

При внедрении перспективных линий передач данных (CPDLC) может быть обеспечено сокращение времени переговоров до 1,5-5 мин по сравнению с продолжительностью речевой связи в 16 мин.

Оснащение перспективными бортовыми погодными радарными (в т.ч. метеорадиолокатором FLW WXR, грозоотметчиком (SWMS)) позволяет определять опасные сдвиги ветра впереди ВС и обнаруживать грозовые очаги на маршруте полёта. Дальность действия систем SWMS – до 200 м.миль в секторах обзора 120 о и 360 о в вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно, частота отображения на экране бортового дисплея информации о грозовых разрядах 0,5-2 мин.

При оборудовании ВС аппаратурой TCAS глубина прогноза составляет 2 мин, аппаратурой ADS-B – 10 мин. Интервал передачи данных ADS-B – 12 сек, дальность связи – 120 м.мили.

#### *Литература*

1. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Измерение параметров движения протяженных объектов в условиях мешающих воздействий и изменяющейся дальности // Двойные технологии. 2015. № 1 (70). С.69-74.
2. Артюшенко В.М., Кучеров Б.А. Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 3. С.59-66.
3. Артюшенко В.М., Кучеров Б.А. Оценка требуемой пропускной способности каналов управления в корпоративной сети спутниковой связи с регули-

- руемыми параметрами // Информационно-технологический вестник. 2015. № 02. С.23.
4. ACAS, brochure ACASA/WP6.1/015, EUROCONTROL, 1999.
  5. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД. Одиннадцатая аэронавигационная, конф., док. AN-Conf/11-WP/4. Монреаль, 2003.
  6. Дегтярев О.В., Орлов В.С., Пучков Б.В. Разработка бортовых алгоритмов обнаружения и децентрализованного разрешения опасных сближений в воздухе, основанных на методе потенциальных полей // Сб. тр. междунар. симпоз. «Интеллектуальные системы» (INTELS-2010). Владимир, 2010.
  7. Концепция и системы CNS/АТМ в гражданской авиации / Под ред. Г.А. Крыжановского // М.: ИКЦ «Академкнига». 2003.

УДК 53.082.743

## **Тонкопленочные магниторезистивные датчики и измерительные преобразователи магнитной индукции**

**В.И. Суханов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий специалист,

**А.Б. Грабов**, ведущий инженер,

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

*В статье представлены основные характеристики разработанных в АО «НПО ИТ» тонкопленочных магниторезистивных датчиков магнитной индукции ММКК247, ММКК247-01, МЧЭ033 и измерительного преобразователя с цифровым выходным сигналом МРД00, предназначенных для бортовых систем навигации авиационной и ракетно-космической техники.*

Магнитная индукция, анизотропный магниторезистивный эффект, тонкопленочные магниторезисторы, тонкопленочные магниторезистивные датчики.

## **Thin-film magnetoresistive sensors and measuring transducers of magnetic induction**

**V.I. Sukhanov**, PhD, senior researcher, leading specialist,

**A.B. Grabov**, senior engineer,

Joint-stock Corporation «Research and production association of measuring tech-  
nics» (JSC «NPO IT»), Korolev, Moscow region

*The article presents some features of thin-film magnetoresistive magnetic induction sensors ММКК247, ММКК247-01, МЧЭ033 and the digital measurement gauge МРД009 that was developed in JSC NPO IT for aviation and cosmic apparatus navigation systems.*

Magnetic induction, anisotropic magnetoresistive effect, thin-film magnetoresistance, thin-film magnetoresistive sensors.

### **Введение**

Датчики и измерительные преобразователи индукции магнитного поля Земли в настоящее время являются важным компонентом бортовых систем ориентации и навигации авиационной и ракетно-космической техники. До настоящего времени в таких системах в качестве преобразователя магнитной индукции в электрический сигнал чаще всего использовались флюксгейт-датчики [1]. Датчики этого типа обладают высокой чувствительностью в диапазоне изменения геомагнитного поля и достаточно надежны в жестких условиях эксплуатации. Однако существенным недостатком таких датчиков явля-

ется принципиальная сложность их миниатюризации, поскольку их чувствительность к магнитной индукции пропорциональна их габаритам.

В настоящее время в бортовых системах все более широкое применение находят чувствительные элементы, основанные на использовании анизотропного магниторезистивного эффекта в тонких пленках ферромагнетика [2,3]. Наиболее известными производителями таких чувствительных элементов, а также созданных на их основе датчиков и приборов являются компании Honeywell и Philips [1,3]. Достоинством тонкопленочных чувствительных элементов является их малые габариты, надежность в жестких условиях эксплуатации и достаточно высокая чувствительность к магнитной индукции, обеспечивающая возможность создания на их основе электронных компасов и навигационных систем для космических и авиационных аппаратов и других приборов, устройств и систем, основанных на использовании геомагнитного поля.

В АО «НПО ИТ» разработана технология изготовления интегрального тонкопленочного чувствительного элемента магнитной индукции (ЧЭМИ), на основе которого созданы одноосные датчики магнитной индукции ММКК247 и ММКК247-01, трехосный датчик МЧЭ033 и измерительный преобразователь индукции магнитного поля Земли МРД009 с цифровым выходным сигналом, предназначенные для бортовых систем ориентации и навигации авиационной и ракетно-космической техники.

#### **Чувствительный элемент магнитной индукции**

Чувствительный элемент магнитной индукции обеспечивает преобразование в электрический выходной сигнал (напряжение электрического тока) проекции вектора магнитной индукции на свою ось чувствительности. Он представляет собой прямоугольную пластину из монокристаллического сапфира размерами 4,6x3,8x0,4мм, на поверхности которой расположена многослойная тонкопленочная структура, включающая следующие электрически изолированные друг от друга элементы (рис. 1):

- мостовая измерительная схема;
- проводник перемагничивания;
- проводник управления.

Мостовая измерительная схема ЧЭМИ содержит четыре магниторезистора R1, R2, R3 и R4 в виде параллельных друг другу полосок ферромагнитного сплава, соединенных низкорезистивными переключками из немагнитного металла. Полоски изготовлены из пленки магнитомягкого ферромагнетика Fe(18%)Ni(76%)Co(6%) толщиной (20...30) нм. Полоски во всех четырех магниторезисторах ориентированы под углом 45° к оси легкого намагничивания (ОЛН) пленки ферромагнетика, из которой они изготовлены. Ось легкого намагничивания создается в исходной пленке ферромагнетика в процессе её напыления. Ось чувствительности ЧЭМИ перпендикулярна ОЛН.

Проводник перемагничивания  $R_{\text{ин}}$  имеет форму меандра, рабочие полоски которого проходят над магниторезисторами R1, R2, R3 и R4 и ориентированы параллельно оси чувствительности.

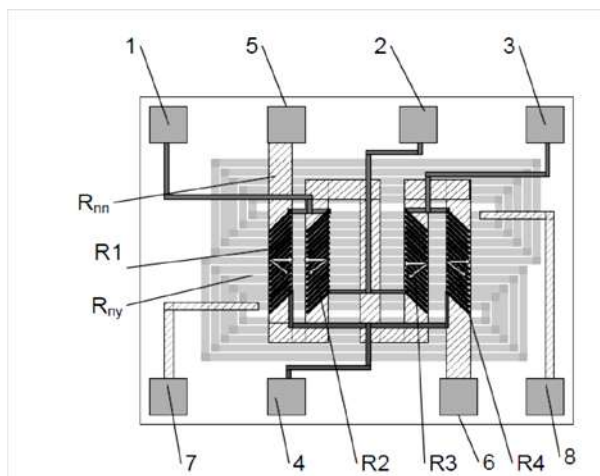


Рисунок 1 – Чувствительный элемент магнитной индукции (ЧЭМИ)

$R_1, R_2, R_3, R_4$  – магниторезисторы; 1, 2, 3, 4, – контактные площадки мостовой измерительной схемы;  $R_{мп}$  – проводник перемагничивания; 5, 6 – контактные площадки проводника перемагничивания;  $R_{уп}$  – проводник управления; 7, 8 – контактные площадки проводника управления.

Проводник управления  $R_{уп}$  имеет форму планарной катушки, рабочие полосы которой расположены над магниторезисторами и ориентированы вдоль ОЛН исходной пленки ферромагнетика. При пропускании тока по проводнику управления, вокруг его рабочих полосок возникает магнитное поле вдоль оси чувствительности ЧЭМИ. Проводник управления может использоваться с целью:

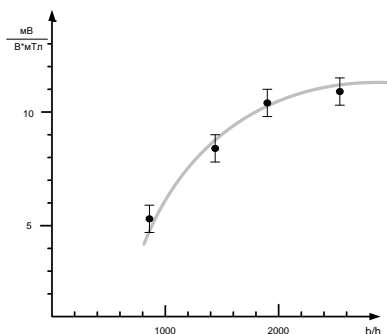
- компенсации паразитного магнитного поля (например, магнитного поля объекта, на котором закреплен датчик или магнитного поля Земли, если оно является влияющей физической величиной);
- организации обратной связи при использовании компенсационного метода измерения магнитной индукции и др.

Чувствительный элемент работает следующим образом. Мостовая измерительная схема с помощью контактов 1 и 3 подключается к источнику электрического питания (например, генератору напряжения), а с помощью контактов 2 и 4 к измерительному прибору (например, вольтметру). Сопротивление полосок, из которых состоят магниторезисторы, зависит от угла между направлением тока в полоске (между длинной стороной полоски) и вектором их намагниченности [3]. При отсутствии внешнего магнитного поля векторы намагниченности магниторезистивных полосок устанавливаются примерно вдоль ОЛН пленки ферромагнетика, из которой они изготовлены. При подаче через контактные площадки 7 и 8 в проводник перемагничивания короткого импульса тока, созданное им магнитное поле будет действовать вдоль ОЛН на полоски магниторезисторов  $R_1$  и  $R_4$  в одном направлении, а на полоски магниторезисторов  $R_2$  и  $R_3$  в противоположном направлении. Под

действием магнитного поля, созданного импульсом тока в проводнике подмагничивания, векторы намагниченности полосок в магниторезисторах R1 и R4 и установятся в одном направлении, а в магниторезисторах R2 и R3 – в другом, как показано на рисунке 1. В отсутствие внешнего магнитного поля установившийся после прохождения такого импульса выходной сигнал мостовой измерительной схемы является начальным сигналом (технологическим разбалансом) мостовой измерительной схемы магниторезистивного датчика. При появлении внешнего магнитного поля в направлении перпендикулярном ОЛН векторы намагниченности магниторезисторов поворачиваются в направлении поля и сопротивление магниторезисторов в парах (R1, R3) и (R2, R4) изменяется в противоположных направлениях, что ведет к изменению выходного сигнала мостовой схемы пропорционально проекции вектора индукции магнитного поля на ось чувствительности ЧЭМИ.

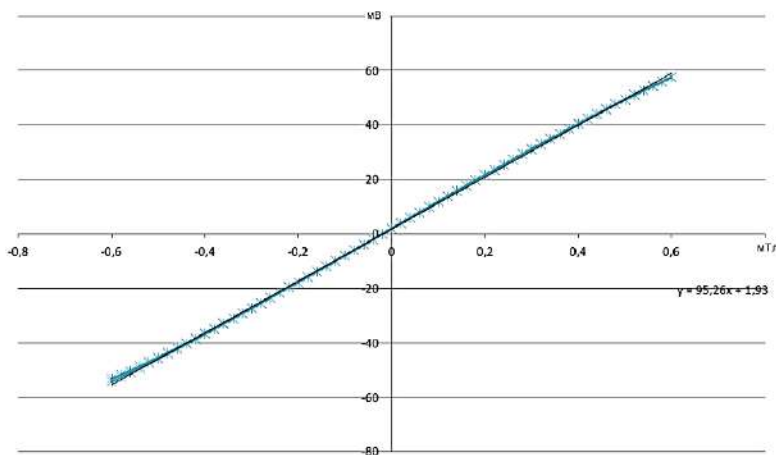
Более детальный анализ работы мостовой схемы ЧЭМИ показывает, что после прохождения по проводнику перемагничивания импульса тока в отсутствие внешнего магнитного поля ориентация усредненного по полоске ферромагнетика вектора намагниченности не совпадает с направлением ОЛН исходной пленки [3]. Угол между усредненным вектором намагниченности полоски и направлением тока (длинной стороной полоски) меньше  $45^\circ$ , из-за чего коэффициенты преобразования полосковых магниторезисторов, находящихся в соседних плечах мостовой схемы, существенно различаются, и уменьшается суммарный коэффициент преобразования мостовой измерительной схемы. Причиной несовпадения ориентации намагниченности длинных полосок и ОЛН исходной пленки ферромагнетика является изменение свойств магнитомягкого ферромагнетика у бокового края длинной полоски, а именно, край полоски приобретает свойства магнито жесткого ферромагнетика с намагниченностью ориентированной вдоль края, что разворачивает усредненный вектор намагниченности полоски по отношению к направлению ОЛН исходной пленки [3]. Однако, вклад намагниченности края в суммарную намагниченность полоски (в том числе и во внешнем поле) может быть значительно уменьшен путем увеличения ширины полосок. Исследования влияния геометрических размеров полосок ферромагнетика Fe(18%)Ni(76%)Co(6%) на коэффициент преобразования мостовой измерительной схемы ЧЭМИ показали, что путем увеличения ширины полосок можно достичь такой же чувствительности, как у известных ЧЭМИ с полюсами Барбера [3].

На рисунке 2 показана полученная экспериментально зависимость коэффициента преобразования мостовой измерительной схемы ЧЭМИ от соотношения между шириной  $b$  и толщиной  $h$  полосок ферромагнетика Fe(18%)Ni(76%)Co(6%) толщиной (20...30) нм. Результаты исследования позволили увеличить практически в два раза коэффициент преобразования измерительной схемы разработанных ЧЭМИ по сравнению с известными тонкопленочными чувствительными элементами аналогичной конструкции [4]. Технические решения, полученные в процессе разработки ЧЭМИ, защищены патентами [5...8].



**Рисунок 2 – Зависимость коэффициента преобразования мостовой схемы ЧЭМИ от отношения ширины  $b$  к толщине  $h$  полоски ферромагнетика Fe(18%)Ni(76%)Co(6%)**

Выходной сигнал мостовой измерительной схемы ЧЭМИ монотонно зависит от магнитной индукции в диапазоне от  $-0,6$  до  $+0,6$  мТл (рис. 3), при этом коэффициент преобразования находится в пределах (10...14) мВ/(В·мТл). Чувствительные элементы могут поставляться заказчику как в «бескорпусном» исполнении, так и в металлокерамическом корпусе. В «бескорпусном» исполнении ЧЭМИ поставляются на плате-носителе в виде кристалла с выводами. Для защиты от воздействия окружающей среды все элементы тонкопленочной структуры ЧЭМИ, включая контактные площадки с приваренными к ним выводами, закрыты эмалью.



**Рисунок 3 – Функция преобразования ЧЭМИ при питании мостовой схемы напряжением 9 В. Датчики магнитной индукции ММКК247, ММКК247-01 и МЧЭ033**

Датчики ММКК247 и ММКК247-01 предназначены для преобразования в электрический выходной сигнал (напряжение электрического тока) проекции вектора магнитной индукции на ось чувствительности ЧЭМИ. Они

представляют собой чувствительный элемент магнитной индукции, помещенный в металлокерамический корпус для изделий микроэлектроники производства АО «Исток» (г. Фрязино М.О.). Датчики ММКК247 и ММКК247-01 отличаются ориентацией оси чувствительности: ось чувствительности ММКК247 ориентирована параллельно его контактным площадкам, а ось ММКК247-01 – перпендикулярно его контактным площадкам. Внешний вид датчиков показан на рисунке 4, а их основные технические характеристики представлены в таблице 1.

Датчик МЧЭ033 предназначен для преобразования вектора индукции магнитного поля в три выходных сигнала – напряжение электрического тока, пропорциональное проекциям вектора магнитной индукции на три его оси чувствительности. Датчик МЧЭ033 содержит два ММКК247 и один ММКК247-01, установленных в цилиндрическом корпусе из немагнитного материала таким образом, что их оси чувствительности образуют ортогональную систему координат X, Y и Z. Внешний вид датчиков показан на рисунке 5, а их основные технические характеристики представлены в таблице 1.

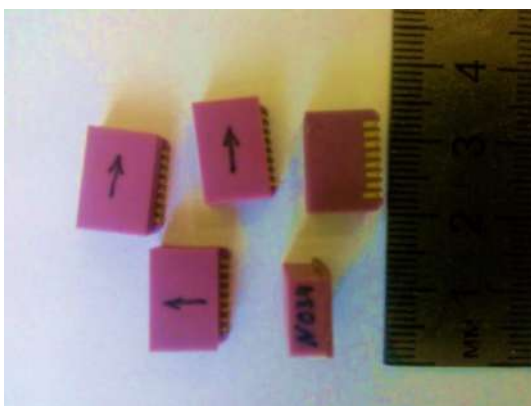


Рисунок 4 – Одноосные датчики магнитной индукции ММКК247 и ММКК247-01



Рисунок 5 – Трехосный датчик магнитной индукции МЧЭ033



**Таблица 1 – Основные технические характеристики датчиков**

Исполнение датчика	ММКК247	МЧЭ033
	ММКК247-01	
Количество осей чувствительности	1	3
Диапазон измерения, мкТл	±600	
Напряжение питания, В	от 5 до 10	
Сопротивление мостовой измерительной схемы, кОм	от 1,0 до 1,5	
Сопротивления проводника перематничивания, Ом	от 0,2 до 0,5	
Сопротивление проводника управления, Ом	от 7 до 15	
Функция преобразования	линейная	
Коэффициент преобразования, мВ/(В·мТл)	от 10,0 до 14,0	
Нелинейность, %	≤3	
Начальный выходной сигнал, мВ/В	≤±2	
Диапазон рабочих температур, °С;	от – 50 до +125	
Габаритные размеры, мм	12,8x9,4x4,8	Ø42x28
Масса, г	<6	<50

### **Цифровой измерительный преобразователь вектора индукции геомагнитного поля МРД009**

Измерительный преобразователь МРД009 обеспечивает преобразование вектора индукции магнитного поля Земли в цифровой выходной сигнал (код RS-485), содержащий информацию о трех проекциях вектора магнитной индукции на ортогональную систему координат X, Y и Z [9]. МРД009 состоит из первичного преобразователя ПП104 и вторичного цифрового преобразователя ПВЦ106, соединенных между собой кабелем (рис. 6).

Первичный преобразователь ПП104, также как МЧЭ033, содержит три одноосных магниторезистивных чувствительных элемента и, кроме того, тонкопленочный термопреобразователь сопротивления, используемый для компенсации температурной погрешности МРД009.

Вторичный цифровой преобразователь ПВЦ106 содержит следующие основные структурные элементы: стабилизатор напряжения питания, схему задания импульсов перематничивания, усилители аналогового выходного сигнала мостовых измерительных схем ПП104, микроконтроллер, высокоскоростной драйвер шины RS-485.

В преобразователе ПВЦ-6 применена схема подмагничивания магниторезисторов импульсами тока положительной и отрицательной полярности. При этом выходной сигнал МРД009 формируется как разность выходных сигналов ЧЭМИ после прохождения по проводникам перематничивания импульсов тока различной полярности. Такое решение позволило исключить из выходного сигнала МРД009 начальные выходные сигналы мостовых измерительных схем ЧЭМИ и их температурную зависимость [3]. В этом случае выходной сигнал МРД009 и его температурное изменение определяется значением и температурной зависимостью коэффициентов преобразования мосто-

вых измерительных схем ЧЭМИ, которые монотонно уменьшаются с ростом температуры. Значения температурных коэффициентов чувствительности обусловлены температурной зависимостью магниторезистивного эффекта в исходных пленках ферромагнетика и находятся в пределах  $(-0,27 \pm 0,05)\%/^{\circ}\text{C}$ . Для уменьшения температурной погрешности выходного сигнала МРД009 в электронной схеме ПВЦ106 предусмотрена компенсация температурной зависимости чувствительности ЧЭМИ.



Рисунок 6 – Цифровой измерительный преобразователь МРД009

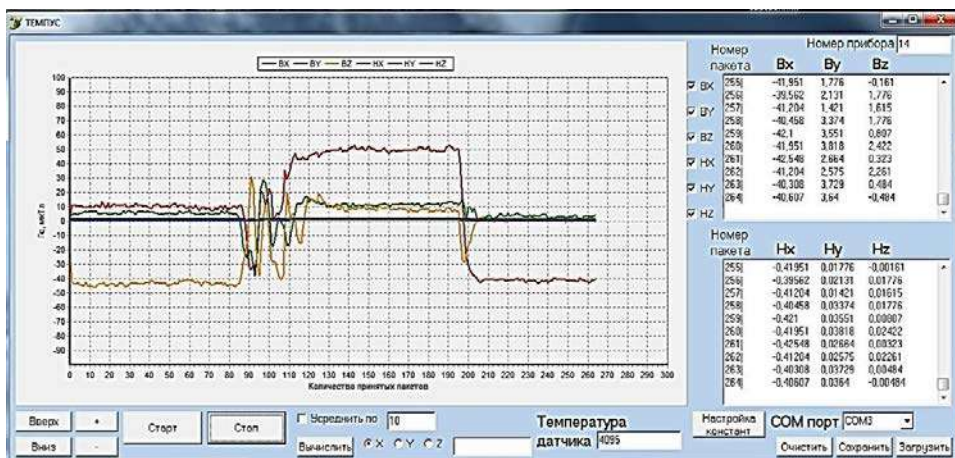


Рисунок 7 – Выходные сигналы измерительного преобразователя МРД009 в магнитном поле Земли

Выходные сигналы измерительного преобразователя можно наблюдать на экране монитора персонального компьютера, подключив МРД009 к компьютеру с помощью преобразователя интерфейсов USB-RS485 и установив на компьютере соответствующее программное обеспечение. На рисунке 7 показаны выходные сигналы МРД009 в магнитном поле Земли. Из рисунка 7 видно, что в начальный момент времени первичный преобразователь ориен-

тирован в пространстве таким образом, что магнитная индукция вдоль осей X и Y не превышает 10 мкТл, а вдоль оси.

Z составляет около 43 мкТл. Резкое изменение выходных сигналов по всем трем осям X, Y и Z соответствуют вращению первичного преобразователя ПП104 в пространстве. После первого вращения максимальная магнитная индукция ~50 мкТл наблюдается вдоль оси X, а после второго – вдоль той же оси X, но с противоположным знаком. Основные характеристики МРД009 представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Основные характеристики измерительного преобразователя МРД009**

Диапазон измерения, мкТл	±200
Напряжение питания, В	27 <sup>+7</sup> <sub>-5</sub>
Количество ортогональных осей чувствительности	3
Выходной интерфейс,	RS-485
Основная приведенная погрешность, %	≤1
Диапазон рабочих температур, °С: -для первичного преобразователя -для вторичного цифрового преобразователя	от – 50 до +125 от – 50 до +50
Габаритные размеры, мм -первичный преобразователь -вторичный цифровой преобразователь	59x34x18 97x64x47
Масса, г -первичный преобразователь -вторичный цифровой преобразователь	≤95 ≤325
Потребляемая мощность, Вт	≤2,1

### Заключение

Применение тонкопленочных магниторезистивных чувствительных элементов, основанных на анизотропном магниторезистивном эффекте, позволяет миниатюризировать средства измерения геомагнитного поля. Разработанные датчики ММКК247, ММКК247-01, МЧЭ033, МРД009 могут применяться для создания средств измерения, контроля и управления, основанных на использовании магнитного поля Земли: систем навигации космических и авиационных аппаратов, электронных компасов, приборов магнитной локации и поиска геомагнитных аномалий, датчиков бесконтактного контроля тока и т.п.

### Литература

1. Tumanski S. Handbook of magnetic measurements // © Taylor & Francis Group LLC, 2011, 382 с.
2. Касаткин С.И., Васильева Н.П., Муравьев А.М. Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе // М. Электросервис. 2005. 160 с.

3. Tumanski S. Thin film magnetoresistive sensors // © IOP Publishing Ltd. 2001. 441 с.
4. Амеличев В.В., Гамарц И.А., Касаткин С.И. и др. Анизотропные магниторезистивные преобразователи на основе ферромагнитных наноструктур с различным содержанием кобальта // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2(115). С.22-24.
5. Ажаева Л.А., Веселов А.В., Грабов А.Б. и др. Патент RU2533747. Магниторезистивный датчик тока. Опубликовано 20.11.2014. Бюл. № 32.
6. Ажаева Л.А., Грабов А.Б., Суханов В.И. и др. Патент RU2561762. Магниторезистивный датчик. Опубликовано 10.09.2015. Бюл. № 25.
7. Ажаева Л.А., Грабов А.Б., Суханов В.И. и др. Патент RU2601281. Магниторезистивный датчик тока. Опубликовано 27.10.2016. Бюл. № 30.
8. Ажаева Л.А., Грабов А.Б., Суханов В.И. и др. Патент RU2633010. Магниторезистивный датчик. Опубликовано 11.10.2017. Бюл. № 29.
9. Грабов А.Б., Бродин Е.В., Веселов А.В. и др. МРД-009 и МРД-010 – магниторезистивные бортовые интеллектуальные магнитометры для космического аппарата // Авиакосмическое приборостроение. 2015. №6, с. 14-21.

УДК 621.391.01

**Формирование негауссовских случайных процессов, сигналов и помех на основе стохастических дифференциальных уравнений**

**В.М. Артюшенко**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой информационные технологии и управляющие системы,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», 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

*Рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с формированием негауссовских случайных процессов с помощью стохастических дифференциальных уравнений. Рассмотрены алгоритмы формирования скалярных, векторных и  $n$  – связанных непрерывных марковских негауссовских последовательностей. Проанализированы формирующие фильтры с параметрическим шумом и с возмущающими воздействиями, не являющимися гауссовскими процессами. Осуществлен анализ формирования негауссовских последовательностей с помощью пуассоновского процесса и стохастических фильтров.*

Плотность распределения вероятностей, негауссовские случайные процессы, стохастические дифференциальные уравнения, формирующие фильтры, динамические системы.

**Formation of non-Gaussian random processes, signals and interference, on the basis of stochastic differential equations**

**V.M. Artyushenko**, doctor of Technical Sciences, Professor,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», 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

*Reviewed and analyzed issues associated with the formation of naguszewski random processes using stochastic differential equations. Algorithms of formation of scalar, vector and  $n$  – connected continuous Markov non-Gaussian sequences are considered. Forming filters with parametric noise and with disturbing influences, which are not Gaussian processes, are analyzed. The analysis of formation of non-*

*Gaussian sequences by means of Poisson process and stochastic filters is carried out.*

Probability density distribution, non-Gaussian random processes, stochastic differential equations forming filters, dynamical systems.

**Введение.** В статистической радиотехнике, радиолокации, теории связи и автоматического управления, для оптимального проектирования систем и устройств, важнейшее значение имеет формирование случайных процессов, сигналов и помех, имеющих, как правило, негауссовскую плотность распределения вероятностей (ПРВ) [5, 6].

Для формирования негауссовских случайных процессов применяют различные методы, одним из которых, является метод многомерной плотности распределения вероятностей. Однако найти ее часто не представляется возможным. Существуют и другие многочисленные методы.

Рассмотрим и проанализируем методы формирования негауссовских случайных процессов, сигналов и помех, на основе стохастических дифференциальных уравнений (СДУ).

**Формирование марковских случайных процессов.** Рассмотрим последовательность  $\{\lambda_h\}$  как совокупность отсчетов  $\lambda_h = \lambda(t_h)$  марковского процесса с неопределенным временем  $\{\lambda_h, t \in (0, T)\}$ ;  $T_0 = t_{h-1} - t_h$ ,  $t_h = hT_0$ .

Учитывая, что пространство состояний  $\Lambda\{\lambda \in \Lambda\}$  является непрерывным, последовательность  $\{\lambda_h\}$  будем называть непрерывнозначной. Помимо этого будем рассматривать дискретные марковские последовательности  $\{\lambda_m, m = \overline{1, M}\}$  в случае, когда пространство состояний  $\Lambda$  является дискретным.

Заметим, что процесс  $\lambda_t$  может быть как скалярным, так и векторным. В последнем случае вектор описывается совокупностью  $r$  случайных процессов, так что  $\lambda_t = \{\lambda_{it}, i = \overline{1, r}\}$ .

**Формирование скалярных, непрерывнозначных процессов.**

Пусть марковский процесс  $\lambda_t$  удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\dot{\lambda}_t = f_t(\lambda_t) + g_t(\lambda_t)\xi_t,$$

где  $f_t, g_t$  – детерминированные функции своих аргументов, удовлетворяющие условию Липшица:

$$|f_t(x_t) - f_t(y_t)| + |g_t(x_t) - g_t(y_t)| \leq L|x - y|, L = \text{const} > 0;$$

$\xi_t$  – нормальный белый шум с известными статистическими характеристиками

$$m\langle \xi_k \rangle = 0; m\langle \xi_t \xi_{t+\tau} \rangle = N_0^2 \delta(\tau).$$

В рассматриваемом случае коэффициенты сноса и диффузии будут определяться как:

$$a(\lambda, t) = f_t(\lambda_t) + 0,5N_0^2 g_t(\lambda_t) \frac{\partial g_t(\lambda_t)}{\partial \lambda_t} = f_t(\lambda_t) + \frac{1}{4} \frac{\partial b_t(\lambda_t)}{\partial \lambda_t};$$

$$b_t(\lambda_t) = N_0^2 g_t(\lambda_t).$$

В этом случае уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова примет вид:

$$\frac{\partial W(\lambda, t)}{\partial t} = - \frac{\partial [f_t(\lambda_t) W(\lambda, t)]}{\partial \lambda} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ \frac{W(\lambda, t)}{2} \frac{\partial b_t(\lambda_t)}{\partial \lambda_t} - \frac{\partial}{\partial \lambda} [b(\lambda, t) W(\lambda, t)] \right].$$

Если процесс  $\lambda_t$  является однородным, стационарным, то есть

$$f_t(\lambda_t) = f(\lambda); g_t(\lambda_t) = g(\lambda); a(\lambda, t) = a(\lambda); b(\lambda, t) = b(\lambda),$$

причем  $b(\lambda) > 0$  и при нулевых граничных условиях стационарная

ПРВ  $W(\lambda)$  определяется обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dW(\lambda, t)}{d\lambda} = \left\{ \frac{2f(\lambda)}{b(\lambda)} - \frac{b(\lambda)}{2} \frac{db(\lambda)}{d\lambda} \right\} W(\lambda),$$

решение которого имеет вид:

$$W(\lambda_t) = \frac{C_1}{g(\lambda_t)} \exp \left\{ 2 \int_{C_2}^{\lambda_t} \frac{f(x)}{g^2(x)} dx \right\} = \frac{C}{\sqrt{b(\lambda)}} \exp \left\{ 2 \int_{\lambda'}^{\lambda} \frac{f(x)}{b(x)} dx \right\},$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – константы, выбираемые из условия нормировки ПРВ  $W(\lambda)$ .

Для моделирования марковских процессов необходимо перейти к дискретному времени. Переход может быть осуществлен на основе уравнения Ито или Стратоновича.

В первом случае это

$$d_1 \lambda_t = [f_t(\lambda_t) + 0,5 g_t(\lambda_t) g'_t(\lambda_t)] dt + g_t(t) dV_t.$$

Во втором

$$d_s \lambda_t = f_t(\lambda_t) dt + g_t(\lambda_t) dV_t.$$

Здесь  $\{V_t, t \in (0, T)\}$  – стандартный винеровский процесс;

$$m\langle V_t \rangle = 0; m\langle V_t V_{t+\tau} \rangle = t; m\langle V_t V_{t-\tau} \rangle = t - \tau.$$

Кроме того, для  $V_t$ , при  $t \gg \tau_\xi$ , где  $\tau_\xi$  – время корреляции реального гауссовского процесса, используемого при моделировании, справедливо:  $V_t \cong \int_0^t \xi_t dt$ .

При соответствующем выборе шага дискретизации  $T_0$ , так чтобы  $T_0 \gg \tau_\xi, T_0 \ll \left\{ \left| \frac{f_t(\lambda)}{\dot{f}(\lambda_t)} \right|, \left| \frac{g_t(\lambda_t)}{\dot{g}_t(\lambda_t)} \right| \right\}$ .

Можно перейти к разностным моделям, как в первом, так и во втором случаях. Соответствующие уравнения будут иметь вид:

$$\lambda_h - \lambda_{h-1} = \left\{ f_{h-1}(\lambda_{h-1}) + \frac{1}{2} g_{h-1}(\lambda_{h-1}) g'_{h-1}(\lambda_{h-1}) \right\} T_0 + g_{h-1}(\lambda_{h-1}) \sqrt{T_0} \xi_h;$$

$$\lambda_h - \lambda_{h-1} = f_h(\lambda_h) 2T_0 + g_h(\lambda_h) \sqrt{T_0} (\xi_h + \xi_{h-1}),$$

где

$$h = \overline{1, H}; \lambda_h = \lambda(t_h); f_h(\lambda_h) = f_{t,h}(\lambda_{t,h});$$

$$\xi_h = \frac{1}{\sqrt{T_0}} \int_{t_{h-1}}^{t_h} \xi_h dt; t_h = hT_0.$$

На практике наиболее часто встречается случай, когда  $g_t(\lambda_t) = g_t$ , тогда СДУ приобретает вид:

$$\dot{\lambda}_t = f_t(\lambda_t) + g_t \xi_t,$$

и уравнение Ито и Стратоновича совпадают по форме, так как  $g'_t = 0$ .

В результате разности СДУ упрощается и приобретает вид:

$$\lambda_h - \lambda_{h-1} = f_{h-1}(\lambda_{h-1})T_0 + g_{h-1}\sqrt{T_0}\xi_h.$$

В частном случае, когда

$$\begin{aligned} f_t(\lambda_t) &= -\alpha_t(\lambda_t); g_t(\lambda_t) = g_t; \\ f_{h-1}(\lambda_{h-1}) &= -\alpha_{h-1}(\lambda_{h-1}); g_h(\lambda_{h-1}) = g_{h-1}, \end{aligned}$$

получаем

$$\lambda_h = (1 - \alpha_{h-1})T_0(\lambda_{h-1}) + g_{h-1}\sqrt{T_0}\xi_h = V_h(\lambda_{h-1}) + G_h\xi_h,$$

что соответствует гауссовской марковской последовательности.

**Формирование векторных процессов.** В случае формирования непрерывнозначного векторного процесса  $\lambda_t = \{\lambda_{i,t}, i = \overline{1, r}\}$ , система СДУ записывается в виде

$$\dot{\lambda}_{i,t} = f_{i,t}(\vec{\lambda}_t) + \sum_{j=1}^r g_{ij,t}(\vec{\lambda}_t)\xi_{j,t}, i = \overline{1, r}, \quad (1)$$

где  $f_{i,t}(x)$ ,  $g_{ij,t}$  – функции известного вида с ограниченными производными;  $\{\xi_{jt}\}$  – гауссовские шумы,  $m\langle \xi_{j,t} \rangle = 0$ ;  $m\langle \xi_{i,t}\xi_{j,t+\tau} \rangle = \delta_{ij}\delta(\tau)$ .

Формирование негауссовских марковских векторных случайных процессов осуществляется в соответствии с уравнением

$$\begin{aligned} \lambda_{i,h} - \lambda_{i,h-1} &= \left[ f_{h-1}(\vec{\lambda}_{h-1}) + 0,5 \sum_{j,\delta=1}^r \frac{\partial g_{i\delta,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1})}{\partial \lambda_{j,h-1}} \times \right. \\ &\times \left. g_{j\delta,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1}) \right] T_0 + \sqrt{T_0} \sum_{j=1}^r g_{j\delta,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1}) \xi_{j,h}, i = \overline{1, r}, \end{aligned}$$

либо

$$\begin{aligned} \lambda_{i,h} - \lambda_{i,h-1} &= f_{i,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1})2T_0 + \sqrt{T_0} \sum_{j=1}^r g_{ij,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1}) \times \\ &\times [\xi_{j,h} - \xi_{j,h-1}], i = \overline{1, r}. \end{aligned}$$

В случае  $g_{ij,t}(\vec{\lambda}_t) = g_{ij,t}$ , уравнение (1) имеет вид:

$$\dot{\lambda}_{i,t} = f_{i,t}(\vec{\lambda}_t) + \sum_{j=1}^r g_{ij,t}(\vec{\lambda}_{h-1})\xi_{j,t},$$

и формирование процесса осуществляется на основе разностного уравнения

$$\begin{aligned} \lambda_{i,h} - \lambda_{i,h-1} &= f_{i,h-1}(\vec{\lambda}_{h-1})T_0 + \sqrt{T_0} \sum_{j=1}^r g_{ij,h-1}\xi_{j,h}, \\ i &= \overline{1, r}, h = \overline{1, H}. \end{aligned}$$

Аналогично может быть рассмотрено формирование гауссовского векторного процесса.

**Формирование многосвязных последовательностей.** Формирование  $n$  –связных марковских негауссовских последовательностей в общем виде определяется соотношением

$$\lambda_h = \varphi_h(\lambda_{h-n}, \dots, \lambda_{h-1}, \xi_h), h = \overline{1, H},$$

где  $\varphi_h(\cdot)$  – кусочно-непрерывная нелинейная функция заданного вида, имеющая однозначную обратную функцию;  $\xi_h = \varphi_h(\lambda_{h-n}, \dots, \lambda_{h-1}, \lambda_h)$ .

Последовательность  $\{\lambda_h\}$  задается начальной ПРВ  $W_1(\lambda_1)$  и ПРВ перехода  $W_1(\lambda_h | \lambda_{h-m}^{h-1})$ , которые, в свою очередь, определяются из соотношений



$$W_1(\lambda_1) = W_\xi[\Psi_1(\lambda_1)] \left| \frac{d\Psi_1}{d\lambda_1} \right|;$$

$$W_h(\lambda_h | \lambda_{h-m}^{h-1}) = W_\xi[\Psi_m(\lambda_{h-m}^{h-1}, \lambda_h)] \left| \frac{d\Psi_h}{d\lambda_h} \right|, h = \overline{2, H},$$

где  $W_\xi(x) = N(0,1)$ .

Следует отметить, что в тех случаях, когда обратные функции неоднозначны, в правых частях формул для соответствующих ПРВ следует взять суммы по каждой из подобластей.

Аналогично формируется векторный негауссовский процесс  $\{\vec{\lambda}_h = \lambda_{i,h}, i=1,r, \text{ так, что}$

$$\lambda_{i,h} = \varphi_{i,h}(\vec{\lambda}_{h-n}^{h-1}, \vec{\xi}_h), i = \overline{1, r},$$

где  $\vec{\xi}_h = \{\xi_h\}$  – независимые стандартные белые негауссовские шумы,  $m\langle \xi_{j,m} \rangle = 0$ ;  $m\langle \xi_{i,k} \xi_{j,m} \rangle = \delta_{ij} \delta_{km}$ ;  $\varphi_{i,m}(\cdot)$  – кусочно-непрерывные функции заданного вида, имеющие однозначные обратные функции:

$$\xi_{i,h} = \varphi_{i,h}(\vec{\lambda}_{h-n}^{h-1}, \lambda_h), i = \overline{1, r}.$$

Для скалярных процессов начальные ПРВ и ПРВ перехода определяются из соотношений

$$W_1(\lambda_1) = W_\xi[\{\Psi_{i,1}(\vec{\lambda}_1)\}] |J_1|;$$

$$W_h(\vec{\lambda}_h | \vec{\lambda}_{h-m}^{h-1}) = W_\xi[\{\Psi_{i,h}(\vec{\lambda}_{h-n}^{h-1}, \vec{\lambda}_h)\}] |J_h|, h = \overline{2, H},$$

$$|J_h| \text{ – якобиан преобразования } \xi_h b \lambda_h: |J_h| = \left\| \frac{\partial \Psi_{i,h}}{\partial \lambda_{j,h}} \right\|.$$

**Формирование дискретных марковских процессов.** Дискретные последовательности с дискретным временем. При формировании дискретной марковской последовательности  $\{\lambda_h\} = \{\theta_h\}, h = \overline{1, H}; \theta_h \in \{\vartheta_k, k = \overline{1, K}\}$  считаются заданными начальная ПРВ  $\{\theta_1 = \vartheta_k\} = \rho_{k,1}$  и ПРВ перехода  $P(\theta_h = \vartheta_k | \theta_{h-1} = \vartheta_j) = \rho_{ik,h}$ .

Формирование начального значения случайной величины осуществляется согласно правилу

$$\theta_1 = \vartheta_k, \text{ если } \sum_{\gamma=1}^{k-1} \rho_{\gamma,1} \leq \alpha_1 < \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\gamma,1},$$

где  $\{\alpha_h, h = \overline{1, H}\}$  – последовательность независимых случайных величин, равномерно распределенных в интервале  $(0, 1)$ .

Аналогично формируется последовательность независимых дискретных величин  $\{\theta_h\}$ . На шагах  $h = \overline{2, H}$  используется правило

$$\theta_h = \vartheta_k, \text{ если } \sum_{\gamma=1}^{k-1} \rho_{\gamma\gamma,h} \leq \alpha_h < \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\gamma\gamma,h},$$

где значение  $\gamma$ , характеризующее номер предыдущего состояния марковской последовательности, считается фиксированным.

*Дискретные процессы с непрерывным временем.*  $\{\theta_h, t \in (0,1)\}$ ,

$\infty \theta_t \in \{\vartheta_k, k = 1, K\}$  описываются начальными вероятностями  $\rho_{k,0}$  и вероятностями перехода  $A_{jk}(t)$  из состояния  $\vartheta_j$  в состояние  $\vartheta_k$  в единицу времени  $j = k$ . Чтобы формируемые процессы были адекватны реальному процессу  $\theta_t$ , необходимо выполнение условия  $A_{jk}(t)T_0 \ll 1$ .

В этом случае вероятности перехода  $\rho_{jk.h}$  описывающие модель  $\{\theta_h\}(\theta_h = \theta(t_h))$  с дискретным временем, в свою очередь, удовлетворяют соотношениям

$$\rho_{jk.h} \cong A_{jk}(hT_0)T_0; (\rho_{jk.h} \ll 1), j \neq k;$$

$$\rho_{kk.h} \cong 1 - \sum_{j \neq k} A_{jk}(hT_0)T_0; (\rho_{kk.h} = 1).$$

Начальные вероятности  $\rho_{k.1}$  для модели  $\{\theta_h\}$  находят из соотношений  $\rho_{k.1} = \rho_{k.0}$ .

**Формирующий фильтр с параметрическим шумом.** Рассмотрим линейную систему первого порядка:

$$\dot{\lambda}_t = -(c + \vartheta(t))\lambda_t + n_\vartheta(t),$$

где  $c$  – параметр системы;  $\vartheta(t)$  – параметрический шум;  $n_\vartheta(t)$  – аддитивный белый гауссовский шум;  $\lambda_t = \lambda(t)$  – выходной сигнал;  $\vartheta(t)$  и  $n_\vartheta(t)$  – коррелированные между собой белые шумы со средним  $m_\vartheta$  и  $m_n$ , и спектральными плотностями  $N_{o,\vartheta}$ ,  $N_{o,n}$ ,  $N_{\vartheta,n}$ .

Представленную систему можно рассматривать как ФФ, в котором выбором параметров входных воздействий и фильтра можно получить выходной сигнал с ПРВ семейства Пирсона.

Для рассматриваемого случая коэффициенты сноса и диффузии имеют вид [1]:

$$a(\lambda, t) = -(c + m_\vartheta - 0,5N_{o,\vartheta})\lambda_t - 0,5N_{\vartheta,n} + m_n;$$

$$b = N_{o,\vartheta}\lambda^2 - 2N_{\vartheta,n}\lambda - N_{o,n}.$$

Из структуры коэффициента сноса и диффузии видно, что если в линейной системе имеются как аддитивные, так и мультипликативные шумы, то условие для гауссовского закона распределения  $W(\lambda)$  не выполняется, поскольку коэффициент диффузии зависит от фазовой компоненты  $\lambda$ . Поэтому в системах с параметрическими шумами ПРВ выходных переменных не является гауссовской.

Подставляя коэффициент сноса и диффузии в уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, получаем

$$\frac{\partial W(\lambda, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \lambda} \{ [(c + m_\vartheta - 0,5N_{o,\vartheta})\lambda_t + 0,5N_{o,n} - m_n] W(\lambda, t) +$$

$$+ 0,5 \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \{ [N_{o,\vartheta}\lambda^2 - 2N_{\vartheta,n}\lambda + N_{o,n}] W(\lambda, t) \}.$$

Для определения стационарного решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова положим  $\frac{\partial W}{\partial t} = 0$ . Отсюда следует, что

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \Pi(\lambda) = 0,$$

где

$$\Pi(\lambda) = [(c + m_\vartheta - 0,5N_{o,\vartheta})\lambda + N_{\vartheta,n} - m_n] W(\lambda) +$$

$$+ 0,5 \frac{\partial}{\partial \lambda} [N_{o,\vartheta}\lambda^2 - 2N_{\vartheta,n}\lambda + N_{o,n}] W(\lambda).$$

Из последнего уравнения следует, что  $\Pi(\lambda) = \text{const}$ .

Из равенства нулю ПРВ и ее производной на границах области изменения  $\lambda = \pm\infty$  следует, что  $\Pi(\lambda) = 0$ . Тогда получаем, что

$$\frac{dW(\lambda)}{d\lambda} - 2AW(\lambda) = 0,$$

где

$$B = N_{o.g}\lambda^2 - 2N_{g.n}\lambda + N_{o.n};$$

$$A = -(c + m_g - 0,5N_{o.g})\lambda - 0,5N_{g.n} + m_n.$$

Решая уравнение относительно ПРВ  $W(\lambda)$  и подставляя значение коэффициентов сноса и диффузии, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dW(\lambda)}{d\lambda} = \frac{\lambda - a}{b_0 + b_1\lambda + b_2\lambda^2} W(\lambda), \quad (2)$$

где введены обозначения

$$a = \frac{N_{g.n} + 2m_n}{2c + 2m_g + N_{o.g}}; \quad b_0 = \frac{-N_{o.n}}{2c + 2m_g + N_{o.g}};$$

$$b_1 = \frac{N_{g.n}}{2c + 2m_g + N_{o.g}}; \quad b_2 = \frac{2N_{g.n}}{2c + 2m_g + N_{o.g}}. \quad (3)$$

Полученное уравнение является уравнением Пирсона, которое в зависимости от параметров  $a, b_0, b_1, b_2$  дает семейство ПРВ Пирсона.

Чтобы с помощью ФФ обеспечить формирование ПРВ заданного вида, определим требуемые параметры фильтра.

Для этого выразим параметры фильтра через первые четыре начальных момента искомой ПРВ. Для этого представим уравнение (2) в виде

$$(b_0 + b_1\lambda + b_2\lambda^2) \frac{dW(\lambda)}{d\lambda} = (\lambda - a)W(\lambda).$$

Умножив обе части уравнения на  $\lambda^n$ , и проинтегрировав по частям по  $\lambda$  в бесконечных пределах, получим

$$\lambda^n (b_0 + b_1\lambda + b_2\lambda^2) W(\lambda) \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} [nb_0\lambda^{n-1} + (n+1)b_1\lambda^n + (n+2)b_2\lambda^{n+1}] W(\lambda) d\lambda = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda^{n+1} W(\lambda) d\lambda - a \int_{-\infty}^{\infty} \lambda^n W(\lambda) d\lambda.$$

Полагая, что  $W(\pm\infty) = 0$ , и переходя к начальным моментам, получим рекуррентное уравнение

$$nb_0m_{n-1} + [(n+1)b_1 - a]m_n + [(n+2)b_2 + 1]m_{n+1} = 0,$$

где  $m_n$  – начальный момент  $n$ -го порядка.

Полагая последовательно  $n = 0, 1, 2, 3$  и учитывая, что  $m_0 = 1$ , получаем систему уравнений, связывающую между собой моменты формируемого процесса с заданной ПРВ и параметрами  $a, b_0, b_1, b_2$  формирующего фильтра:

$$-m_1 = 2b_2m_1 + b_1 + 0 \times b_0 - a;$$

$$-m_2 = 3b_2m_2 + 2m_1b_1 + b_0 - m_1a;$$

$$-m_3 = 4b_2m_3 + 3m_2b_1 + 2m_1b_0 - m_2a;$$

$$-m_4 = 5b_2m_4 + 4m_3b_1 + 3m_2b_0 - m_3a.$$

Решая систему уравнений для заданных моментов ПРВ, находим параметры формирующего фильтра  $a, b_0, b_1, b_2$ . Подставляя их в (3), определим параметры входных процессов ФФ:

$$N_{o.g} = -\frac{2b_2(c+m_g)}{b_2+1}; \quad N_{o.n} = -\frac{2b_0(c+m_g)}{b_2+1};$$

$$N_g = \frac{2b_1(c+m_g)}{b_2+1}; \quad m_N = -\frac{(c+m_g)(2a-b_1)}{b_2+1}.$$

Таким образом, параметры  $a, b_0, b_1, b_2$  задают исходя из требуемого ПРВ, а величины  $c, m_g$  – выбирают. Так удобно получить  $c = 1; m_g = 0$ .

Следует отметить, что это не всегда возможно, так как, например, при  $m_\vartheta = 0$  и коррелированности параметрического  $\vartheta(t)$  и аддитивного шума  $n(t)$  ПРВ  $W(\lambda)$  асимметрична.

При отсутствии корреляции между обоими шумами ПРВ  $W(\lambda)$  отклоняется от гауссовской, симметрична и имеет «плоскую» вершину.

Структурная схема ФФ для рассматриваемого случая изображена на рисунке 1, где  $K_1, K_2$  – кинетические коэффициенты марковского процесса.

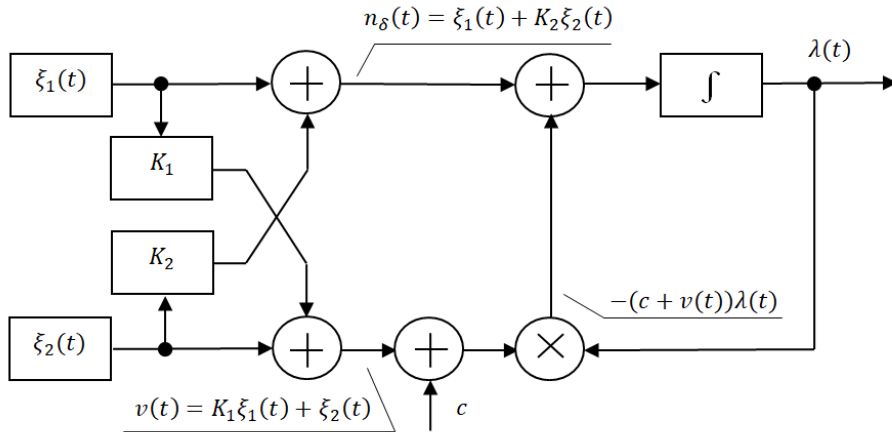


Рисунок 1 – Структурная схема формирующего фильтра

**Формирующие фильтры с возмущающими воздействиями, не являющимися гауссовскими процессами.** Рассмотрим СДУ

$$\dot{\lambda}_t = a(\lambda) + b(\lambda)\xi(t),$$

где  $a(\lambda), b(\lambda)$  – известные функции;  $\xi(t)$  – случайное дельта-коррелированное воздействие с ПРВ  $W_\xi(\xi)$  известного вида. Считаем, что кумулянты распределения – известны.

Ограничимся рассмотрением первых трех кумулянт:

$$\langle \xi(t) \rangle = \kappa_1 = 0;$$

$$2 \int_{-\infty}^0 \langle \xi \xi_\tau \rangle d\tau = \kappa_2;$$

$$3 \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 K[\xi, \xi_\tau, \xi_\sigma] = \langle \xi_1, \xi_2 \xi_3 \rangle - \langle \xi_1 \rangle \langle \xi_2 \xi_3 \rangle - \langle \xi_2 \rangle \langle \xi_1 \xi_3 \rangle - \langle \xi_3 \rangle \langle \xi_1 \xi_2 \rangle + 2 \langle \xi_1 \rangle \langle \xi_2 \rangle \langle \xi_3 \rangle = \kappa_3.$$

В этом случае для определения ПРВ  $W(\lambda, t)$  необходимо пользоваться кумулянтным уравнением, в котором ограничимся  $s = 3$ :

$$\dot{W}(\lambda, t) = \sum_{s=1}^3 \frac{1}{s!} \left( \frac{\partial}{\partial \lambda} \right)^s [K_s W(\lambda, t)],$$

где

$$K_1 = a(\lambda) + \frac{1}{2} \kappa_2 b(\lambda) \frac{\partial b(\lambda)}{\partial \lambda} + \frac{1}{6} \kappa_3 b(\lambda) \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[ b(\lambda) \frac{\partial b(\lambda)}{\partial \lambda} \right];$$

$$K_2 = \kappa_2 b^2(\lambda) + \frac{1}{2} \kappa_3 b^3(\lambda) \frac{\partial b(\lambda)}{\partial \lambda};$$

$$K_3 = \kappa_3 b^3(\lambda).$$

Если  $\xi(t)$  – дельта-процесс с кумулянтными функциями

$$\kappa_s(0, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_s) = D_s \delta(\tau_2) \delta(\tau_3), \dots, \delta(\tau_s),$$

то кинетические коэффициенты марковского процесса

$$K_1(\lambda, t) = a(\lambda, t) + \frac{1}{2} D_2 b(\lambda, t) \frac{\partial b(\lambda, t)}{\partial \lambda};$$

$$K_n(\lambda, t) = D_n b^n(\lambda, t), n \geq 2.$$

Если же  $\xi(t)$  является гауссовским дельта-процессом, то

$$K_1(\lambda, t) = a(\lambda, t) + \frac{1}{2} D_2 b(\lambda, t) \frac{\partial b(\lambda, t)}{\partial \lambda};$$

$$K_2(\lambda, t) = D_2 b^2(\lambda, t);$$

$$K_3(\lambda, t) = K_4(\lambda, t) = \dots = 0.$$

В этом случае приходим к непрерывному марковскому процессу.

Заметим, что при  $\kappa_3 = 0$  мы автоматически приходим к уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова с коэффициентами сноса и диффузии, рассмотренному выше.

Определим стационарную ПРВ, для которой справедливо

$$W_{\text{ст}}(\lambda) = 0.$$

Опуская промежуточные выкладки, которые ничем не отличаются от подобных при нахождении стационарного решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова, приходим к системе дифференциальных уравнений

$$-\frac{1}{6} \frac{\partial^2 v}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \frac{K_2}{K_3} - \frac{K_1}{K_3} v = 0,$$

где

$$v = K_3(\lambda) W_{\text{ст}}(\lambda);$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \lambda^2} - 3 \frac{\partial v}{\partial \lambda} \frac{K_2}{K_3} + 6 \frac{K_1}{K_3} v = 0;$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} [K_3(\lambda) W(\lambda)] - 3 \frac{\partial}{\partial \lambda} [K_2(\lambda) W(\lambda)] + 6 [K_1(\lambda) W(\lambda)] = 0.$$

В общем виде уравнение решить не удастся.

Рассмотрим частный случай, когда  $a(\lambda) = a\lambda$ ,  $b(\lambda) = b\lambda$ , что соответствует линейному СДУ. Тогда

$$K_1 = f\lambda; K_2 = \kappa_2 b^2; K_3 = \kappa_3 b^3.$$

Уравнение для определения  $W(\lambda)$  приобретает вид

$$\kappa_3 b^3 \frac{\partial^2 W(\lambda)}{\partial \lambda^2} - 3\kappa_2 b^2 \frac{\partial W(\lambda)}{\partial \lambda} + 6a\lambda W(\lambda) = 0$$

или

$$W''(\lambda) = AW'(\lambda) + B\lambda W(\lambda) = 0,$$

где

$$A = \frac{3\kappa_2}{\kappa_3 b}; B = \frac{6f}{\kappa_3 b^3}.$$

**Формирование процесса с негауссовской ПРВ при воздействии пуассоновского процесса.** Как известно, в качестве процессов с независимыми приращениями могут использоваться белые шумы трех классов. Это гауссовский, производная винеровского процесса, пуассоновский и обобщенный пуассоновский процессы. Непрерывная часть любого процесса с независимыми

приращениями есть, либо пуассоновский, либо сумма этих процессов. Использование гауссовского шума уже было рассмотрено выше.

При формировании негауссовских процессов в качестве входного процесса может использоваться также пуассоновский процесс [3, 4].

Рассмотрим нелинейное уравнение системы

$$\dot{\lambda}_t = f(\lambda) + g\xi_t, \quad (4)$$

где  $f(\lambda)$  – нелинейная функция известного вида;  $g$  – постоянная;  $\xi_t$  – марковский бинарный процесс с двумя состояниями ( $\xi_1 = -1, \xi_2 = +1$ ) с известными статистическими характеристиками

$$\langle \xi \rangle = \kappa_1^\xi = (x_1 - x_2)\gamma;$$

$$\langle \xi \xi_\tau \rangle = \kappa_1^\xi(\tau) = \kappa_2^\xi R(\tau) = \kappa_2^\xi \exp(-\gamma|\tau|).$$

Здесь  $\gamma = \lambda_1 + \lambda_2$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  – интенсивность пуассоновских потоков.

Для определения кинетических коэффициентов, характеризующих ПРВ негауссовского процесса  $W(\lambda)$ , из уравнения (4) определим приращение  $\varepsilon(v)$  выходного процесса:

$$\varepsilon(v) = \lambda(v) - \lambda = f(\lambda) + g \int_0^v \xi_\tau d\tau. \quad (5)$$

Усреднив (5) при фиксированном  $\lambda$ , определим первую моментную функцию приращения случайного процесса

$$\alpha_1(v|\lambda) = \langle \varepsilon(v)|\lambda \rangle = f(\lambda)v + g \int_0^v \langle \xi_\tau|\lambda \rangle d\tau.$$

Для этого предварительно найдем

$$\begin{aligned} \langle \xi_\tau|\lambda \rangle &= \iint \xi_\tau W(\xi, \xi_\tau|\lambda) d\xi d\xi_\tau = \\ &= \iint \xi_\tau W(\xi|\lambda) W(\xi_\tau|\xi, \lambda) d\xi d\xi_\tau = \\ &= \iint \xi_\tau W(\xi_\tau|\xi) W(\xi|\lambda) d\xi d\xi_\tau = \int \langle \xi_\tau|\xi \rangle W(\xi|\lambda) d\xi. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя выражения для вероятностей перехода марковского бинарного процесса, на основании (6), найдем

$$\langle \xi_\tau|\lambda \rangle = \kappa_1^\xi (1 - R(\tau)) + \langle \xi|\lambda \rangle R(\tau). \quad (7)$$

Принимая во внимание, что при

$$x = \text{const} \langle \dot{x}|x \rangle = 0$$

из (4) имеем

$$\langle \xi|\lambda \rangle = -a(\lambda)/b. \quad (8)$$

Подставив (7) и (8) в выражение для  $\alpha_1(v|\lambda)$  и, учитывая, что

$$R(\tau) = \exp\{-\gamma|\tau|\},$$

найдем первый кинетический коэффициент

$$B_1(\lambda) = \left. \frac{\partial^2 \alpha_1(v|\lambda)}{\partial v^2} \right|_{v=0} = \gamma \{ b\kappa_1^\xi + a(\lambda) \}.$$

Аналогичным образом находят второй кинетический коэффициент

$$B_2(\lambda) = \left. \frac{\partial^2 \alpha_2(v|\lambda)}{\partial v^2} \right|_{v=0} = 2\{b^2 - a^2(\lambda)\}.$$

При нулевых граничных условиях, как и в уравнении Фоккера-Планка-Колмогорова, стационарная ПРВ определяется соотношением

$$W(\lambda) = \frac{\text{const}}{B_2(\lambda)} \exp \left\{ 2 \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{B_1(\lambda')}{B_2(\lambda')} d\lambda' \right\}.$$

С учетом найденных коэффициентов

$$W(\lambda) = \frac{\text{const}}{b^2 - a^2(\lambda)} \exp \left\{ -x_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{d\lambda'}{a(\lambda') - b} - x_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{d\lambda'}{a(\lambda') + b} \right\}.$$

В частном случае интегрирующего звена коэффициент сноса и диффузии имеют вид

$$\alpha(\lambda) = -\beta\lambda; \quad b = \beta.$$

В результате кинетические коэффициенты запишутся как:

$$B_1(\lambda) = \gamma\beta(\kappa_1^\xi - \lambda);$$

$$B_2(\lambda) = \beta^2(1 - \lambda^2).$$

Тогда, стационарная ПРВ будет удовлетворять уравнению

$$\begin{aligned} W(\lambda) &= \frac{\text{const}}{b^2(1-\lambda^2)} \exp \left\{ 2 \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{\gamma\beta(\kappa_1^\xi - \lambda')}{b^2(1-\lambda'^2)} d\lambda' \right\} = \\ &= \frac{\text{const}}{b^2(1-\lambda^2)} \exp \left\{ \frac{2\gamma}{\beta} \kappa_1^\xi \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{d\lambda'}{(1-\lambda')^2} - \frac{2\gamma}{\beta} \int_{\lambda_1}^{\lambda} \frac{\lambda' d\lambda'}{(1-\lambda')^2} \right\}. \end{aligned}$$

Решая полученное уравнение можно конкретизировать вид ПРВ.

**Формирование случайных негауссовских процессов с помощью стохастических фильтров.** Для формирования случайных процессов с дискретным временем, имеющих как заданные дробно-рациональные спектральные плотности, так и заданные одномерные ПРВ, используется специальный класс фильтров, известных как стохастические [2].

Линейный стохастический фильтр  $k$ -го порядка описывается разностным уравнением

$$\lambda_h = a_{1,h}\lambda_{h-1} + a_{2,h}\lambda_{h-2} + \dots + a_{k,h}\lambda_{h-k} + a_{k+1,h}\xi_h; \quad h = k, k = 1, \dots, \quad (9)$$

где  $\{\xi_h, h = 0, 1, \dots\}$  – последовательность некоррелированных случайных величин, каждая из которых имеет функцию распределения  $F(x)$ , симметричную относительно математического ожидания  $m = 0$ , то есть  $F(x) = 1 - F(-x)$ ;  $\{a_{i,h}, h = 0, 1, \dots\}$  – последовательность случайных векторов.

При каждом  $h$  с вероятностью  $p_a$  лишь один из компонентов не нулевой  $a_{j,h} = \text{const} = \pm 1$ , а остальные равны нулю  $a_{j,h} = 0 \forall i \neq j$ ,

где  $\forall$  – квантор всеобщности, математический знак означающий: «для любых»; «для всех»; «для каждого».

В результате

$$M\{a_{i,m}a_{i,l}\} = M\{a_{i,m}\}M\{a_{i,l}\}.$$

Последовательности  $\{a_{i,h}\}$  и  $\{\xi_h\}$  взаимно независимы.

Если начальные условия в (9) являются случайные величины  $x_0, \dots, x_{k-1}$  имеющие функцию распределения  $F(x)$ , то  $\forall h = k, k = 1, \dots$ . В этом случае случайная величина  $x_h$  совпадает либо с  $\pm x_{h-j}, j = \overline{1, K}$ , либо с  $\pm \xi_h$ , а, следовательно,  $\{x_h\}$  имеет функцию распределения  $F(x)$ . Значит, одномерная ПРВ  $\{x_h\}$  на выходе стохастического фильтра совпадает с ПРВ  $\{\xi_h\}$  на входе. Формирование процесса  $\{\xi_h\}$  с произвольной ПРВ может осуществляться одним из рассмотренных выше способов.

Рассмотрим спектральные характеристики процесса  $\{x_h\}$ . Представим (9) в виде

$$x_h - a_1 x_{h-1} - a_2 x_{h-2} - \dots - a_h x_{h-k} = z_h,$$

где

$$z_h = \bar{a}_{1,h} x_{h-1} + \bar{a}_{2,h} x_{h-2} + \dots + \bar{a}_{h,h} x_{h-k} + a_{k+1,h} \xi_h;$$

$$\bar{a}_{i,h} = a_{i,h} - a_i; a_i = M\{a_{i,h}\}; M\{z_m z_n\} = 0, \forall m \neq n.$$

В результате  $\{x_h\}$  совпадает с процессом авторегрессии, имеющим место на выходе линейного фильтра описываемого характеристическим уравнением

$$r^k - a_1 r^{k-1} - a_2 r^{k-2} - \dots - a_k = 0, \quad (10)$$

на вход которого поступает случайный процесс  $\{z_h\}$  с некоррелированными значениями.

Уравнение (10) называется характеристическим уравнением стохастического линейного фильтра, а частотная характеристика называется частотной характеристикой фильтра.

В [2] показано, что спектральная плотность  $s(\omega)$  процесса  $\{x_h\}$  совпадает с квадратом модуля частотной характеристики рассматриваемого фильтра:

$$s(\omega) = \frac{\sigma_z^2}{2\pi} |1 - a_1 \exp\{-i\omega\} - a_2 \exp\{-2i\omega\} - \dots - a_k \exp\{-ki\omega\}|^2,$$

$$\text{где } \sigma_z^2 = M\{x_h^2\}.$$

Умножая обе части выражения (16) на  $x_0$  и переходя к математическим ожиданиям, можно определить корреляционную функцию  $R_h = M\{x_{h+m} x_h\}$  процесса  $\{x_h\}$ , которая удовлетворяет разностному уравнению

$$R_{m+k} - a_1 R_{m+k-1} - a_2 R_{m+k-2} - \dots - a_k R_m, m = 0, 1 \dots$$

Таким образом, можно сделать вывод, что стохастические фильтры описываются простыми рекуррентными уравнениями и могут быть использованы для имитации соответствующих случайных процессов.

Часто для моделирования реальных процессов используются модель скользящего среднего – авторегрессии:

$$\lambda_h = \sum_{l=1}^{\rho} a_l \lambda_{h-l} + \sum_{n=0}^q b_n \xi_{h-n},$$

где  $a_l, b_n$  – коэффициенты авторегрессии и скользящего среднего;  $\xi_h$  – некоррелированная последовательность случайных величин;  $\rho$  и  $q$  – порядок авторегрессии и скользящего среднего.

Если последовательность  $\{\xi_h\}$  – гауссовская, то ПРВ последовательности  $\{\lambda_h\}$  также гауссовская. В противном случае  $W(\lambda)$  может отличаться от гауссовской.

Определить степень близости ПРВ  $W(\lambda)$  к гауссовской можно с помощью кумулянтов

$$\kappa_n = j^n \left[ \frac{d^n \ln \Theta(u)}{du^n} \right]_{u=0},$$

которые являются коэффициентами разложения в ряд логарифма характеристической функции случайного процесса, и кумулянтных коэффициентов  $\gamma_n = \kappa_n / \kappa_2^{n/2}$ . При гауссовской ПРВ  $\kappa_n = 0; \gamma_n = 0 \forall n > 2$ . По значениям коэффициентов  $\gamma_n$  можно судить о близости ПРВ к гауссовской.

Рассмотрим, как используются кумулянты для анализа уравнения ав-



торегрессии второго порядка

$$\lambda_h = a_1 \lambda_{h-1} + a_2 \lambda_{h-2} + \xi_h.$$

В этом случае ПРВ вектора  $\vec{\lambda}_h^T = (\lambda_h, \lambda_{h-1})$  будет определяться в общем случае бесконечным набором двумерных кумулянтов  $\kappa_{lm}^{\vec{\lambda}_h}$ . Сумма нижних индексов определяет порядок кумулянта.

Из последнего уравнения можно получить рекуррентное уравнение для кумулянтов:

$$\kappa_{h-l,l}^{\vec{\lambda}_h} = \sum_{i=0}^{n-l} c_{n-l}^i a_1^{n-l-i} a_2^i \kappa_{h-i,i}^{\vec{\lambda}_{h-i}} + \kappa_{n-l,l}^{\vec{\xi}_h}; l = \overline{0, n}, \quad (11)$$

где  $\kappa_{n-l,l}^{\vec{\xi}_h}$  – кумулянт вектора входных воздействий  $\vec{\xi}_h^T = (\xi_h, 0)$ .

Ограничимся эксцессным приближением:  $\kappa_n = 0, \forall n > 4$ .

В качестве  $\{\xi_h\}$  будем использовать последовательность с симметричными относительно нуля ПРВ. В этом случае  $W(\lambda)$  также будет симметричной, так что  $\kappa_3 = 0$ . В результате параметрами, которыми будет характеризоваться отличия ПРВ  $W(\lambda)$  от гауссовской, является кумулянты четвертого порядка.

Поскольку в стационарном режиме  $\kappa_{lm}^{\lambda_h} = \kappa_{lm}^{\lambda_{h-1}} = \kappa_{lm}$ , из уравнения (11) можно получить замкнутую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \kappa_{40} &= a_1^4 \kappa_{40} + 4a_1^3 a_2 \kappa_{31} + 6a_1^2 a_2^2 \kappa_{22} + 4a_1 a_2^3 \kappa_{13} + a_2^4 \kappa_{04} + \kappa_4^\xi; \\ \kappa_{31} &= a_1^3 \kappa_{40} + 3a_1^2 a_2 \kappa_{31} + 3a_1 a_2^2 \kappa_{22} + a_2^3 \kappa_{13}; \\ \kappa_{22} &= a_1^2 \kappa_{40} + 2a_1 a_2 \kappa_{31} + a_2^2 \kappa_{22}; \\ \kappa_{13} &= a_1 \kappa_{40} + a_2 \kappa_{31}; \\ \kappa_{04} &= \kappa_{40}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решив систему уравнений (12), при заданных  $a_1$  и  $a_2$ , можно определить ПРВ  $\vec{\lambda}_h$  с помощью двумерного ряда Эджворта:

$$W(\lambda_h, \lambda_{h-1}) = W_r(\lambda_h, \lambda_{h-1}) \left\{ 1 + \sum_{n+m=4} \frac{\kappa_{nm}}{n!m!} H_n(\lambda_h) H_m(\lambda_{h-1}) + \dots \right\},$$

где  $W_r(\lambda_h, \lambda_{h-1})$  – гауссовская ПРВ. Для простоты полагали, что  $\kappa_{01} = \kappa_{10} = 0; \kappa_{02} = \kappa_{20} = 1$ .

В качестве исходных параметров системы (12) удобно задавать коэффициенты  $r_1$  и  $r_2$ , характеризующие корреляцию между  $\lambda_h, \lambda_{h-1}$  и  $\lambda_h, \lambda_{h-2}$  соответственно.

Коэффициенты авторегрессии  $a_1, a_2$  связаны со значениями корреляционной функции уравнения Юла – Уоккера:

$$a_1 = \frac{r_1(1-r_2)}{1-r_1^2}, a_2 = \frac{r_2-r_1^2}{1-r_1^2}.$$

Исследования показывают, что при сильно коррелированных выборках, то есть, при  $r_1, r_2 > 0,9$  происходит нормализация распределения  $W(\lambda)$ , то есть  $W(\lambda)$  ближе к гауссовскому, чем  $W(\xi)$ .

**Выводы.** Таким образом, были рассмотрены и проанализированы методы формирования негауссовских случайных процессов, сигналов и помех, на основе стохастических дифференциальных уравнений. Проанализированы

вопросы, связанные с формированием скалярных, векторных и  $n$ -связных непрерывных марковских негауссовских последовательностей, а также дискретных марковских процессов с дискретным и непрерывным временем наблюдения.

Проанализирована работа формирующих фильтров с параметрическим шумом и с возмущающими воздействиями, не являющимися гауссовскими процессами.

Осуществлен анализ формирования процесса с негауссовской ПРВ при воздействии пуассоновского процесса, а также формирование случайных негауссовских процессов с помощью стохастических фильтров. Показано, что стохастические фильтры описываются простыми рекуррентными уравнениями и могут быть использованы для имитации соответствующих случайных процессов.

#### *Литература*

1. Евланов Л.Г., Константинов В.М. Системы со случайными параметрами // М.: Наука. 1976. 568 с.
2. Евстихеев Н.Н., Сандлер Е.А. Стохастические фильтры и формирование случайных процессов // Проблемы передачи информации. 1989. Т.25. Вып.2. С.13-20.
3. Казаков В.А. Воздействие бинарного марковского процесса на системы первого порядка // Радиофизика. 1987. № 2. С.1508-1513.
4. Казаков В.А. Кинетические уравнения для плотности вероятности немарковских процессов. Эволюция моментных и кумулянтных функций // Радиофизика. 1987. № 11. С.1309-1320.
5. Тихонов В.И. Нелинейное преобразование случайных процессов // М.: Радио и связь. 1986. 296 с.
6. Тихонов В.И., Кульман Н.К. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов // М.: Сов. радио. 1975. 704 с.

УДК 620.92

**Машинное обучение распределению заданий в мультиагентной робототехнической системе при ликвидации чрезвычайных ситуаций**

**В.Я. Вилисов**, д.э.н., к.т.н., профессор кафедры «Математики и естественнонаучных дисциплин»,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Представлен алгоритм машинного обучения модели транспортного типа оптимальному распределению заданий в гетерогенной группе роботов, действующих в автоматическом режиме без участия оператора. Предполагается, что модель обучается опытным оператором в условиях полигона, адекватного реальной чрезвычайной ситуации, в которой роботам предстоит выполнение операций. По настроенной модели в реальной обстановке задания могут распределяться по схеме супервизорного или децентрализованного управления. Обучение может выполняться и в процессе штатного функционирования роботов. При этом использование обучаемой модели позволяет разделить контуры настройки модели и распределения заданий, что дает возможность роботам и оператору функционировать каждому в своем естественном темпе.*

Робототехническая система, машинное обучение, транспортная модель, обратная задача, чрезвычайная ситуация.

**Machine training to the distribution of tasks in the multi-agent robotic system in the elimination of emergency situations**

**V.Ya. Vilisov**, D.Sc., Ph.D. Professor of the Department «Mathematics and Natural Sciences»,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*An algorithm for machine learning of a transport type model is presented for the optimal distribution of tasks in a heterogeneous group of robots operating in an automatic mode without operator participation. It is assumed that the model is trained by an experienced operator in a landfill environment adequate to a real emergency situation in which robots are to perform operations. According to the configured model in a real setting, tasks can be distributed according to a supervisory or decentralized control scheme. Training can be carried out and in the process of the regular operation of robots. In this case, the use of the learning model*

*allows you to split the configuration tuning circuits and the assignment of tasks, which enables the robots and the operator to function at their own natural pace.*

Robotic system, machine learning, transport model, inverse problem, emergency situation.

### **Введение**

Робототехнические системы (РТС) в различных прикладных областях могут функционировать в широком диапазоне режимов – от чистого манипулирования оператором до автономного выполнения ими заданий в составе гетерогенной группы. При этом роль человека, как оператора и/или лица, принимающего решения (ЛПР), за которым остается априорное или текущее целеполагание, может варьироваться в широких пределах, обеспечивая РТС необходимый уровень автономности.

Здесь и далее будем считать, что человек, прямо или косвенно участвуя в работе РТС, фактически являющийся ее частью.

В большинстве сфер применения РТС идеальным является такое положение дел, когда отдельный робот или группа роботов выполняют все возложенные на них задачи в автономном режиме. Однако к этому идеалу удается приблизиться далеко не всегда, что часто связано с особенностями прикладной сферы, с неопределенностью среды, и с ограниченными возможностями РТС. Проблеме автономной работы РТС посвящено достаточно много работ [2, 3, 7, 9, 11, 12], что связано не только с ограниченностью ресурсов источников энергии, но также и с динамикой окружающей среды, с нестационарностью целевой обстановки и других ограничений.

Подход [1], развиваемый в данной работе, основан на обеспечении максимальной актуальности целевых предпочтений [6], формализованных и используемых бортовой системой РТС для текущего управления. Это позволяет обеспечить высокую степень автономности РТС, а значит высокую живучесть и эффективность выполнения заданий. В рамках данного подхода рассмотрим особенности алгоритмов решения такого важного классов задач управления, как распределение ограниченных ресурсов в мультиагентных РТС (МАРТС) и их наиболее важные свойства.

Контекстом работы MARTС будем считать [7] проведение поисково-спасательных и ликвидационных работ на химически опасных объектах. При этом пусть MARTС имеет супервизорное управление, при котором распределительная задача решается управляющим центром.

Целью использования данной МРТС является повышение уровня безопасности персонала химически опасных объектов. Система применяется для проведения обследования рабочей зоны с целью выявления очагов химического заражения, определения их параметров, выполнения маркировки безопасных маршрутов эвакуации людей из зоны заражения (путем установки маркеров в узловых точках маршрута), нейтрализации найденных очагов заражения и т.п.

В состав робототехнической системы входит управляющий центр, коллектив агентов-роботов, имеющих различную специализацию и вспомогательное оборудование (измерительное и/или исполнительное). Управляющий центр решает распределительные задачи и формирует команды управления коллективом в целом и обрабатывает информацию, получаемую роботами в процессе выполнения заданий.

Характерными особенностями рассматриваемой группы задач и соответствующих им моделей являются следующие предпосылки:

1. РТС должна эффективно решать задачу распределения с некоторой регулярной или случайной периодичностью.

2. Внешняя среда РТС порождает ситуации, требующие принятия решений (СТПР), что в рассматриваемом контексте означает необходимость решения задачи распределения заданий между роботами. Инициатором решения задачи может быть и РТС в случае выполнения некоторых условий, например, когда уровень заряда источника энергии достиг критического порога.

3. Эффективность работы РТС не может быть задана априори на весь планируемый период работы РТС единственным скалярным показателем [1, 5]. Весь необходимый набор показателей эффективности не может быть выявлен и формализован априори, т.е. на этапе проектирования, настройки, подготовки к выполнению задания.

4. Среда управления может быть нестационарной, т.е. в процессе выполнения задания могут изменяться не только ограничения, но и состав управляемых переменных и целевых предпочтений ЛПР. При этом, несмотря на то, что РТС работает в интересах ЛПР, нестационарность может исходить от него.

#### **Постановка задачи**

Пусть МАРТС состоит из  $n$  роботов, каждый из которых может выполнять одну или несколько задач из заданного списка  $s$  типов задач [7].

Циклограмма комплекса работ, возлагаемых на МАРТС, разделена на  $m$  отдельных заданий (рис. 1). Для выполнения каждого  $i$ -го задания ( $i = \overline{1, m}$ ) требуется  $m_i$  роботов.  $c_{ij}$  – обобщенные (интегральные) издержки выполнения  $j$ -м роботом ( $j = \overline{1, n}$ )  $i$ -го задания. Издержки обычно носят векторный характер, в их состав может входить время выполнения операции, расход энерго- или каких-либо иных ресурсов. Интеграция их предполагает возможность некоторой свертки в единый скалярный показатель.

В число задач, решаемых роботами в рассматриваемом контексте, могут быть, например, перемещение из текущей точки в заданную, выполнение в заданной точке той или иной операции, равномерное распределение роботов в определенной зоне, перемещение некоторого предмета из одной точки в другую и т.п.

Этот тип задач в ряде работ структурно представлен задачами о назначении [1, 10]. Рассмотрим более общий случай – транспортные задачи (ТЗ) т.к. задача о назначении является ее частным случаем.

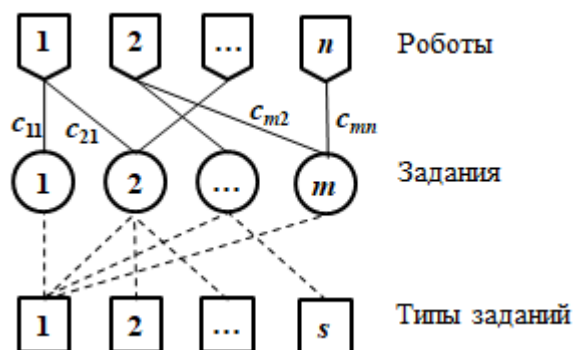


Рисунок 1 – Распределение заданий в MARTC

Решить ТЗ значит найти совокупность значений элементов  $x_{ij}$  матрицы количества ресурсов  $X = \|x_{ij}\|_{mn}$  (в классической ТЗ [10] ресурсы считаются однородным товаром), перемещаемых из пунктов отправления (ПО) в пункты назначения (ПН). Матрицу переменных  $x_{ij}$  называют планом перевозок, а в задачах о назначениях – таблицей назначений, в которой переменные могут принимать лишь булевы значения и, в контексте распределения заданий в группе роботов, означает закрепление  $i$ -го задания за  $j$ -м роботом.

Классическим [1, 10] критерием оптимальности плана является минимум суммарных издержек. В качестве исходных данных обычно полагается известным вектор  $\bar{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m]^T$  объемов запасов находящихся в пункте отправления (ПО) – заданий, где  $T$  – символ транспонирования; вектор  $\bar{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$  объемов потребностей для каждого пункта назначения (ПН) – робота. Матрица  $C = \|c_{ij}\|_{mn}$  стоимости перевозки единицы товара из  $i$ -го ПО в  $j$ -й ПН обычно полагается известной. Для MARTC  $c_{ij}$  интегральные издержки выполнения  $i$ -го задания  $j$ -м роботом. Традиционно [10] ТЗ решаются по критерию минимизации суммарных издержек. При этом полученное оптимальное решение, естественно, будет оптимальным «с точностью до критерия оптимальности». А поскольку реальная действительность многокритериальна практически для всех приложений, то реальная эффективность решения может оказаться далекой от уровня, удовлетворяющего ЛПР, как субъекта целеполагания, или лица, знающего желаемый уровень эффекта MARTC в любой текущий момент времени. Здесь и возникает основное противоречие, сдерживающее эффективное использование модели ТЗ (и других аналогичных), связанное с многокритериальной потребностью приложений и однокритериальной возможностью традиционных моделей. Один из путей преодоления этого противоречия – замена нормативной схемы построения модели – адаптивной [1], суть которой – в выявлении некоторой обобщенной скалярной целевой функции, которая бы аппроксимировала вектор целевых функций ЛПР (явных и неявных) и передавала бы ее в MARTC для исполнения. Тогда

целевая функция (ЦФ) играет роль формализованного образа персональных критериальных предпочтений ЛПР.

### Решение задачи

Приведем математическую постановку транспортной модели в нормативной форме, а затем покажем особенности построения ее адаптивного (машинно-обучаемого) варианта.

ТЗ, как одна из разновидностей задач линейного программирования (ЗЛП), исторически была выделена в самостоятельную группу в силу ее специфической структуры, что позволяет более эффективно решать ее с помощью специально разработанных методов, ориентированных на ручной расчет. Однако современные программные и вычислительные средства позволяют использовать стандартные средства решения ЗЛП, предварительно преобразовав ТЗ в ЗЛП. Далее покажем, каким образом можно представить исходную постановку ТЗ в виде стандартной ЗЛП. Это обстоятельство позволяет реализовать адаптивный вариант ТЗ, опираясь на аналогичные средства ЗЛП [1].

Будем считать, что некоторый начальный (априорный) вариант элементов  $c_{ij}$  платежной матрицы заложен в алгоритм планирования МАРТС. Эти начальные оценки и уточняются в процессе машинного обучения транспортной модели, сходясь к целевым предпочтениям ЛПР. Таким образом, общая схема реализации адаптивного варианта ТЗ (АТЗ) в МАРТС должна состоять из следующих этапов.

1. Ситуации, представленные в виде совокупности двух векторов  $\{\bar{a}, \bar{b}\}$ , и требующие принятия решений, которая на основании текущих значений платежной матрицы  $C = \|c_{ij}\|_{mn}$  решает ТЗ, результатом чего является матрица  $X = \|x_{ij}\|_{mn}$ . Такую задачу будем называть прямой ТЗ (ПТЗ).

2. Найденное решение  $X$  реализуется, в результате чего ЛПР наблюдает эффект  $L(X)$ .

3. ЛПР (или лицо полномочное оценивать решения – ЛПОР), по результатам наблюдения совокупности  $\{\bar{a}, \bar{b}, X, L(X)\}$  дает оценку принятого решения  $q \in \{0; 1\}$  – хорошее оно или плохое (т.е. оптимальное или неоптимальное по его мнению).

4. По совокупности данных  $\{\bar{a}, \bar{b}, X, q\}$  уточняются (подстраиваются) значения платежной матрицы  $C$ , которые становятся текущими для следующего шага планирования (распределения заданий). Уточнение элементов платежной матрицы происходит путем решения обратной транспортной задачи (ОТЗ), алгоритмы которой и реализуют механизм адаптации (обратной связи), позволяющий поддерживать актуальной целевую функцию РТС и адекватной текущим целевым предпочтениям ЛПР.

Таким образом, последовательность приведенных четырех шагов представляет собой итерационную процедуру, в которой поочередно решаются ПТЗ и ОТЗ. Но если есть основания полагать, что среда и предпочтения ЛПР на некотором интервале времени остаются неизменными, то ОТЗ (основная функция которой – обеспечить текущую адекватность ЦФ МАРТС целе-

вой функции ЛПР) может и не решаться. При этом остается лишь выполнить распределение заданий путем решения ПТЗ.

Приведем постановку прямой и обратной ТЗ [1, 10].

ЦФ прямой ТЗ имеет вид:

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

СТПР определяется совокупностью двух векторов  $\{\bar{a}, \bar{b}\}$ , которые для сбалансированной ТЗ должны удовлетворять следующим ограничениям:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Если элементы платежной матрицы имеют смысл издержек, то критерий ТЗ имеет вид:

$$X_{opt} \rightarrow \arg \min_X L(X) \quad (5)$$

Таким образом, соотношения (1)-(5) представляют собой постановку прямой ТЗ, реализуемую в п.1 алгоритма, результатом которой является оптимальный план распределения заданий по роботам. Здесь считаем, что все элементы в различные моменты планирования измеримы. Единственным из элементов задачи, требующим уточнения путем решения обратной ТЗ (см. п.4 алгоритма), является платежная матрица  $C$ .

Для удобства решения ОТЗ путем ряда преобразований [1] можно привести задачу (1)-(5) к одной из форм ЗЛП, удобной для анализа и реализации. Для этого следует уменьшить исходное число  $(m \times n)$  переменных, выразив  $(m + n - 1)$  базисных переменных через остальные (свободные):

$$x_{11} = a_1 - \sum_{j=2}^n b_j + \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n x_{ij}; \quad (6)$$

$$x_{i1} = a_i - \sum_{j=2}^n x_{ij}, \quad i = 2, \dots, m; \quad (7)$$

$$x_{1j} = b_j - \sum_{i=2}^m x_{ij}, \quad j = 2, \dots, n; \quad (8)$$

В результате будет получена задача меньшей размерности, в которой следует искать не всю матрицу  $X$ , а ее блок  $\tilde{X}$  (он включает все элементы матрицы  $X$ , кроме первой строки и первого столбца), имеющую вид уже не ТЗ, а одной из разновидностей ЗЛП с ограничениями-неравенствами:



$$L(X) = \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n \tilde{c}_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

где  $\tilde{c}_{ij} = c_{11} - c_{i1} - c_{1j} + c_{ij}$

$$\sum_{j=2}^n b_j - a_1 - \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n x_{ij} \leq 0; \quad (10)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{ij} - a_i \leq 0, \quad i = 2, \dots, m; \quad (11)$$

$$\sum_{i=2}^m x_{ij} - b_j \leq 0, \quad j = 2, \dots, n; \quad (12)$$

$$\tilde{X}_{opt} \rightarrow \arg \min_{\tilde{X}} L(\tilde{X}) \quad (13)$$

Решив (9)-(13), найдем  $(m - 1) \times (n - 1)$  переменные, а остальные  $(m + (n - 1))$  переменных следует вычислить по формулам (6)-(8), что даст полное решение исходной ТЗ. Для решения ЗЛП (9)-(13) можно воспользоваться любым стандартным методом [5, 10].

Таким образом, приведенная постановка и преобразование ТЗ к ЗЛП дают возможность выполнять все операции оптимального распределения заданий в любой вновь возникшей СТПР с точностью до текущей адекватности платежной матрицы предпочтениям ЛПР.

Адекватность платежной матрицы  $C$  текущим предпочтениям ЛПР обеспечивается решением ОТЗ (см. 4-й шаг алгоритма), что, с учетом приведенных преобразований, может быть выполнено с помощью обратной ЗЛП [1, 4, 6]. Основное расчетное выражение, соответствующее точечному алгоритму оценивания, позволяющее после всякого нового ( $k$ -го) наблюдения вычислить новые значения оценок элементов матрицы  $\tilde{C} = \|\tilde{c}_{ij}\|_{mn}$ , имеет следующий вид:

$$\hat{c}_{ij}^k = \left( \sum_{j=2}^n \sum_{i=2}^m \left( \sum_{t=1}^k \beta^t e_{ij}^t \right)^2 \right)^{-1} \sum_{t=1}^k \beta^t e_{ij}^t, \quad (14)$$

где  $e_{ij}$  – координаты нормального вектора единичной длины (НВЕД), которые являются масштабированными (приведенными к единичной длине) координатами вектора (матрицы) оценок  $\tilde{c}_{ij}$ ;  $\beta$  – весовые коэффициенты, отражающие информативность очередного ( $k$ -го) наблюдения, вычисляемого как длина вектора наблюдения до его нормировки.

### Модельный пример

Рассмотрим коллектив из трех типов роботов ( $n = 3$ ). Каждый робот должен переместиться в одну из двух заданных целевых точек ( $m = 2$ ). Пусть моделируется несколько (в выполненном имитационном эксперименте – 50) циклограмм выполнения работ. В каждой циклограмме количество роботов

того или иного типа может варьироваться от 1 до 7, а общее количество роботов для выполнения работ в той или иной целевой точке может варьироваться в том же диапазоне. При этом баланс требуемого и имеющегося количества роботов соблюдается (транспортная задача сбалансирована). ЛПР для каждой циклограммы решает распределительную задачу, опираясь на свой опыт и интуицию. Однако в силу его субъективного представления об интегральных издержках по каждой паре робот-задание, учитываемые им коэффициенты транспортной таблицы  $c_{ij}$  измеряются с погрешностью. При моделировании погрешность была задана нормально распределенной с параметрами  $N(0; 0.1 \times c_{ij})$ . Полученные решения  $\bar{x}_k$ , как и ситуация, требующая принятия решений  $\{\bar{a}_k, \bar{b}_k\}$ , регистрируются и составляют выборку наблюдений. Моделируемая платежная матрица приведена в таблице 1.

В результате решения обратной задачи на каждом шаге наблюдений с вычислением оценок элементов платежной матрицы были получены пошаговые оценки (рис. 2), а также нормированная (приведенная к единичной длине) величина разности вектора оценок и фактического вектора элементов моделируемой транспортной таблицы (рис. 3).

Таблица 1 – Моделируемая платежная таблица ТЗ

	Робот 1	Робот 2	Робот 3
Задание 1	4	2	3
Задание 2	1	5	4

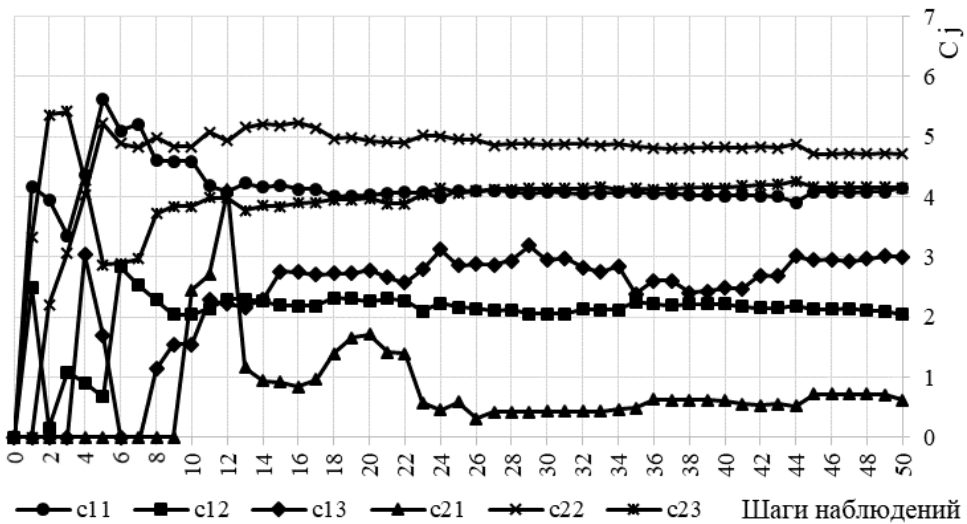


Рисунок 2 – Пошаговые оценки транспортной таблицы

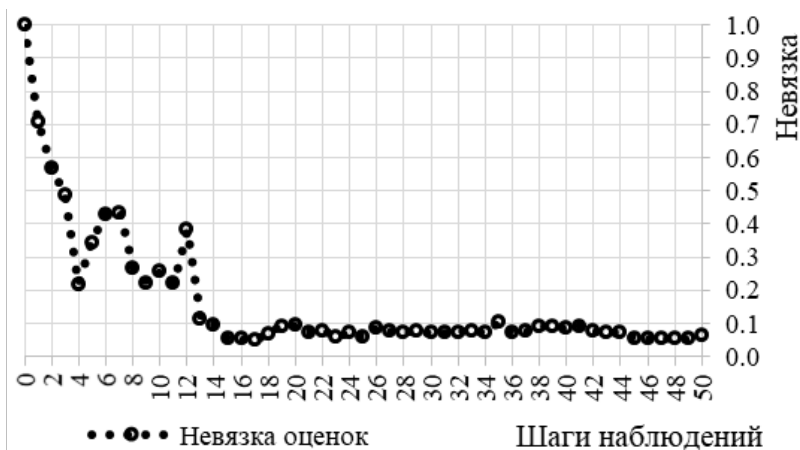


Рисунок 3 – Сходимость невязки оценок транспортной таблицы

Из графика сходимости невязки видно, что даже существенная погрешность в измерениях целевых предпочтений (элементов транспортной таблицы) лицом, принимающим решение, приводит к достаточно быстрому обучению транспортной модели.

#### Выводы

Как показали имитационные исследования алгоритма адаптации обобщенной платежной матрицы транспортной модели (транспортной таблицы) к реальным предпочтениям ЛПР, даже в условиях существенного зашумления измерений предложенный алгоритм машинного обучения модели приводит к достаточно быстрой сходимости оценок. Нормированная погрешность уже с 15-ого шага не превышает 10%. При этом скорость сходимости оценок не является самоцелью при адаптивном распределении заданий в группе роботов, важным показателем является сходимость по решениям, которая существенно выше сходимости оценок, в большинстве случаев более чем на порядок.

#### Литература

1. Вилисов В.Я. Адаптивный выбор управленческих решений. Модели исследования операций как средство хранения знаний ЛПР. Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 376 с.
2. Каляев И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов // М.: Физматлит. 2009. 280 с.
3. Каляев И.А. Проблемы группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. № 6. 2009. С. 33-40.
4. Ли Р. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление // М.: Наука. 1966. 176 с.
5. Оуэн Г. Теория игр // М.: Мир. 1971. 230 с.
6. Райфа Г. Анализ решений // М.: Наука. 1977. 408 с.

7. Рыжова Т.П. Мультиагентная робототехническая система. Распределение задач в коллективе роботов // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2013. С. 101-106.
8. Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении // М.: Связь. 1976. 496 с.
9. Сеница С.Г. Разработка модели боевой робототехнической системы для участия в робототехнических соревнованиях // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2015. С. 275-279.
10. Таха Х.А. Введение в исследование операций // М.: Изд. дом Вильямс. 2005. 912 с.
11. Цариченко С.Г. Особенности применения БПЛА в интересах МЧС // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: Политехника-Сервис. 2015. С. 24-29.
12. Шеремет И.Б. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения // Труды международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника» // СПб: ООО «АП4Принт». 2016. С. 35-39.

УДК 004.4

**Разработка программно-аппаратного комплекса оперативной диагностики конструктивной части воздушных линий 35-220 кВ, эксплуатируемых в северных районах западной Сибири**

**С.В. Григорьева**, к.ф.-м.н., доцент кафедры информационных систем, сетей и безопасности,  
**А.В. Ольшанский**, магистрант кафедры информационных систем, сетей и безопасности,  
Российский государственный социальный университет, г. Москва

*Статья посвящена проблематике обслуживания воздушных линий электропередачи в условиях Крайнего Севера Западной Сибири. Для повышения качества и надежности электроснабжения потребителей в условиях Крайнего Севера Западной Сибири, снижение эксплуатационных затрат и объемов проводимых аварийных работ разработан программно-аппаратный комплекс для оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ, рассмотрены структура программно-аппаратного комплекса регистрации состояния конструктивной части ВЛ 35-220 кВ и структура программно-аппаратного комплекса хранения, обработки и анализа полученных данных о состояниях конструктивной части ВЛ 35-220 кВ.*

Воздушные линии, программно-аппаратный комплекс, информационное обеспечение, геоинформационные системы.

**Development of software and hardware complex of operative diagnostics of structural part of 35-220 kV overhead lines operated in Northern regions of Western Siberia**

**S.V. Grigorieva**, Candidate of physico-mathematical sciences, Associate Professor, Department of information systems, networks and security,  
**A.V. Olshansky**, undergraduate, Department of information systems, networks and security,  
Russian State Social University, Moscow

*The article is devoted to the problems of maintenance of overhead power lines in the Far North of Western Siberia. For improvement of quality and reliability of power supply of consumers in the conditions of the Far North of Western Siberia, decrease in operational costs and volumes of the carried-out emergency works the hardware-software complex for expeditious inspection, assessment and forecasting of change of technical condition of constructive part of air lines (VL) of 35-220 kV is developed, the structure of the hardware-software complex of registration of the condition of constructive part of VL of 35-220 kV and structure of the*

*hardware-software complex of storage., processing and analysis of the obtained data on the States of the constructive part of the VL 35-220 kV.*

Air lines, hardware and software, information support, geographic information systems.

Передача или распределение электрической энергии от подстанций к потребителям по проводам, находящимся на открытом воздухе осуществляется по воздушным линиям (ВЛ), которые считаются важным объектом в системе энергоснабжения. Задача оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий является важнейшей задачей в обеспечении бесперебойного снабжения потребителей электроэнергией.

Для ВЛ, как объекта управления, характерны территориальная распределенность, зависимость от природно-климатических воздействий.

Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей предусмотрены периодические и внеочередные осмотры воздушных линий, при этом периодичность осмотра каждой воздушной линии по всей длине должна быть не реже одного раза в год. Верховые осмотры на линиях, эксплуатируемых 20 лет и более, должны проводиться не реже одного раза в 5 лет. Столь большой интервал времени не позволяет эксплуатирующим организациям оперативно реагировать на изменения состояния воздушных линий в регионах, характеризующихся сложными климатическими и геотехническими условиями. К таким регионам относится Крайний Север Западной Сибири.

Все это требует постоянного оперативного контроля за динамикой изменения состояния фундаментов опор ВЛ с целью прогнозирования аварийности и определения оптимальных способов её предупреждения.

Учитывая протяженность ВЛ в сложных физико-географических условиях, такие обследования и сбор информации о состоянии линий не могут проводиться регулярно из-за высокой трудоемкости. Эти обстоятельства определяют недостаточное информационное обеспечение служб ВЛ и делают невозможным своевременное и эффективное проведение профилактических и ремонтно-восстановительных работ, следствием чего является высокая аварийность электросетевых объектов.

Таким образом, актуальность темы работы обусловлена необходимостью разработки программно-аппаратного и информационного обеспечения эксплуатационных служб электросетевых организаций в части оценки изменений состояния конструктивной части ВЛ 35-220 кВ. В настоящее время нет прямого аналога разрабатываемого программно-аппаратного комплекса на мировом рынке, поэтому данный комплекс может быть востребован на ВЛ 35-220 кВ и аналогичных объектах, эксплуатируемых в сложных климатических, геотехнических условиях и в условиях труднодоступной местности

Опыт проведенных в 1995-2015 гг. инженерных обследований воздушных линий 110-220 кВ ОАО «Тюменьэнерго» [1,2,3] позволяет сделать

вывод о необходимости постоянного оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ.

ОАО «Тюменьэнерго» – одна из крупнейших в России межрегиональных распределительных сетевых компаний. Дата образования – 3 мая 1979 года. В качестве межрегиональной сетевой компании функционирует с 2005 года.

Применяемая в настоящее время методика обследования воздушных линий и выявления аварийных опор основана на определении остаточной несущей способности свай фундаментов. Она включает в себя инструментальные измерения отметок фундаментов, зондирование грунтов в непосредственной близости свай и определении фактической несущей способности с учетом технологии возведения фундамента.

Проанализировав структуру данных об объектах, эксплуатируемых предприятием, был сделан вывод о неудовлетворительном информационном обеспечении персонала в части требований к оперативности доступа к информации и её представительности.

Процесс ручной обработки и анализа данных для принятия решения трудоемкий и требует больших временных затрат. Анализ данных проще проводить, работая с информационной системой. Внедрение системы оперативной диагностики и прогнозирования позволит обеспечить требуемую оценку имеющейся информации, а также снизит риск возникновения ошибок, связанных с так называемым «человеческим фактором».

Степень оперативности такой системы может быть разной в зависимости от природы возникающей аварийной ситуации, так, например, для аварийной ситуации связанной с изменением пространственного положения опор (наклоны, деформации элементов), оперативными могут считаться методы, позволяющие выявлять эти процессы в течение дней и недель, т.к. в основном, эти развития аварийной ситуации происходят за достаточно длительный срок (за несколько сезонов). Для проблем связанных с налипанием и последующим сбросом изморозевых отложений на проводах – это часы, редко дни.

Разработанный программный комплекс позволяет обрабатывать данные аэросъемки, иметь средства хранения обработанных данных и оценивать динамику изменяющихся геологических, гидрологических и конструктивных процессов.

В качестве методов оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ могут быть использованы аэросъемка, аэровидеосъемка, тепловизионный контроль состояния ВЛ, регистрация оптического излучения разрядных процессов, лазерное сканирование, аэрофотосъемка с беспилотного авиационного комплекса [4,5,6].

Система управления базой данных о состоянии конструктивной части ВЛ была разработана на основе геоинформационной системы (ГИС) MapInfo.

Разработанный программно-аппаратный комплекс для оперативного

обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ реализует:

1) функции регистрации (фиксации) текущего состояния конструктивной части воздушных линий электропередачи в точках наблюдения, которыми являются:

опоры ВЛ, в части:

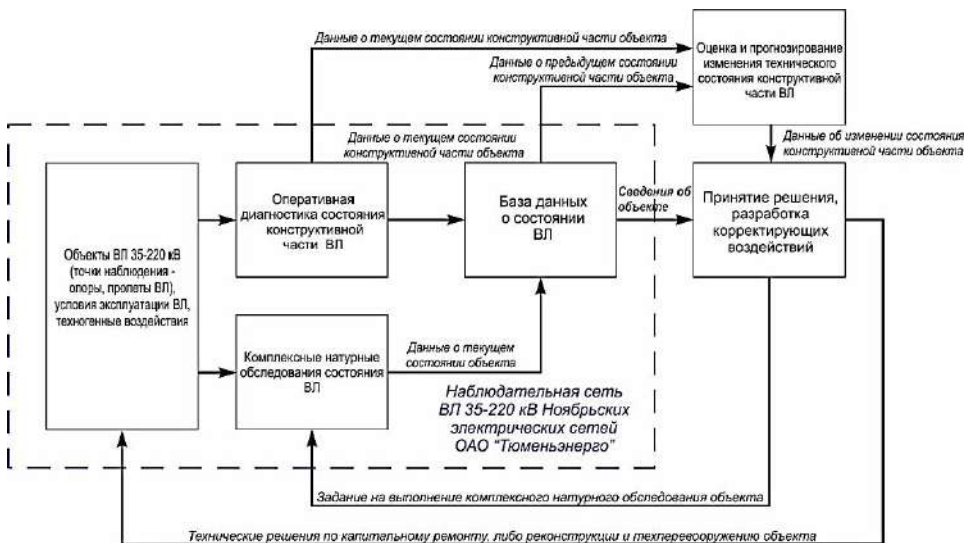
- элементов конструкций опор;
- фундаментов опор;
- линейной арматуры;
- изоляции;

пролеты ВЛ, в части проводов, тросов, ВОЛС-ВЛ;

2) функции количественной оценки изменения состояния конструктивной части воздушных линий в точках наблюдения – получение изображений, пригодных для формирования стереопар и последующих фотограмметрических измерений; точками наблюдения в этом случае являются опоры ВЛ;

3) функции сбора, хранения и представления информации о результатах регистрации текущего состояния и количественной оценки изменения состояния конструктивной части воздушных линий в точках наблюдения.

Укрупненная схема программно-аппаратный комплекс для оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Укрупненная схема программно-аппаратного комплекса для оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ**

Состав программно-аппаратного комплекса регистрации состояния конструктивной части ВЛ:



– узел крепления камеры на летательном аппарате (вертолет МИ-2), предусматривающий возможность: крепления одной либо двух фотокамер, фиксированной установки угла наклона фокальных плоскостей камер относительно ДП авианосителя; необходимо предусмотреть возможность закрепления аэрофотосъемочного комплекса страховочным тросом (тросами);

– демпфирующее устройство, обеспечивающее сохранение установок камеры при вибрационных воздействиях;

– комплект фотокамер с разрешением не менее 15 МПикс и портами связи USB 3.0 либо Ethernet;

– комплект объективов с фиксированным фокусным расстоянием (85 мм – для серийной съемки проводов и 100 мм – для съемки опор ВЛ);

– мобильный ПК (основные требования: процессор – 2-4 ядра; оперативная память – не менее 16 ГБ; жесткий диск объемом от 1ТБ; не менее трех портов USB 3.0; порт Ethernet; функция подключения второго монитора; HDMI, DVI порты для подключения второго монитора);

– выносной монитор для контроля параметров полета и процесса съемки; на монитор выводится информация об области съемки, параметрах полета и необходимости корректировки курса авианосителя;

– антенна GPS/ГЛОНАСС-приёмника для геопозиционирования вертолета и координатной привязки получаемых изображений.

Состав программно-аппаратного комплекса хранения, обработки и анализа полученных данных о состоянии конструктивной части ВЛ:

– ПК (основные требования: процессор – 2-4 ядра, оперативная память – не менее 64 ГБ, жесткий диск объемом от 2 ТБ, видеокарта – с поддержкой мониторов с частотой 120 Гц, стереомонитор);

– программное обеспечение: система управления базой данных о состоянии конструктивной части ВЛ на основе геоинформационной системы (ГИС) MapInfo;

В качестве информационной системы предусмотрена база данных со специально созданной системой управления, размещенная в локальной сети предприятия.

Пространственно-ориентированная база данных о состоянии конструктивной части ВЛ осуществляет:

– сбор, хранение и представление пространственной информации о линейных объектах, входящих в состав наблюдательной сети Ноябрьских электрических сетей ОАО «Тюменьэнерго»;

– сбор, хранение и представление данных о натуральных обследованиях ВЛ, включая фотоматериалы;

– сбор, хранение и анализ результатов оперативной диагностики состояния ВЛ, включая материалы аэрофотосъемки;

– сбор, хранение и представление данных о выявленных в процессе эксплуатации дефектах на ВЛ и их устранении.

Пространственно-ориентированная база данных, входящая в состав программно-аппаратного комплекса, представляет собой 6 основных таблиц

(слоев) и 31 справочника.

Основные таблицы:

- Участок ВЛ – содержит паспортную информацию по каждому участку линии, выделенному по критерию, определенному в соответствии со справочником Критерий\_СП, включающую класс напряжения, номера ограничивающих опор, тип изоляции для каждой цепи, толщины стенки гололеда, значения ветрового давления, проектировщика, год выпуска проекта строительства/реконструкции, титул проекта строительства/реконструкции, объектный номер титула, наименование строительной организации, строившей участок ВЛ, год завершения строительства/реконструкции;

- Опора ВЛ – содержит паспортную информацию по каждой опоре линии, включающую тип и шифр опоры, ссылку на схему опоры, тип и ссылку на схему фундамента, тип и ссылку на схему заземления, ссылки на схемы фазировки для каждой цепи, расположение провода, тип и количество изоляторов, тип соединителей, тип грозотросов, тип дополнительного оборудования (при его наличии), ссылка на шифр карты М1:100000 для использования при пространственной визуализации объекта;

- Пролет ВЛ – содержит паспортную информацию по пролетам, включающую номера ограничивающих опор, информацию о пересечениях с другими объектами, типы соединителей для каждой фазы каждой цепи;

- Материалы наземных обследований опор ВЛ – содержит результаты наземных обследований опор, включая номер опоры, дату обследования, ссылки на фотоматериалы с указанием ракурса съемки, фотоматериалы дефектов обрешетки и тросостойки опоры, а также описание данных дефектов;

- Аэрофотоматериалы съемки опор – результаты аэрофотосъемки, включающие ссылки на фотографии, облачность, угол оси визирования, данные о камере и объективе, тип носителя;

- Аэрофотоматериалы съемки пролетов – результаты аэрофотосъемки, включающие ссылки на фотографии, облачность, угол оси визирования, данные о камере и объективе, тип носителя.

Источником исходных данных для наполнения базы данных в части паспортных характеристик объектов мониторинга является архив эксплуатирующей организации. Источником информации о текущем состоянии объектов являются материалы натурных обследований и материалы аэрофотосъемки ВЛ, выполняемой в рамках плановых облетов инженерным персоналом. Ввод данных о паспортных характеристиках объектов и результатах натурных обследований не автоматизирован ввиду нецелесообразности. Ввод данных аэрофотосъемок предусмотрен в автоматизированном режиме ввиду большого объема получаемых данных.

Перед началом планового облета борт-оператор получает у персонала службы эксплуатации и ремонта ВЛ задание на полет, включающее координаты точек объектов наблюдения и необходимые данные для сбора. В зависимости от полученного задания разрабатывается маршрут движения авианосителя, необходимые ракурсы и параметры экспозиции аэрофотосъемки. Кроме

того, определяется состав бортового комплекса аэрофотосъемки (например, однокамерный комплекс – для съемки пролетов ВЛ, двухкамерный комплекс – для съемки свободностоящих опор ВЛ). В составе бортового комплекса предусмотрено специализированное ПО, обеспечивающее получение информации о текущем положении авианосителя с GPS/ГЛОНАСС-антенны и возможность вывода информации о координатах и сообщений о корректировке параметров полета. Сообщения выводятся на выносной монитор, установленный в кабине пилота.

Управление аэрофотосъемочным оборудованием осуществляется через специализированное ПО, установленное в составе бортового комплекса аэрофотосъемки.

Управлению в автоматическом, полуавтоматическом и, в случае необходимости, ручном режиме подлежат:

- параметры экспозиции;
- синхронизация электронных затворов камер (в случае применения стереофотосъемки);
- интервалы между смежными кадрами (в зависимости от скорости полета и необходимого перекрытия смежных кадров).

Функция сохранения полученных фотоизображений на встроенном накопителе производится автоматически. При этом записывается информация о всех текущих параметрах камеры и текущем положении авианосителя в пространстве. Для облегчения наведения летательного аппарата в случае выполнения съемки с фиксированным положением оптической оси фотокамеры, на выносной монитор пилота выводится изображение, попадающее в поле зрения камеры.

После выполнения полета информация с переносного комплекса передается на автоматизированное рабочее место инженера службы эксплуатации и ремонта ВЛ (СЭиРВЛ), представляющее собой персональный компьютер серверного исполнения. Полученный массив фотоматериалов обрабатывается блоком идентификации объектов мониторинга, в котором каждому фотоснимку присваивается номер опоры, в непосредственной близости от координат которой была произведена съемка. При этом фотоснимки, не привязанные к объектам, бракуются и удаляются.

Последующая обработка аэрофотоснимков заключается в формировании стереопар из смежных кадров, в случае выполнения съемки однокамерным вариантом исполнения комплексом, либо синхронизированных кадров, полученных со стереоаэрофотокомплекса. Полученные аэрофотоснимки обрабатываются в программе PhotoMod, где в ручном режиме осуществляется маркировка характерных точек объектов мониторинга.

Далее выполняется решение стандартной фотограмметрической задачи по определению пространственного положения объекта съемки, в результате которого получается трехмерная модель, описывающая пространственное положение исследуемого объекта. Результаты измерений сохраняются в базе данных аэрофотосъемки. Результаты измерений сравниваются с преды-

дущими материалами съемки конкретного объекта мониторинга, содержащимися в этой же базе, посредством блока анализа и прогнозирования изменения состояния.

В случае выхода измеряемых параметров за пределы допускаемых, выводится на экран информация об отклонении, соответствующая запись в базе данных выделяется альтернативным цветом.

Наблюдательная сеть характеризуется несколькими основными характеристиками. К ним относятся:

- конфигурация сети (пространственные координаты точек наблюдения);
- состав наблюдений в данной точке;
- режим (периодичность) наблюдений для каждого типа точек наблюдения.

Получение информации в наблюдательной сети представляет собой определенную информационную технологию, реализуемую посредством технологического оборудования, и представляется как совокупность:

- методов и методик измерения значений параметров объектов мониторинга;
- способов передачи информации в центр сбора и хранения информации.

Таким образом, для каждого вида объектов наблюдения выделены свои конструктивно-технологические модули наблюдательной сети, выполняющие функцию контроля за объектом мониторинга и представляющие собой совокупность методов и методик измерения, способов передачи информации и соответствующего программно-аппаратного обеспечения.

Целью разработки наблюдательной сети являлся выбор таких значений её характеристик, которые обеспечат:

- оперативное обнаружение отклонения (фактического или прогнозируемого) величины параметра объекта мониторинга за пределы интервала проектных значений;
- репрезентативную информацию для оценки данного отклонения как случайного или указывающего на определенную тенденцию изменения состояния объекта;
- репрезентативную информацию для разработки мероприятий по восстановлению и поддержанию проектных значений параметра объекта.

Внедрение разработанного программно-аппаратного комплекса для оперативного обследования, оценки и прогнозирования изменения технического состояния конструктивной части воздушных линий (ВЛ) 35-220 кВ приведет к снижению эксплуатационных затрат за счет оптимизации планирования проведения профилактических и ремонтно-восстановительных работ на воздушных линиях, возможности предупреждения возникновения аварийных ситуаций при их своевременном выявлении.

*Литература*

1. Григорьев В.С., Ольшанский В.Г., Остробородов С.В., Хромьшев Н.К., Шевцов К.П. Диагностика и способы устранения последствий деформации фундаментов электросетевых объектов, эксплуатируемых в условиях мерзлоты и пучинистых грунтов // Электрические станции. 2007. № 5. С.64-73.
2. Занятин С.И., Индюков А.Т., Лязгин А.Л., Ляшенко В.С., Ольшанский В.Г. и др. Повышение эксплуатационной надежности и долговечности фундаментов опор линий электропередачи в условиях севера Тюменской области // Электрические станции. 1998. № 4. С.34-48.
3. Лязгин А.Л., Ляшенко В.С., Остробородов С.В., Ольшанский В.Г. и др. Опыт предупреждения морозного пучения свайных фундаментов опор ВЛ в северных условиях // Электрические станции. 2004. № 4. С.49-51.
4. Арбузов Р.С., Овсянников А.Г. Современные методы диагностики воздушных линий электропередачи // Новосибирск: Наука. 2009. 136 с.
5. Новые технологии в обследовании ВЛ с воздуха / В.П. Дикой, Н.М.Коробков, А.Г. Овсянников, А.А. Колесников. [Электронный ресурс]. URL: <http://energo20.ru/article-91-46-79.html> (дата обращения: 29.04.2017).
6. Беспилотный самолет ZALA 421-16. [Электронный ресурс]. URL: <http://zala.aero/zala-421-16/> (дата обращения: 29.04.2017).
7. Геоинформатика: учебное пособие / Лайкин В.И., Упоров Г.А. // Комсомольск-на-Амуре: Изд-во АмГПГУ. 2010. 162 с.

УДК 681.5

**Нормативно-правовое регулирование информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами**

**Т.Ю. Кирилина**, д.соц.н., заведующий кафедрой гуманитарных и социальных дисциплин,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», г. Королев, Московская область,  
**Е.Н. Горбанева**, методист, Центр Педагогического Мастерства, г. Москва,  
**А.В. Познякевич**, младший менеджер по развитию бизнеса, Лаборатория Касперского, г. Москва

*На сегодняшний день защита автоматизированных систем управления технологическими процессами в Российской Федерации – одна из самых важных тем в области информационной безопасности. Число киберугроз на промышленные системы увеличиваются, что имеет критическое значение для экологической, социальной и макроэкономической составляющей государства.*

Кибербезопасность, информационные технологии, операционные технологии, ИТ-безопасность.

**Legal and regulatory framework of Information security of automated process control systems**

**T.Yu. Kirilina**, Doctor of sociological sciences, the head of the Department of Humanities and social Sciences,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,  
**E.N. Gorbaneva**, The methodologist in the Center of Pedagogical Skills of Moscow,  
**A.V. Poznyakevich**, The junior business development manager in Kaspersky Lab, Moscow

*Nowadays protection of automated process control systems in the Russian Federation is one of the most important problems in the field of information security. Number of cyberthreats is increasing dramatically that has critical value for an ecological, social and macroeconomic component of the state.*

Cybersecurity, information technology, operating technology, IT-security.

На сегодняшний день защита автоматизированных систем управления технологическими процессами (далее – АСУ ТП) в Российской Федерации (далее – РФ) – одна из самых важных тем и становится не только своеобразным трендом среди промышленных предприятий, но и регламентируется государством [3; 4]. Следует отметить, что специалисты в области информационной безопасности погружены в тему обеспечения безопасности конфиденциальной информации и персональных данных достаточно давно. Вопросы, касающиеся защиты информации, почти во всех отраслях определены, а также выработаны некоторые принципы и подходы к построению систем информационной безопасности.

Проблема обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами активно освещается в научных работах российских и зарубежных ученых, отчетах по исследованиям специализированных вредоносных программ и других работах. Целесообразно отдельно выделить достаточно полный и проработанный аналитический отчет Гарбука С.В., Комарова А.А. и Салова Е.И. «Обзор инцидентов информационной безопасности АСУ ТП зарубежных государств», выпущенный в 2010. В своей работе я буду также опираться на статью Гаврилова В. «Фундамент безопасности АСУ ТП: от правовых основ до особых методик», аналитический отчет Гордейчика С. «Безопасность промышленных систем в цифрах» и отчеты специалистов центра реагирования на инциденты кибербезопасности (далее – ICS-CERT). Также следует отметить масштабное исследование «Лаборатории Касперского» «ICS and their online availability» в 2016 году. Кроме того, в этом же году «Лаборатория Касперского» открыла собственный, первый в РФ ICS CERT, который направлен на координацию действий производителей систем автоматизации, владельцев и операторов промышленных объектов, исследователей информационной безопасности при решении задач защиты промышленных предприятий и объектов критически важных инфраструктур [9].

Следует заметить, что все же остается немало вопросов в части защиты систем АСУ ТП на промышленных предприятиях и предприятиях топливно-энергетического комплекса. Немаловажную роль в этом играет то, что защита таких систем до недавнего времени в РФ была вне зоны внимания специалистов по информационной безопасности и государственных регуляторов [1, с.3].

Внимание к данной проблеме было вызвано несколькими факторами: Первый – произошедшие и происходящие в настоящий период инциденты (вирус-червь Stuxnet, взлом серверов и кража информации OaSyS SCADA Telvent (Schneider Electric) и другие инциденты). Второй – закончился долгий период отсутствия внимания к проблеме со стороны отечественных регуляторов. После выпуска документа «Система признаков критически важных объектов» в 2005 г. наступала семилетняя пауза, которая была прервана Советом Безопасности РФ. В 2012 г. был выпущен документ «Основные направления государственной политики в области обеспечения безопасности автоматизи-

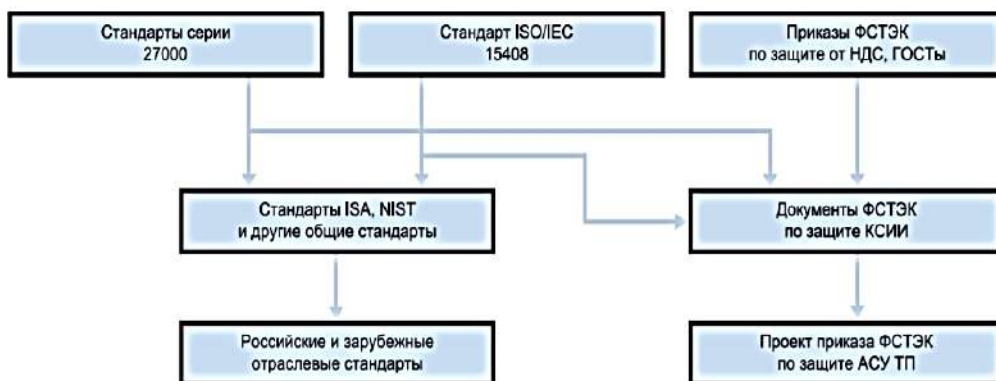
рованных систем управления производственными и технологическими процессами критично важных объектов инфраструктуры Российской Федерации». После этого государственные регуляторы начали уделять достаточно пристальное внимание вопросам защиты АСУ ТП.

**Нормативно-правовое регулирование ИБ АСУ ТП**

Проработка вопросов по подготовке нормативных документов, касающихся обеспечения информационной безопасности АСУ ТП, впервые началась в США в начале XXI века. На сегодняшний день можно перечислить несколько десятков различных документов от ряда организаций. Европейское сообщество тоже не оставалось в стороне и подготовило ряд соответствующих документов из которых целесообразно упомянуть следующие: ISA SP99, NIST SP800-82, ISA/ IEC 62443.

Нормативные документы, которые призваны регулировать обеспечение ИБ АСУ ТП, можно разделить на два типа: общие требования безопасности и промышленные стандарты безопасности, которые учитывают особенности конкретной области. Подобных областей можно выделить порядка пятнадцати [3, с.4].

В Российской Федерации действуют не меньше тридцати документов, которые в разной степени затрагивают и регламентируют информационную защиту АСУ ТП. Иерархия документов в общем случае представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Иерархия документов, регламентирующих ИБ АСУ ТП**

Источник: Обеспечение информационной безопасности АСУ ТП // bis-expert.ru/articles/49501

Из категории документов, регламентирующих информационную защиту автоматизированных систем управления технологическими процессами в России, целесообразно выделить четыре документа Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (далее – ФСТЭК): «Базовая модель угроз безопасности информации в КСИИ», «Методика определения актуальных угроз безопасности информации в КСИИ», «Общие требования по обеспечению безопасности информации в КСИИ», «Рекомендации по обеспечению



нию безопасности информации в КСИИ». Перечисленные документы распространялись только под грифом «Для служебного пользования (ДСП)». Следует отметить, что именно с момента выпуска данных четырех документов в 2007 году, база документов в сфере защиты АСУ ТП начала развиваться более предметно.

Новым витком развития нормативной базы можно считать принятие в 2011 г. Федерального закона №256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК)», который обязывал к проектировке и внедрению систем обеспечения информационной безопасности объектов ТЭК. Данный закон обязывал субъектов топливно-энергетической отрасли использовать системы защиты информации от неправомерного доступа, уничтожения, модифицирования, блокирования или других неправомерных действий.

Следующей стадией развития нормативно-правовой базы можно считать принятие приказа ФСТЭК России №31 в 2014 г. Данный документ содержит ряд требований к обеспечению информационной безопасности АСУ ТП на критически важных объектах (далее – КВО), а также потенциально опасных или представляющих повышенную опасность объектах. Можно отметить, что на сегодняшний день с практической точки зрения именно этот документ является главенствующим в вопросе обеспечения ИБ АСУ ТП. Документ был разработан в соответствии со сложившимися представлениями об обеспечении информационной безопасности предприятия, ясно формулировал и определял требования к защите информации. Он содержит описание жизненного цикла как самой АСУ, так и ПО, требования к составу средств защиты в зависимости от конкретной системы, однако не включает конкретные методические указания по защите ИБ. Нормативные документы ФСТЭК определяют, что состав и содержание мер защиты АСУ ТП должен определять владелец или оператор системы в зависимости от ее класса защищенности, структурно-функциональных характеристик АСУ ТП, реализуемых информационных технологий, особенностей функционирования защищаемого технологического процесса и от актуальных угроз и целей защиты. В состав приказа ФСТЭК № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды», входят следующие блоки требований:

- идентификация и аутентификация субъектов доступа и объектов доступа;
- управление доступом субъектов доступа к объектам доступа;
- ограничение программной среды;
- защита машинных носителей информации, на которых хранится и (или) обрабатывается защищаемая
  - информация;
  - регистрация событий безопасности;

- антивирусная защита;
- обнаружение (предотвращение) вторжений;
- контроль (анализ) защищенности защищаемой информации;
- обеспечение целостности АСУ ТП и защищаемой информации;
- обеспечение доступности защищаемой информации;
- защита среды виртуализации;
- защита технических средств;
- защита АСУ ТП, ее средств, систем связи и передачи данных;
- безопасная разработка прикладного и специального программного обеспечения разработчиком;
- управление обновлениями программного обеспечения;
- планирование мероприятий по обеспечению защиты информации;
- обеспечение действий в нештатных (непредвиденных) ситуациях;
- информирование и обучение пользователей;
- анализ угроз безопасности информации и рисков от их реализации;
- выявление инцидентов и реагирование на них;
- управление конфигурацией информационной системы и ее системы защиты [6, с. 31-42].

Следует также отметить утверждение 5 декабря 2016 года Президентом Российской Федерации новой доктрины информационной безопасности. Предыдущая доктрина была утверждена еще в 2000-м году и являлась откровенно устаревшей. Доктрина является документом стратегического планирования в сфере обеспечения информационной безопасности. Согласно утвержденной доктрине «обеспечение устойчивого и бесперебойного функционирования информационной инфраструктуры, в первую очередь критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (далее – критическая информационная инфраструктура) и единой сети электросвязи Российской Федерации, в мирное время, в период непосредственной угрозы агрессии и в военное время» является национальным интересом в информационной сфере [5]. Также следует обратить внимание на проект ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» от 6 декабря 2016 года. В проекте говорится о повышении уровня защищенности объектов критической информационной инфраструктуры. Можно утверждать, что Президент Российской Федерации в последнее время уделяет довольно пристальное внимание вопросу защиты критических инфраструктур. Еще одно свидетельство тому его недавнее послание Федеральному собранию, в котором говорится: «Необходимо укреплять защиту от киберугроз, должна быть значительно повышена устойчивость всех элементов инфраструктуры, финансовой системы, государственного управления. Предлагаю запустить масштабную системную программу развития экономики нового технологического поколения, так называемой цифровой экономики. В её реализации будем опираться именно на российские компании, научные, исследовательские и инжиниринговые центры страны. Это вопрос национальной безопасности и техно-

логической независимости России, в полном смысле этого слова – нашего будущего» [5].

Таким образом, на данный момент у специалистов в области информационной безопасности промышленных предприятий имеется в распоряжении достаточно полная и применимая на практике база нормативных документов, а также поддержка государства в вопросе обеспечения безопасности критических инфраструктур. Следование их требованиям вкупе со знанием лучших отраслевых практик, описанных в зарубежных документах, позволит обеспечивать киберзащиту производственных и технологических процессов.

Для понимания различий отечественного и западного подходов в вопросе регулирования безопасности автоматизированных систем, проведем сравнение 31-й приказа ФСТЭК и стандарта NIST SP 800-82. Первое, что необходимо отметить – это то, что при разработке 31 Приказа специалисты ФСТЭК определённо изучали зарубежные стандарты и рекомендации по обеспечению безопасности автоматизированных систем управления, в том числе и достаточно авторитетный стандарт NIST SP 800-82. Следовательно, можно утверждать, что российский документ хорошо согласован с международной нормативной базой. Тем не менее, имеются и серьезные различия в подходах.

Стоит подчеркнуть, что NIST SP 800-82 является скорее не стандартом, а расширенным набором рекомендаций по комплексному обеспечению безопасности промышленных систем, который также содержит методические наработки практиков в данной области. В свою очередь, Приказ ФСТЭК № 31 – это достаточно формализованный документ, который создавался отчасти по аналогии с Приказами ФСТЭК № 17 и № 2.

В Приказе № 31 работа по обеспечению защиты информации АСУ ТП разделяется на пять этапов:

- формирование требований (в том числе определение уровня значимости системы, необходимого класса защищенности, возможных угроз и требований к системе защиты);
- разработка системы защиты на основе сформулированных требований;
- внедрение системы;
- обеспечение защиты в процессе эксплуатации системы;
- обеспечение защиты при выводе системы из эксплуатации.

Стандарт NIST в свою очередь не выдвигает каких-либо формальных требований, а лишь предлагает набор методик и практических рекомендаций. Он содержит:

- предметные рекомендации, дающие представление о том, с чего следует начать и как наиболее эффективно построить систему защиты в целом;
- упрощенные модели злоумышленника и угроз АСУ ТП;
- большой раздел по типовым угрозам и уязвимостям АСУ ТП;

- рекомендации по созданию и реализации программы обеспечения безопасности АСУ ТП;
- подробное описание архитектуры сектуры АСУ ТП и общее описание подсистемы безопасности;
- всеобъемлющий раздел, посвященный всем классическим подсистемам информационной безопасности (контроль над доступом, идентификация и аутентификация, антивирусная защита, сети, аудиты, криптография и пр.) [8].

Необходимо подчеркнуть, что NIST SP 800-82 и Приказ ФСТЭК № 31 совершенно не противоречат друг другу. И хотя стандарт NIST является не единственным документом, который целесообразно использовать, он содержит все необходимые разделы и может применяться наряду с Приказом ФСТЭК № 31 при построении системы защиты автоматизированных систем управления. Также следует отметить, что в России стало распространенной практикой одновременное использование двух этих документов и, соответственно, подходов.

#### *Литература*

1. Гаврилов В. Фундамент безопасности АСУ ТП: от правовых основ до особых методик // М.: Connect. 2013. № 9.
2. Гарбук С.В., Комаров А.А., Салов Е.И. Аналитический отчет «Обзор инцидентов информационной безопасности АСУ ТП зарубежных государств» // М.: НТЦ «Станкинформзащита», 2010.
3. Кирилина Т.Ю. Использование современных информационных технологий при изучении социальной реальности. В сборнике: Современные образовательные технологии, используемые в очном, заочном и дополнительном образовании Сборник трудов по материалам Международной научно-практической Интернет-конференции. 2013. С. 151-159.
4. Кирилина Т.Ю., Кирилина Н.А. Российское и мировое доменное пространство: итоги и перспективы развития // Информационно-технологический вестник. 2017. Т. 12. № 2. С. 64-73.
5. Послание президента Федеральному собранию в 2016 году» [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/politics/20161201/1482599559.html>.
6. Приказ ФСТЭК № 31 «Об утверждении Требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды» // М: 2014г.
7. Указ Президента РФ от 5 декабря 2016 г. N 646 «Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/1036728/>.
8. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security // U.S.: Special Publication 800-82, 2011 г.

9. Kaspersky Lab ICS CERT [Электронный ресурс]. URL: <https://ics-cert.kaspersky.ru/>.

УДК 004.91

## **Основные проблемы внедрения системы электронного документооборота**

**О.В. Ковалева**, аспирант кафедры Информационных технологий  
и управляющих систем,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*В статье рассмотрены основные понятия электронного документооборота, их регламент с правовыми нормами для обеспечения официальной достоверности документа. Проанализированы объективные трудности, с которыми может столкнуться организация при внедрении системы электронного документооборота в свою систему бизнес-процессов, к числу которых можно отнести: экономические, технические, управленческие, организационные и так называемый «человеческий фактор». Предложены пути их решения.*

Электронный документооборот, информационные технологии, корпоративные информационные системы.

## **Main problems of implementation of electronic document management system**

**O.V. Kovaleva**, Post-graduate Student, Chair of Information Technologies  
and Control Systems,  
State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*The article deals with the basic concepts of electronic document management, their regulations with legal norms to ensure the official reliability of the document. The objective difficulties, which the organization may encounter when introducing the system of electronic document management into its system of business processes, include: economic, technical, managerial, organizational and so-called «human factor». The ways of their solution are suggested.*

Electronic document management, information technologies, corporate information systems.

**Введение.** Понятие «Электронный документооборот» очень плотно вошло в жизнь современного человека. В настоящее время ни одна, даже самая маленькая организация без него не обходится, поскольку автоматизация рутинных операций делопроизводства повышает эффективность системы

управления.

В соответствии с иерархией уровней организационной структуры управления процессами для первичного анализа систем электронного документооборота можно использовать следующую классификацию: внутренний документооборот внутри организации, внешний – для взаимодействий с различными государственными органами и другими организациями. Также существует документооборот между гражданами нашей страны и государственными органами (Портал «Госуслуги») [1].

Если электронный документооборот (ЭД) рассматривать с точки зрения функционала системы, то набор операций ограничен компьютеризацией основных задач классического делопроизводства: формирование дел и учет документов, контроль исполнения, а также по итогу формирование необходимой отчетности.

Разберемся в основных понятиях ЭД, как они регламентируются правовыми нормами для обеспечения официальной достоверности документа.

#### **Электронный документооборот. Основные термины**

**Электронный документ (ЭД)** – это информация представленная в электронной форме [2].

**Электронный документооборот (ЭДО)** – это единый механизм работы с документами, представленными в электронном виде [2].

**Электронная подпись (ЭП)** – она позволяет не только защитить передаваемую информацию электронного документа, подтвердив ее подлинность, но и обеспечить контроль его целостности. информация в электронной форме, которая присоединена к другой информации в электронной форме (подписываемой информации) или иным образом связана с такой информацией и которая используется для определения лица, подписывающего информацию [5] является средством защиты информации, обеспечивающим возможность контроля целостности и подтверждения подлинности электронных документов.

При возникновении потребности во внедрении системы электронного документооборота организация может столкнуться с определенными проблемами, которые характерны для внедрения любой информационной технологии (ИТ), и специфическими, связанными, в основном, с человеческим фактором.

К объективным трудностям внедрения можно отнести следующие:

1. Экономические;
2. Технические;
3. Управленческие;
4. Организационные;
5. «Человеческий фактор».

Рассмотрим каждый пункт подробнее:

#### **1. Экономическое обоснование финансирования информационной системы ЭД:**

Поскольку планирование бюджета для внедрения ИТ, частью которой является система ЭД, должно быть обосновано по одному из стандартов (ИТЛ

и ITSM), это в свою очередь требует привлечения квалифицированных специалистов, что для некоторых организаций может стать значительным ударом по бюджету.

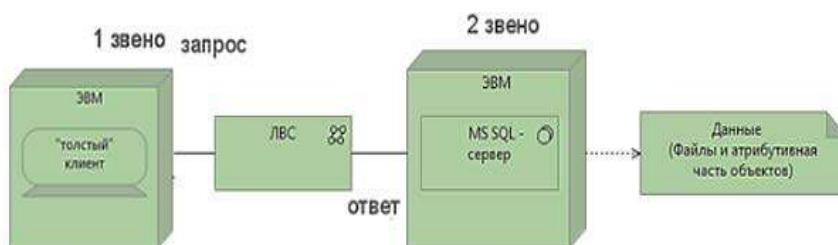
Современная практика развития управлением информатизацией государственных бюджетных организаций предполагает создание условий для проведения конкурсов среди поставщиков программных продуктов в соотношении цена/качество, а также с возможностью адаптации ее под нужды организации силами IT-службы. Информационная архитектура системы ЭД должна соответствовать общей архитектуре государственного управления.

## 2. Технические:

К сожалению, не все предприятия, особенно бюджетные, идут в ногу со временем в части обновления ресурсов информационной системы организации. Их техническое обеспечение оставляет желать лучшего. И это может стать серьезной проблемой на пути перехода организации к системам ЭД, т.к. при установке программного продукта должны быть соблюдены технические характеристики оборудования. Выход: провести внутреннее «сканирование» технических ресурсов организации и при необходимости произвести закупку необходимого оборудования.

После процесса внедрения системы IT-служба организации должна произвести интеграцию системы ЭД с другими корпоративными приложениями.

Следующая техническая проблема, с которой может столкнуться организация – это насколько безопасно будет хранение информации в системе ЭД. И действительно, на сегодняшний день в России существует большое количество нормативно-правовых актов об охране информации (например, «Положение о персональных данных», «Положение о коммерческой тайне» и т.д.). Решение данной проблемы наглядно представлено на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Приложение, основанное на двухзвенной клиент серверной архитектуре**

Из представленной на рисунке схемы мы видим, что работа будет происходить не напрямую с базой данных, а через сохраненные операции. Каждый пользователь системы будет иметь права доступа под необходимый именно ему, в соответствии с должностью, интерфейс и к разрешенным именно ему операциям.

Еще одной технической проблемой может стать, как не странно, раз-



витие организации. Изменяющиеся бизнес-процессы могут значительно перестроить организационную структуру предприятия, что повлечет изменения в обязанностях сотрудников – пользователей системы ЭД. Данную проблему способны решить технически грамотные сотрудники IT-отдела.

Так же сотрудники IT-отдела могут решить и еще одну техническую проблему – проблему нестабильной работы системы. Но при грамотных мероприятиях по профилактике работоспособности системы этой проблемы возникать не будет.

### **3. Управленческие:**

Для внедрения системы ЭД в организацию должна быть проведены определенные управленческие мероприятия, такие как:

1. назначен состав рабочей группы;
2. назначены ответственные лица;
3. разработаны распорядительные документы утвержденные руководством организации;
4. проведено планирование работ по внедрению системы.

Если данный этап работы не будет проведен, организация может столкнуться с проблемой увеличения сроков внедрения системы или ее неполным внедрением.

### **4. Организационные проблемы:**

Естественно, ни одна солидная организация не станет устанавливать себе сомнительный программный продукт. О качестве продукта организация может судить по презентации системы электронного документооборота представителем фирмы-разработчика. А также, по отзывам других организаций – клиентов фирмы-разработчика. Основная организационная проблема может заключаться в том, что фирма-разработчик создала программный продукт не соответствующий ГОСТу. Ведь мы знаем, что документооборот или делопроизводство имеет свои государственные стандарты. И все типовые формы документов должны четко соответствовать этим стандартам [3]. В связи с этим необходимо внимательно подойти к вопросу выбора компании поставщика.

На этом же этапе необходимо и со своей стороны провести полный и последовательный анализ бизнес-потребностей организации. Так как система ЭД должна соответствовать потребностям организации и подстраиваться под них, а не наоборот.

После этого необходимо решить еще одну проблему, проблему корректной постановки задачи фирме поставщику на разработку системы ЭД. При разработке технического задания на создание новой системы необходимо учесть потребности сотрудников организации, а также необходимо руководствоваться ГОСТ 34.602-89 «Техническое задание на создание автоматизированной системы».

Следующая организационная проблема, с которой может столкнуться организация в процессе внедрения системы ЭД – это слабый кадровый состав рабочей группа по внедрению системы. Ведь от того, на сколько квалифицированным будет состав рабочей группы зависит на сколько быстро и просто

пройдет внедрение новой системы.

Именно рабочей группе необходимо будет решить еще несколько организационных проблем:

а) проведение приемо-сдаточных испытаний системы. От того насколько добросовестно сотрудники в составе рабочей группы отнесутся к этому этапу зависит дальнейшая работа системы и каковы будут затраты организации на устранение недоработок. Рабочая группа обязана принять систему, сделав при необходимости перечень доработок;

б) провести обучение сотрудников организации по работе в системе ЭД. На этом этапе, также, можно столкнуться с проблемой низкой компьютерной грамотности сотрудников. В этом случае организации необходимо будет провести дополнительное обучение;

в) организовать постоянную консультационную и техническую поддержку пользователей системы.

### 5. Человеческий фактор:

Самая главная проблема человеческого фактора – это слабая заинтересованность руководства организации. Если само руководство настроено негативно ко всяким нововведениям и уж тем более к расходованиям средств на непонятные компьютерные системы, то внедрить систему ЭД будет очень сложно. Но решение есть, необходимо привести положительный опыт смежных организаций. Возможно, произвести плановые расчеты выгоды после внедрения системы.



Рисунок 2 – Человеческий фактор

Не маловажными человеческими факторами являются возраст и кон-

серватизм сотрудников. Ведь в каждой организации достаточно большое количество сотрудников предпенсионного и пенсионного возраста, у многих сотрудников данной категории низкая компьютерная грамотность или, еще хуже, ее отсутствие. Но эти сотрудники могут быть с большим положительным опытом работы в своей профессии и могут представлять большую ценность для организации. Соответственно, организовывая обучение сотрудников необходимо учитывать возраст при распределении сотрудников по группам для обучения работе в новой системе [4].

Наглядно человеческий фактор можно представить следующим образом (рисунок 2).

Консерватизм сотрудников тоже может являться проблемой. Сотрудники привыкли изо дня в день выполнять одни и те же манипуляции и не хотят ни чего менять, а может бояться, бояться, что не справятся с новыми обязанностями и руководство сочтет их не эффективными. Здесь необходим индивидуальный подход к каждому такому сотруднику. Возможно, привлечение этих сотрудников еще на стадии разработки требований к новой системе.

**Выводы.** Таким образом, из всего описанного выше, мы видим, какие трудности могут возникать у организаций при внедрении систем электронного документооборота. Проведенный анализ показывает, что их заблаговременный учет, позволит не только внедрить электронный документооборот в кратчайшие сроки, без потерь человеческих ресурсов, но и осуществить это в рамках запланированного бюджета.

#### *Литература*

1. Анализ проблем глобальной информационной сети России / Ковалева О.В., Талицин С.И., Иванов О.В., Дадашев Р.Р. / Эволюционные процессы информационных технологий Сборник трудов по материалам II-й межвузовской научно-технической конференции с международным участием. Под научной редакцией В.М. Артюшенко // 2017. С. 86-93.
2. ГОСТ Р 7.0.8-2013 Дата введения 01.03.2014 г., дата последнего изменения 21.12.2017 г.
3. РД 50-34.698-90, дата введения 01.01.1992 г.
4. Факторы, влияющие на выбор системы электронного документооборота / Ковалева О.В. / Эволюционные процессы информационных технологий Сборник трудов по материалам II-й межвузовской научно-технической конференции с международным участием. Под научной редакцией В.М. Артюшенко // 2017. С. 50-58.
5. Федеральный закон «Об электронной подписи» от 06.04.2011 N 63-ФЗ (последняя редакция).

УДК 004.89, 004.94

**Мультиагентная технология информационной поддержки  
сетевидного управления региональной безопасностью**

**А.В. Маслобоев**, доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
Институт информатики и математического моделирования  
Федерального исследовательского центра  
«Кольский научный центр Российской академии наук»  
(ИИММ КНЦ РАН), г. Апатиты

*В работе представлены результаты исследований в области разработки прикладных мультиагентных систем поддержки принятия решений в сфере управления региональной безопасностью. Приводится общая постановка задачи информационной поддержки управления безопасностью региона. Предложены модельный инструментарий и средства автоматизации деятельности участников процессов обеспечения региональной безопасности, взаимодействующих в единой информационной среде. Разработана мультиагентная технология информационной поддержки сетевидного управления региональной безопасностью, основанная на интеграции агентной парадигмы с методом системной динамики и использующая гибридные интеллектуальные агенты с имитационным аппаратом.*

Мультиагентная система, региональная безопасность, информационная поддержка, сетевидное управление, виртуальная структура.

**A multi-agent technology for network-centric control information  
support of regional security**

**A.V. Masloboev**, Dr. Sci. Tech., Senior 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

*The article represents research and work-out results in the field of applied agent-based decision support system development for regional security management. General problem statement of the regional security management information support is carried out. Modeling and automation tools of security manager activities within the region safeguarding process, interacting in the unified information environment, are proposed. A multi-agent technology for network-centric control information support of regional security has been developed. The technology is based on agent-oriented and system dynamics methodologies integration and use hybrid smart agents with integrated simulation toolkit.*

Multi-agent system, regional security, information support, network-centric control,

virtual structure.

### **Введение**

В современных социально-экономических и геополитических условиях особенно остро стоит проблема эффективного информационного обеспечения функционирования сети ситуационных центров региона, являющихся системообразующим элементом системы управления региональной безопасностью. Применение традиционных методов и технологий в данной области не всегда приводит к ожидаемым результатам. Богатый зарубежный и пока еще сравнительно небольшой российский опыт показывают, что эффективное управление региональной безопасностью возможно только на основе использования интеллектуальных информационных технологий и систем, основанных на знаниях. В настоящее время решение такой комплексной и динамичной задачи как информационно-аналитическая поддержка управления безопасностью региона немислимо без современных методов компьютерного моделирования, когнитивных технологий и специализированных программных средств.

Для повышения эффективности функционирования и информационного обеспечения региональных ситуационных центров в ИИММ КНЦ РАН разработана агентная технология информационной поддержки сетецентрического управления безопасностью региона. Технология имеет мультиагентную реализацию [1] и обеспечивает совместное формирование и оценку мультиагентных моделей организационных структур управления безопасностью региона в условиях кризисных ситуаций в социально-экономической сфере. В рамках технологии осуществляется интеграция и автоматизированная децентрализованная обработка распределенных информационных ресурсов, необходимых для выработки и реализации управленческих решений в области обеспечения региональной безопасности, на базе взаимодействия коалиций интеллектуальных автономных агентов, имеющих гибридную архитектуру. Технология реализована в рамках прототипа распределенной мультиагентной системы поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций [2], представляющей собой комплекс программных агентов, веб-сервисов и имитационных моделей управления безопасностью.

### **Специфика систем информационной поддержки управления региональной безопасностью**

Организационная разнородность и территориальная распределенность участников процессов обеспечения региональной безопасности, в совокупности с динамичностью их состава и параметров, создают предпосылки для того, чтобы информационная инфраструктура безопасности региона была активной и децентрализованной. Поэтому, в отличие от существующих централизованных многоуровневых систем информационной поддержки управления безопасностью, разработанная система имеет сетецентрическую архитектуру, которая обеспечивает асинхронный характер взаимодействия и коммуникации агентов, что дает возможность их работы в условиях разнородных

и ненадежных коммуникаций, что весьма актуально для систем регионального масштаба.

Исследование проводилось на примере проблем безопасности, специфичных для Мурманской области. Ключевыми особенностями этого региона, отличающими его от других территорий, являются приграничное местоположение, суровый климат, специфика хозяйственного освоения и перегруженность территории объектами оборонного и промышленного комплексов. Эти факторы в совокупности обуславливают уязвимость арктического региона в плане возникновения разнотипных кризисных ситуаций природного, техногенного и социально-экономического характера. Для нейтрализации последствий таких ситуаций необходимо принимать быстрые и эффективные управленческие решения в очень ограниченное время. Задача усложняется тем, что на практике решения на разных уровнях децентрализованного управления безопасностью принимаются изолированно. Это обусловило необходимость перехода на модель сетцентрического управления [3] безопасностью региона. Предлагаемые разработки, по сути, являются сегодня первой попыткой в направлении преодоления этих трудностей на основе применения мультиагентного подхода и принципов сетцентрического управления.

Сетцентрическое управление региональной безопасностью заключается в реализации сетевой структуры организационного управления с выделенными управляющими центрами, взаимодействие между которыми осуществляется на базе их интеграции в единое региональное информационное пространство. Для системы управления региональным развитием это предполагает создание и использование единой информационной среды для координации децентрализованного принятия управленческих решений. Формирование такой среды в большинстве регионов – открытая задача, еще далекая от реализации.

#### **Постановка задачи и общая характеристика технологии**

Управление региональной безопасностью представляет собой многоэтапный процесс и по своей структуре многофункционально. На каждом этапе для реализации соответствующих функций управления необходимы средства информационной поддержки принятия решений, адекватные решаемым задачам управления безопасностью региона.

Под информационной поддержкой понимается механизм управления, при котором управляющее воздействие носит неформализованный характер, и субъекту управления предоставляется информация о ситуации, на основе которой он получает возможность корректировать как свое поведение, так и объекта управления.

В общем случае задача информационной поддержки управления региональной безопасностью сводится к поиску такого допустимого управления, которое имеет максимальную эффективность и определяет оптимальную траекторию «движения» региональной социально-экономической системы в пространстве устойчивых состояний. Тем самым, задача обеспечения безопасности развития региона становится задачей стабилизации объекта управ-

ления в условиях параметрических возмущений. В качестве регулятора для компенсации возмущений предлагается использовать инструмент информационной поддержки, представляющий собой многофункциональную информационную среду региональной безопасности, обеспечивающую формирование условий для целенаправленного поведения объекта управления.

Основу предлагаемой технологии информационной поддержки составляют следующие разработки [4]:

- формальный аппарат и средства автоматизации, координации и имитационного моделирования процессов децентрализованного управления региональной безопасностью;
- интегрированная концептуальная модель безопасности региона;
- комплекс имитационных моделей прогнозирования и сценарного анализа динамики развития компонентов региональных систем;
- агентная рекуррентная иерархическая модель сетецентрического управления безопасностью региона;
- метод автоматизированного формирования мультиагентных моделей организационных структур управления безопасностью региона;
- метод комплексной оценки безопасности региональных социально-экономических систем;
- архитектура многоагентной среды моделирования задач управления и принятия решений в сфере обеспечения безопасности региона.

В отличие от известных результатов технология основана на интеграции методов концептуального, системно-динамического и мультиагентного моделирования сложных динамических систем и процессов, а также методов теории иерархических многоуровневых систем для координации управления этими системами и процессами.

Входной информацией для разработанной технологии являются: характеристики хозяйствующих субъектов экономики региона, система показателей безопасности региона, открытые статистические данные, экспертные оценки, описания кризисных ситуаций и компетенций субъектов безопасности и другие данные. Исходные данные могут быть представлены как в структурированном, так и в неструктурированном виде. Результирующая информация представляет собой: единое формализованное описание объектов и задач управления региональной безопасностью, интегральные оценки показателей безопасности региона, спецификации эффективных моделей организационных структур управления для каждой области региональной безопасности, параметры и структуру сетецентрической информационной среды региональной безопасности. Сбор и аналитическая обработка данных в рамках предлагаемой технологии реализуется с применением системы автономных программных агентов.

### **Концептуальная модель сетецентрической виртуальной среды безопасности региона**

Для структуризации и единого формализованного представления знаний об объектах и задачах обеспечения региональной безопасности и связан-

ных с ними информационных процессах разработана интегрированная концептуальная модель виртуальной среды региональной безопасности. В модели совмещаются формализованные модели предметной области и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки задач в данной предметной области. Модель представляет собой разновидность неоднородной семантической сети.

Схема и состав модели имеют вид:

$KM = \{ O, S, R, RC, RF, A, CS, CSC, Z, P, SS, U, I, Attr \}$ .

Основными элементами модели являются:  $O, S, P, Z, R$  – множества объектов, субъектов, процессов, задач и ресурсов обеспечения безопасности соответственно;  $RC$  – множество классов ресурсов;  $RF$  – иерархический классификатор предметных областей кризисных ситуаций, построенный на базе ОКВЭД;  $SS$  – множество организационных структур управления безопасностью;  $A$  – множество агентов, представляющих интересы субъектов безопасности в виртуальной среде;  $CS$  и  $CSC$  – множества кризисных ситуаций и их классов соответственно;  $U$  – множество клиентских и серверных узлов, на которых развернута распределенная агентная платформа для исполнения агентов системы информационной поддержки управления региональной безопасностью;  $I$  – отношения на множествах объектов модели;  $Attr$  – множество атрибутов объектов модели.

Программная реализация модели выполнена в виде прикладной онтологии региональной безопасности, которая предназначена для обеспечения семантической интероперабельности информационно-управляющих систем региональных ситуационных центров в процессе интеграции компонентов этих систем в единую информационную среду региональной безопасности и их совместного использования. Онтология создана средствами языка онтологического моделирования OWL в инструментальной среде разработки онтологий Protégé.

#### **Комплекс имитационных моделей управления региональной безопасностью**

Для прогнозирования динамики показателей безопасности региона при заданных параметрах и ограничениях разработана комплексная системно-динамическая модель региональной безопасности. Модель создана на основе разработанной концептуальной модели и библиотеки типовых имитационных шаблонов с применением метода синтеза имитационных моделей сложных систем [5], предложенного в ИИММ КНЦ РАН и обеспечивающего синтез моделей системной динамики из соответствующих концептуальных моделей.

Модель представляет собой комплекс функциональных модельных блоков, позволяющих оценить состояние и тенденции развития региональных элементов и подсистем: демография, производство, рынок труда, наука и образование, окружающая среда и других. Для каждого компонента на модели формализованы основные риски. Модель отличается композитной структурой, то есть структура модели динамически формируется из конечного числа типовых модельных шаблонов, что повышает корректность модели и сокра-



щает время на ее конфигурацию «под задачу».

В модели используется оригинальная система показателей безопасности, созданная в результате формирования интегральных показателей, полученных путем свертки ряда групп общепринятых индикаторов безопасности. Модель включает также индивидуальные показатели региона, отражающие специфику Мурманской области.

#### **Агентная многоуровневая рекуррентная иерархическая модель управления безопасностью региона**

Показатели региональной безопасности различны по природе и содержанию и, как правило, оптимизируются различными элементами многоуровневой системы управления региональной безопасностью. При этом эти показатели являются параметрами локальных целевых функций субъектов управления безопасностью и определяют их предпочтения и сферы интересов. В условиях децентрализованного управления безопасностью региона это обуславливает необходимость координации процессов принятия решений по оптимизации и согласованию этих показателей на разных уровнях управления.

Для решения этой задачи разработана многоуровневая рекуррентная иерархическая модель управления региональной безопасностью. Модель построена на основе функционально-целевой технологии и математического аппарата теории иерархических многоуровневых систем. Модель является аналогом оператора структурно-функционального синтеза исполнительской среды информационно-аналитической поддержки.

Другой отличительной особенностью модели является то, что в ней совмещаются координация путем развязывания взаимодействий и создание коалиций между агентами на разных уровнях управления. Самоорганизация агентов в коалиции и согласование локальных решений сетецентрического управления обеспечивают сокращение времени на выработку и реализацию решений системы организационного управления региональной безопасностью.

#### **Метод формирования и оценки эффективности виртуальных организационных структур управления безопасностью**

Для реализации сетецентрического управления безопасностью региона в рамках распределенной виртуальной среды должны формироваться проблемно-ориентированные организационные структуры управления для каждой области региональной безопасности. Для этих целей разработан метод автоматизированного формирования спецификаций мультиагентных моделей виртуальных организационных структур управления безопасностью региона. Метод основан на совместном анализе семантического описания решаемых задач, информационных ресурсов, сервисов агентов и веб-сервисов.

Структура метода приведена на рисунке 1 и включает шесть этапов:

1. Формализация описаний критических ситуаций и компетенций субъектов управления безопасностью в терминах концептуальной модели информационно-аналитической среды (ИАС РБ).

2. Генерация допустимых вариантов виртуальных организационных структур управления безопасностью (ВОСБ).
3. Анализ эффективности сформированных вариантов виртуальных структур управления.
4. Доопределение параметров виртуальных структур управления в автоматизированном режиме, либо в режиме диалога с пользователем.
5. Оценка показателей безопасности, оптимизируемых элементами организационных структур управления.
6. Доопределение параметров локального контекста агентов и реконфигурация виртуальных структур при изменении ситуации.

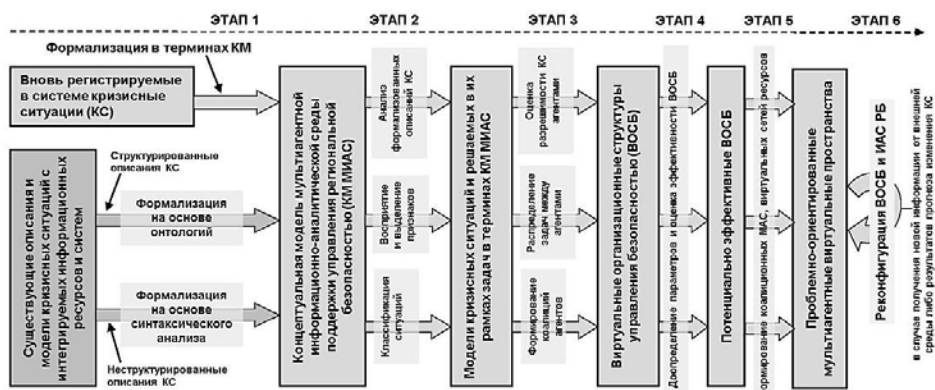


Рисунок 1 – Схема метода формирования мультиагентных сетцентрических виртуальных структур управления безопасностью

Метод отличается совмещением фаз формирования и оценки качества конфигурации структур и обеспечивает динамическое формирование коалиций агентов и связанных с ними информационных ресурсов, адекватных решаемым задачам управления безопасностью.

При формировании сетевых виртуальных структур управления необходимо оценивать качество их конфигурации. Для оценки качества конфигурации элементов структур предложены следующие критерии: 1) связность (целостность) структуры; 2) деловая репутация субъектов безопасности, образующих структуру; 3) совместимость и согласованность взаимодействия элементов структуры; 4) показатели качества функционирования элементов структуры.

### Метод интегральной оценки региональной безопасности

Для синтеза сценариев управления безопасностью региона, как в стабильных, так и в критических ситуациях разработан метод комплексной оценки безопасности региональных социально-экономических систем. Метод отличается формированием матричного показателя региональной безопасности и позволяет оценить состояние и тенденции развития региона за счет комбинированного использования системно-динамических, нечетких и вероятностных моделей оценки индикаторов безопасности.

Матрица показателей безопасности выступает в качестве обобщенной меры интегральной оценки региональной безопасности. Количество столбцов матрицы соответствует числу учитываемых в интегральной оценке безопасности региона составляющих региональной безопасности (экономическая, экологическая, социальная и др.), а число строк – количеству показателей каждой составляющей с максимальным набором параметров. Каждый элемент матрицы представляет собой скалярную или векторную величину.

### Модель функциональной организации интеллектуальных агентов с имитационным аппаратом

Применение мультиагентного подхода для построения системы информационной поддержки управления региональной безопасностью обусловлено тремя решающими факторами: высокой динамичностью среды функционирования субъектов безопасности, необходимостью координации децентрализованного принятия решений и учета человеческого фактора в процессе управления. Агентные технологии являются средством реализации сетецентрического управления.

Отличительной особенностью предлагаемой в работе технологии и основанной на ней системы информационной поддержки является применение автономных программных агентов с внутренней подсистемой имитационного моделирования – имитационным аппаратом. Этим обеспечивается адаптивное моделирование поведения субъектов безопасности с учетом их активности и кооперативности в условиях различных кризисных ситуаций.

Гибридная архитектура такого агента представлена на рисунке 2.

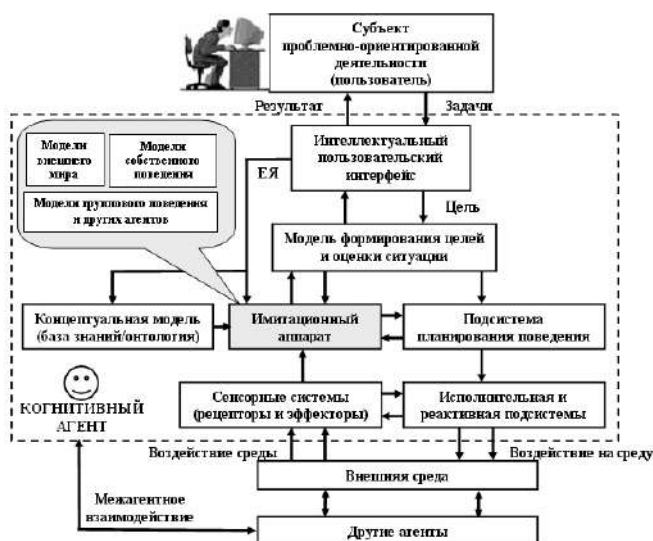


Рисунок 2 – Гибридная архитектура интеллектуального (когнитивного) агента с имитационным аппаратом

Имитационный аппарат представляет собой полную или упрощенную

модель среды функционирования агента, рекуррентно вызываемую в процессе моделирования, и обеспечивает локальный прогноз результатов его деятельности. В качестве средств реализации имитационного аппарата использованы системно-динамические модели. Такое решение существенно повышает автономность агента, расширяет его адаптационные и функциональные возможности.

Отличие предложенного способа функциональной организации агентов от известных подходов заключается в механизме оценки альтернатив дальнейшего поведения. В существующих моделях выбор определяется параметрами анализируемой альтернативы и текущими и/или предшествующими значениями параметров среды функционирования агента. Агенты с имитационным аппаратом при выборе варианта собственных действий на некотором шаге учитывают не только текущее и предшествующие состояния среды, но и предполагаемые будущие значения ее параметров, а также влияние на эти значения деятельности других агентов.

**Технология формирования агентной среды моделирования задач управления региональной безопасностью**

Технология реализуется в четыре основных этапа, схематично показанных на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Структура и этапы технологии формирования агентной среды моделирования задач управления региональной безопасностью**

На первом этапе на основе анализа представленных в концептуальной модели предметной области субъектов и ассоциированных с ними задач проводится определение базового множества классов агентов, которые будут функционировать в синтезируемой системе. К одному классу будет относиться множество агентов, играющих однотипные роли. Например, при моделировании процессов принятия решений в чрезвычайных ситуациях определялись такие классы, как координатор, исполнитель, эксперт в области безопасности. С каждым классом связывается набор общесистемных  $F^b$  и специфических  $F^s$  (определяемых однотипными задачами класса) функций агента.

На втором этапе с использованием процедур анализа интегрированной концептуальной модели и выбора проблемно-ориентированных фрагментов концептуального описания формируется множество экземпляров агентов каждого класса, а также их коалиции. Возможны ситуации, когда субъект, представленный в концептуальной модели предметной области, играет в системе несколько различных ролей. В этом случае для него формируется несколько агентов различных классов. В конкретном сеансе имитационного моделирования может быть задействован как один ассоциированный с субъектом агент, так и несколько. Агенты интерпретируются как алгоритмические исполнители нетерминального уровня. База знаний агента формируется на основе соответствующих фрагментов концептуальной модели.

Третий этап заключается в создании компонентов, обеспечивающих реализацию имитационного моделирования – комплекса системно-динамических моделей, отвечающих как за имитацию динамики среды, так и за «поведение» агентов. Структура каждой имитационной модели синтезируется на основе совместного анализа интегрированной концептуальной модели и синтезированной на предыдущем этапе структуры агентов. Процедуры формального контроля обеспечивают проверку декларативной целостности мультимодельной среды имитации и «покрытия» ею представленных в концептуальной модели задач предметной области.

Четвертый этап заключается в интеграции синтезированных компонент в единую мультиагентную среду моделирования и окончательной настройке этой среды.

### **Заключение**

Анализ проблематики информационной поддержки управления региональной безопасностью позволяет говорить о том, что в современных условиях задача эффективного информационного обеспечения ситуационных центров региона еще не полностью решена. Информационная поддержка, в основном, сводится к созданию и поддержанию в более или менее актуальном состоянии (достаточном для принятия решений) специализированных информационных ресурсов соответствующей тематики. При этом повсеместно используются централизованные технологии создания и функционирования информационных систем. Ситуация по-прежнему напоминает 90-е годы прошлого века, когда существовало большое количество разрозненных, технологически и семантически разнородных баз данных, используемых локально. Разного рода попытки создания централизованных реестров информационных ресурсов не принесли большого успеха. Сегодняшнее повсеместное распространение технологий Интернет и создание информационных ресурсов с веб-доступом для обеспечения безопасности решает лишь половину проблемы. Таким способом обеспечивается лишь распределенный доступ к информации, при этом информационные ресурсы по-прежнему остаются централизованными, что обуславливает их не всегда достаточную актуальность, высокую избыточность, технологическую и семантическую разнородность.

В этой связи перспективной представляется задача создания полно-

стью децентрализованных комплексных систем информационной поддержки управления безопасностью региона, позволяющих гибко интегрировать в логически единое целое существующие и вновь появляющиеся информационные ресурсы и сервисы для поддержки и координации группового принятия управленческих решений.

Представленные в статье разработки могут найти применение для синтеза новых систем распределенного управления безопасностью сложных социально-экономических объектов, а также для повышения оперативности функционирования и точности уже существующих систем обеспечения безопасности критически важных инфраструктур.

Результаты использованы при реализации «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г.» на территории Мурманской области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-07-00167-а).

#### *Литература*

1. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. Second Edition. John Wiley & Sons. 2009. 484 p.
2. Маслобоев А.В. Система поддержки принятия решений в условиях региональных кризисных ситуаций // Информационные ресурсы России. 2017. № 4(158). С. 25-32.
3. Игнатъев М.Б. Просто Кибернетика // СПб: «Страта». 2016. 248 с.
4. Маслобоев А.В., Путилов В.А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике // Апатиты: КНИЦ РАН. 2016. 222 с.
5. Олейник А.Г. Концептуальное моделирование региональных систем // Издательский Дом: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 204 с.

УДК 001.8

**Методика научно-технического прогнозирования  
с помощью нейронных сетей**

**В.В. Нефедьев**, к.т.н., с.н.с.,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Для определения и реализации прорывных технологий важнейшую роль играет научно-техническое прогнозирование. Известные методы прогнозирования основанные на экстраполяции, экспертных оценках и математическом моделировании не являются универсальными и имеют ряд существенных недостатков. В статье предлагается оригинальная методика научно-технического прогнозирования основанная на использовании методологии искусственных нейронных сетей.*

Инновационная деятельность, методы научно-технического прогнозирования, искусственные нейронные сети.

**Technique of scientific and technical forecasting using neural networks**

**V.V. Nefedev**, Ph. D., s.n.s.,

State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*For the definition and implementation of breakthrough technologies the most important is the role of scientific and technical forecasting. Well-known forecasting methods based on extrapolation, expert assessments and mathematical modeling are not universal and have a number of significant disadvantages. The article proposes an original method of scientific and technical forecasting based on the use of the methodology of artificial neural networks.*

Innovative activity, methods of scientific and technical forecasting, artificial neural networks.

В последнем ежегодном послании Федеральному собранию Президент страны говорил о необходимости совершения скачка в области экономики. При этом была поставлена задача развития экономики темпами, превышающими среднемировые. В современных условиях это может быть осуществлено только при переходе от сырьевой экономики к экономике инновационного типа.

Очевидно, что это возможно при условии, что в ряде отраслей народного хозяйства будут найдены и реализованы принципиально новые перспек-

тивные технологии. По нашему мнению, в целях оптимизации усилий, средств, времени из всего многообразия направлений современного научно-технического прогресса важно выбрать несколько наиболее передовых, которые, с одной стороны, действительно стремительно развиваются, а с другой позволяют вывести на новые передовые рубежи целые отрасли.

Для определения этих прорывных направлений главную роль должно сыграть научно-техническое прогнозирование. При этом должны быть решены следующие ключевые задачи:

1. Определение конкретных перспективных целей научных исследований и разработок;
2. Согласование их финансирования, организации и проведения с главными долгосрочными и среднесрочными задачами;
3. Составление общей деловой стратегии, в том числе в области научных исследований;
4. Разработка общей методики оценки результатов научно-исследовательских проектов в свете возможностей и перспектив конкретной отрасли;
5. Проведение научных исследований и организация производства таким образом, чтобы обеспечить максимально быстрое освоение новой технологии на практике.

Важнейшим фактором, который определяет точность и достоверность любого прогноза является выбор метода прогнозирования. Научно-техническое прогнозирование в настоящее время выработало большой спектр различных подходов, методов и методик. Современная отечественная и зарубежная практика насчитывает от 150 до 300 различных методов разработки прогнозов в этой области.

Однако весь спектр методических приемов, которые используются при разработке научно-технических прогнозов можно условно разделить на три основные группы:

- Экстраполяционные методы;
- Экспертные методы;
- Методы моделирования.

Сущность экстраполяционных методов, как известно, основана на продолжении тенденции изменения отдельных параметров (характеристик) исследуемого объекта в будущем. На этом основании с определенной вероятностью можно предсказать пути совершенствования и закономерности развития этого объекта.

Основным недостатком данного метода при прогнозировании направлений развития объектов техники является тот факт, что далеко не всегда удается выбрать тот параметр (количественную характеристику), которая позволяла бы однозначно охарактеризовать основные качества исследуемого объекта.

Методы, основанные на экспертных оценках, используются для прогнозирования развития объектов, которые не поддаются статистическому мо-



делированию и формализации. С их помощью можно также прогнозировать перспективные изменения качественных характеристик объектов техники.

Суть экспертных методов основана на человеческой интуиции и состоит в том, что заключение о перспективных направлениях научных исследований и путях развития технологии делается на основе априорных оценок высококвалифицированных специалистов в данной области. При этом выделяют коллективные и индивидуальные экспертные методы, которые зависят от формы работы с экспертами.

Недостатками этих методов являются, во-первых, тот факт, что все они по определению абсолютно субъективны, а, во-вторых, стремительное развитие некоторых технологий, а также появление абсолютно новых не позволяют порой получить объективные экспертные оценки.

Еще одним часто используемым направлением научно-технического прогнозирования является моделирование процессов развития техники, то есть выяснение перспектив развития техники на основе построения моделей ее развития. Анализ показывает, что такие модели являются наиболее универсальными. С их помощью порой удастся обобщить тенденцию и получить достаточно адекватные прогнозы развития объектов сложных технических систем. На основе этих прогнозов получают динамику развития количественных характеристик прогнозируемых объектов, а также влияние различных факторов на их изменение.

Наиболее часто для целей моделирования процессов научно-технического развития используют методы динамического программирования, исследования производственных функций, исследования операций, статистического анализа и др.

Основным недостатком данного подхода является тот факт, что далеко не всегда удастся разработать адекватную математическую модель процесса развития той или иной технологии. А об универсальной модели вообще говорить не приходится.

Говоря о системе научно-технического прогнозирования необходимо искать ответ не только на вопрос как прогнозировать, но и на вопрос что прогнозировать. Бесспорно, эта система должна включать прогнозы по приоритетным направлениям научно-технического развития страны в целом, региональные и отраслевые прогнозы, а также прогнозы развития отдельных технологий и объектов техники.

В тоже время главная роль в этой сфере принадлежит научно-техническим организациям и предприятиям, которые используют результаты прогнозов в маркетинговых исследованиях и при составлении продуктовых планов своей инновационной деятельности.

В этой связи, очевидно, что в настоящее время наиболее актуальным является разработка методик прогнозирования отдельных видов техники. В свою очередь прогнозы в конкретной отрасли могут быть посвящены либо развитию определенного типа технических объектов, либо развитию узлов (подсистем) тех же объектов. С тем, чтобы на основании прогнозов отдельных

узлов спрогнозировать перспективный облик объекта в целом. Например, прогноз развития авиации должен базироваться на прогнозах развития таких систем, как авионика, авиационные двигатели, радиооборудование, системы управления и др.

С другой стороны перспективы развития большинства систем, из которых состоит современная техника, во многом зависят от технических достижений целого ряда первичных элементов («кирпичиков») современной техники. Таких, например, как микропроцессоры, лазеры, полупроводниковые интегральные микросхемы, микросборки и др. Таким образом, определив перспективы развития этих элементов в целом ряде случаев можно спрогнозировать перспективные характеристики технической системы в целом.

В данной статье предлагается оригинальная методика научно-технического прогнозирования на основе использования искусственной нейронной сети.

В настоящее время этот элемент искусственного интеллекта активно развивается и находит различное применение. Известно, что такая сеть способна распознавать образы, обучаться, обобщать полученную информацию и т.д. Так, например, в целях распознавания образов впервые нашла применение сеть Дж. Хопфилда, которая имеет обратные связи между слоями и это увеличивает ее обобщающие свойства. В дальнейшем были разработаны другие эффективные алгоритмы и архитектуры нейросетей: самоорганизующаяся карта Кохонена, двунаправленная ассоциативная память, сеть обратного распространения и др.

По примеру человеческого мозга искусственные нейронные сети (НС) состоят из многих простейших элементов – нейронов, которые связаны и взаимодействуют между собой. Совокупность этих простейших элементов и создает уникальные свойства нейронных сетей, а именно работа с неполными и зашумленными данными, способность к обобщению и др. Современные искусственные НС весьма разнообразны по своей архитектуре, существует более двадцати их парадигм. Однако в основе каждой из них лежит общий простой основной элемент, а именно искусственный нейрон, имитирующий своего естественного родителя.

Процесс действия искусственной нейронной сети можно представить следующим образом. На вход этого базового элемента (искусственного нейрона) (см. рисунок 1) подается набор (входной вектор  $X$ ) неких входных сигналов:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , которые являются входными сигналами всей нейросети или выходными сигналами других ранее стоящих в сети нейронов.

Каждый такой сигнал умножается на величину (вес) связи:  $w_1, w_2, \dots, w_n$  – являющуюся аналогом эффективности синапса (биологическая связь между двумя нервными клетками). Причем величина эта отрицательна для тормозящей связи нейрона и положительна для возбуждающей. Полученные таким образом входные сигналы поступают на суммирующий их блок (по существу этот блок представляет собой аналог нервной клетки в биологическом нейроне).

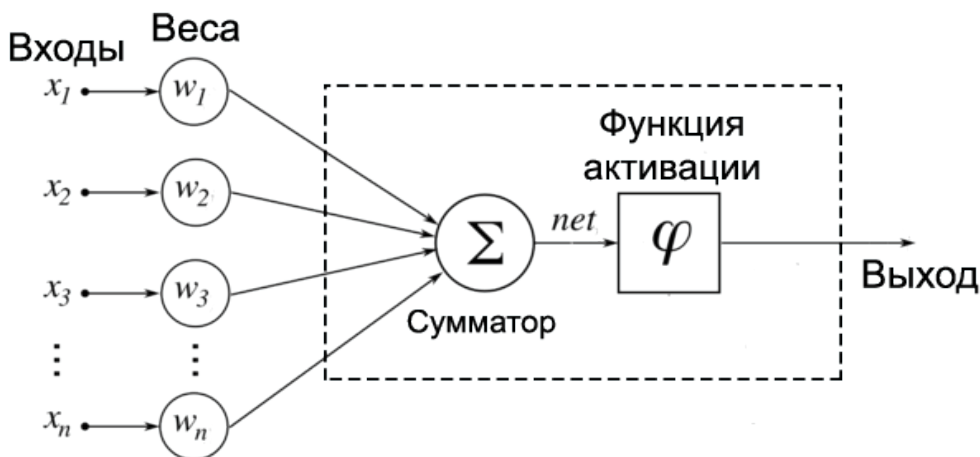


Рисунок 1 – Модель искусственного нейрона

Так называемый блок суммации вычисляет алгебраическую сумму входных сигналов и тем самым определяет степень возбуждения нейрона  $S$ :

$$S = \sum_{i=1}^n x_i * w_i + Q, \quad (1)$$

где:  $Q$  – порог возбуждения нейрона.

Далее уровень возбуждения  $S$  преобразуется с помощью некоторой активационной функции  $Y$ :

$$Y = F(S). \quad (2)$$

На практике наиболее часто используется сигмоидальная (логистическая) функция вида:

$$F(S) = \frac{1}{1 + e^{-\beta S}}, \quad (3)$$

где  $\beta$  – коэффициент, определяющий наклон функции активации.

Пример графика сигмоидальной активационной функции представлен на рисунке 2.

Логистическая функция чаще всего выбирается потому, что позволяет сети работать как со слабыми степенями возбуждения (значения  $S$  около 0), так и с большими степенями возбуждения нейрона.

Таким образом, сети, построенные на основе таких искусственных нейронов, демонстрируют ассоциативные свойства, похожие на свойства реальных биологических нейронных сетей. Именно благодаря этим ассоциативным свойствам они все более уверенно находят применение на практике.

Из всего спектра архитектур, используемых в искусственных нейронных сетях наиболее часто используются многослойные. Фактически когда говорят о практическом использовании НС подразумевают полностью связанные

многослойные нейронные сети. Можно сказать, что именно такие сети стали «классическими».

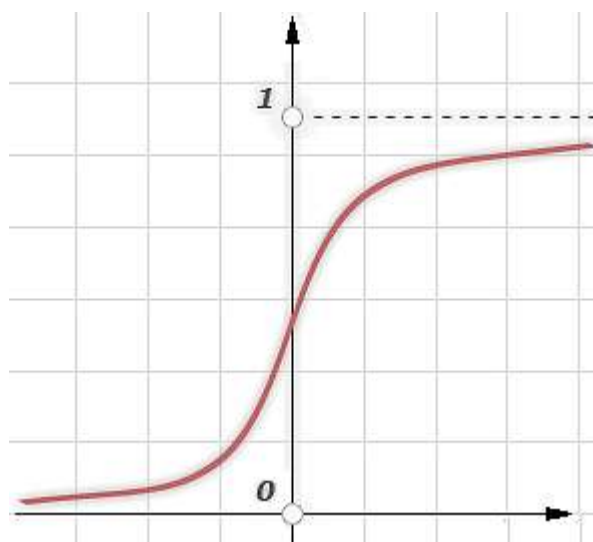


Рисунок 2 – График сигмоидальной активационной функции

В связи с тем, что «обучение» нейросети сопровождается длительным итерационным процессом, построение такой НС связано с большим объемом вычислений.

Появление компьютеров, рост их вычислительной мощности способствовал возможности их практического применения. В настоящее время можно говорить о настоящем буме распространения компьютерных программ, которые используют основополагающие принципы нейросетевой обработки информации.

Рассмотрим кратко «устройство» и принцип действия таких «классических» нейросетей.

Множество нейронов в архитектуре этих сетей соединены в некие, так называемые слои. При этом в данном случае под слоем подразумевается сочетание нейронов, выходы которых соединены с входами нейронов последующего слоя. Чаще всего используются слоистые полносвязанные нейронные сети, у которых выходы каждого нейронного слоя связаны со всеми входами последующего слоя. Пример полносвязанной двухслойной искусственной нейронной сети приведен на рисунке 3.

В компьютерных программах построенных на принципах НС (нейропрограммах) пользователь сам задает необходимую архитектуру определив для этого требуемое число слоев и нейронов в них. Нейросети, состоящие из двух и более слоев, используются чаще всего. Нейропрограммы, построенные на основе таких НС, находят самое широкое практическое использование. Это объясняется широким классом решаемых ими задач и достаточно хорошо отработанными алгоритмами их обучения.

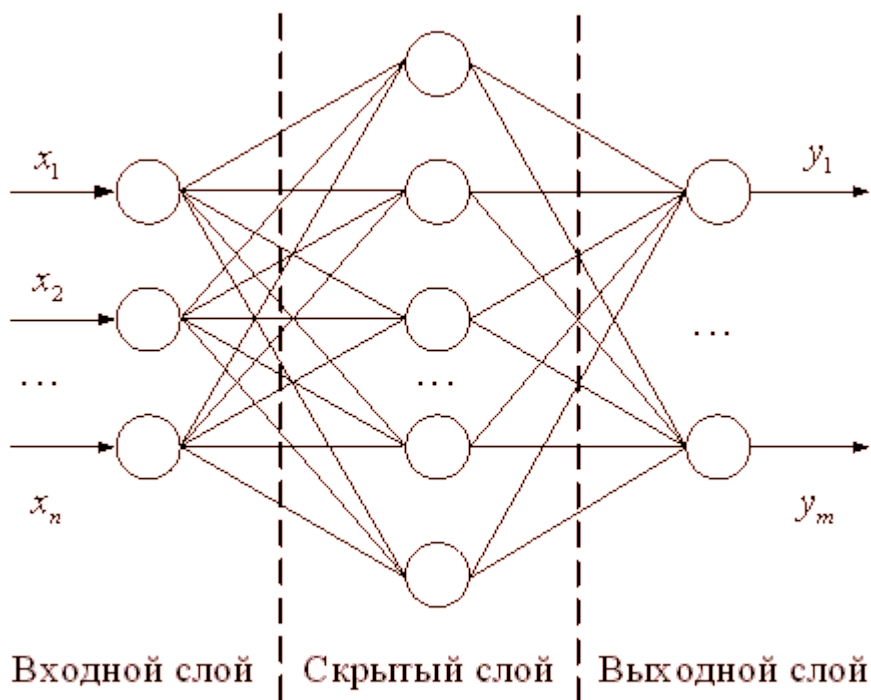


Рисунок 3 – Многослойная нейронная сеть

Важнейшим свойством нейросети является ее способность к самоадаптации и самоорганизации с целью улучшения качества функционирования. Эти свойства проявляются в процессе обучения сети, алгоритм которого задается набором неких правил. Эти правила устанавливают, как входное воздействие изменяет связи нейронов внутри сети. В процессе обучения увеличиваются силы связи (веса синапса) между одновременно активными нейронами. Таким образом, смысл обучения заключается в том, что путем повторения и привыкания усиливаются наиболее часто встречающиеся связи.

В настоящее время разработано большое количество разнообразных алгоритмов (правил) обучения. Все их множество можно условно разделить на две большие группы: «обучение с учителем» и «обучение без учителя».

При «обучении с учителем» при каждой итерации (подачи входных значений на вход НС) производится сравнение выходных данных с требуемыми. Таким образом, эталонные (требуемые) значения выходных данных исполняют роль «учителя», тем самым давая урок нейросети.

В процессе «обучения без учителя» отсутствуют эталонные (требуемые) значения выходных данных, и в этом случае НС обучается сама на конкретных значениях выходных данных, выявляя в них закономерности и проводя на этом основании самоорганизацию. Наиболее известными нейросети с таким принципом обучения являются самоорганизующиеся карты Кохонена.

Наиболее известное использование в настоящее время нейросетей основано на изучении образцов данных, выявления их закономерностей и взаимосвязей. Входными данными в этом случае являются, например, результаты производственного процесса при разных условиях производства, или же котировки акций на бирже. Независимо от свойств наблюдаемого процесса или специфики описывающих его данных нейросеть представляет собой некий абстрактный инструмент поиска и выявления закономерностей.

При введении непрерывной активационной функции в искусственный нейрон, которая является его нелинейной усилительной характеристикой, появилась возможность решения большого класса задач аппроксимации и прогнозирования.

Таким образом, способность НС к прогнозированию (предсказанию) перспективных характеристик, схем, архитектуры и т.п. элементарных узлов современных образцов техники вытекает из ее способности к выделению скрытых зависимостей и обобщению между входными и выходными данными.

#### *Литература*

1. Аверченко В.И. Инновационный менеджмент: учебное пособие для вузов // М.: Флинта. 2016. 293с.
2. Барский А.Б. Логические нейронные сети. Учебное пособие // М.: Интернет-Университет Информационных Технологий. 2007. 352с.
3. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе // М.: МИФИ. 1998. 224с.
4. Жариков В.В., Жариков И.А. и др. Управление инновационными процессами / В.В.Жариков, И.А.Жариков, В.Г. Однолько, А.И. Евсейчев / Учебное пособие // Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного университета. 2009. 180с.
5. Инновационный менеджмент / Редактор: В.Я. Горфинкель, Т.Г. Попадюк // Учебник // М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2016. 392с.
6. Кристенсен К., Энтони С., Рот Э. Что дальше?: Теория инноваций как инструмент предсказания отраслевых изменений // М.: Альпина Паблишер. 2015. 400с.
7. Кулешов Е.В. Макроэкономическое планирование и прогнозирование // Учебное пособие // Томск: Эль Контент. 2015. 178с.
8. Музыка Е.И. Экономическое прогнозирование // Учебное пособие // Новосибирск: НГТУ. 2015. 240с.
9. Образы будущего России: желаемое – возможное – необходимое: материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Москва, 8-9 июня 2016г.: сборник докладов и статей. Под общей редакцией Анонченко А.Б. // М.: МПГУ. 2016.
10. Шкуро Т.Г. Стратегии нововведений // М.: Лаборатория книги. 2010. 36с.

УДК 681.5.01

**Актуальные проблемы разработки и внедрения  
автоматизированной системы управления на городском  
пассажи́рском транспорте**

**А.В. Поначугин**, кандидат экономических наук, доцент кафедры  
«Прикладной информатики и информационных технологий в образовании»,  
Нижегородский государственный педагогический университет  
им. К. Минина, г. Нижний Новгород,

**В.А. Соколов**, кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Информационных и математических дисциплин»,  
Институт пищевых технологий и дизайна  
филиала Нижегородского государственного  
инженерно-экономического университета, г. Княгинино, Нижний Новгород

*Создание автоматизированной системы управления транспортом позволяет увеличить эффективность управления транспортном и результативность мониторинга на базе слаженного функционирования и развития информационно-технологических ресурсов отрасли и создания единого информационного пространства транспортного комплекса.*

*Предметом исследования является автоматизированная система управления на городском пассажирском транспорте. Объектом исследования являются автоматизированные системы управления используемые в сфере услуг.*

*Новизна исследования заключается в применении системного подхода к проектированию информационной системы и рассмотрению не только технологических, но и экономических факторов.*

Автоматизированная система управления, городской транспорт, диспетчерское управление, транспортный комплекс.

**Actual problems of development and implementation of an automated control system for urban passenger transport**

**A.V. Ponachugin**, Ph.D. (Economy), associate professor of the chair  
«Applied Informatics and information technology in education»,  
Nizhny Novgorod state pedagogical university of K. Minin, Nizhny Novgorod,

**V.A. Sokolov**, Ph.D. (Engineering), associate professor, head of the department  
«Information and mathematics»,  
Institute of food technologies and design branch of Nizhny Novgorod state  
engineering-economic University of Knyaginino, Nizhny Novgorod

*Creation of an automated control system for transport allows to increase management efficiency transport and effectiveness of monitoring on the basis of*

*harmonious functioning and development of information and technological resources of branch and creation of a common information space of a transport complex.*

*Object of research is the automated control system on city passenger transport. An object of a research are the automated control systems used in a services sector.*

*The novelty of a research consists in application of system approach to design of an information system and consideration not only technological, but also economic factors.*

Automated control system, city transport, dispatching management, transport complex.

Современные условия экономического развития провоцируют быстрый рост транспортных потоков на дорогах. Это приводит к увеличению числа дорожно-транспортных происшествий, объема выбросов токсичных веществ из двигателя автотранспорта, к временным потерям из-за пробок на дорогах.

Для решения данных проблем необходимо уделять особое внимание организации управления движением транспорта, которая позволит повысить пропускную способность дорог, снизить выбросы токсичных веществ, а также способствовать экономии топлива.

Функция информационного развития предприятия базируется на создании и актуализации интегрированной (в масштабах корпорации) информационной системы на базе компьютерно-телекоммуникационных сетей и развитых программно-математических методов [13]. Главной задачей предприятий городского пассажирского транспорта является удовлетворение потребностей пассажиров в перевозочном процессе. Основными показателями функционирования городского пассажирского транспорта является безопасность и строгое соблюдение графика движения и учёт количества перевезенных пассажиров [23].

Изначально при разработке АСУ применялась дорогостоящие аппаратные составляющие, представлявшая собой «большой арифмометр», предназначенный для уменьшения трудоемких рутинных операций происходящих в контуре управления традиционным технологическим процессом. Обычно проектирование и реализация АСОИУ отмечается достаточно низким уровнем постановки задач и их конкретизации. Одной из причин сложившейся ситуации является привлечение не в полной мере специалистов служб и отделов управления к процессу исследования и проектирования входящих и исходящих информационных потоков, описанию экономико-организационной сущности задач [14].

В настоящее время выделяют классы АСУ по различным критериям:

- 1) по выполняемым функциям АСУ делятся на:
  - а) административно-организационные:



- АСУП – автоматизированная система управления предприятием;
- ОАСУ – отраслевая автоматизированная система управления;
- б) системы управления технологическими процессами (АСУТП):
  - ГПС – гибкие производственные системы;
  - АСУПП – автоматизированная система управления подготовки производства;
  - АСК – автоматизированная система контроля качества продукции;
  - ЧПУ – система управления станками с числовым программным обеспечением;
  - различные комбинации перечисленных видов АСУ (например, АСУП-ЧПУ и т.д.).

2) по результатам деятельности АСУ делятся на:

- информационные;
- информационно-советующие;
- управляющие;
- самонастраивающиеся;
- самообучающиеся.

АСУП одна из самых сложных систем по структуре и по выполняемым функциям. В последнее время применение подобных систем не редко связывают с системами управления бизнес-процессами на предприятии. Автоматизированная система управления отличается от автоматических систем тем, что в управлении процессами участвует человек, который является субъектом управления, выполняющий функции внедрения элементов в систему. Так в типовую автоматизированную систему диспетчерского управления (АСДУ) на транспорте и дорожным хозяйством входят три функциональные уровня:

– нижний – включает в себя программно-технические средства, которые устанавливаются на борту контролируемого транспорта или объектах дорожной инфраструктуры, и выполняют роль управления сведениями от средств независимой проверки и реализации руководящих сигналов и команд, получаемых с верхнего уровня системы;

– промежуточный – включает беспроводные средства связи и обмена данными, которые устанавливаются на борту контролируемого транспорта или объектах дорожной инфраструктуры, или в стационарных и подвижных точках управления, и реализуют роль передачи информации между разными уровнями системы;

– верхний уровень включает программно-аппаратные средства, которые устанавливаются в стационарных и подвижных точках управления, и исполняют функции сбора информации от средств независимого контроля и формирования сигналов управления и команд на базе исследования данных, полученных с нижнего уровня [12].

Дорожное хозяйство представляет собой единый производственно-хозяйственный комплекс, включающий в себя автомобильные дороги общего пользования и расположенные на них инженерных сооружений. Также к до-

рожному хозяйству относятся организации, которые занимаются: проектированием, строительством, реконструкцией, проведением научных исследований, обучением кадров; производством и ремонтом дорожной техники; деятельностью, связанной с развитием автомобильных дорог и обеспечением их функционирования.

От категории дороги зависит поток автомобилей, который она пропускает, а также ее техническое оснащение. Автоматизация объектов дорожного хозяйства выполняется, исходя из функционального назначения объекта и требований к решаемым этим объектом задачам. Характеристики радиосетей сбора данных и регулирования для объектов дорожного хозяйства выбираются с учетом свойств каждого объекта.

Одной из актуальных задач автоматизации управления на городском пассажирском транспорте является задача оперативного диспетчерского управления работой подвижного состава в режиме онлайн и учета фактически выполненной работы. Основным инструментом решения поставленных задач является навигационная система [7].

Зарубежный и российский опыт эксплуатации автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), основой которой является спутниковая навигация, показывает, что при внедрении таких систем уменьшается количество необходимых для выполнения конкретной транспортной работы транспортных средств. Хотя эффективность системы зависит от ее масштабов нелинейно. Это происходит из-за организации централизованного управления парком подвижного состава с учетом реальной обстановки в определенное время [7]. Существующие традиционные АСДУ контролируют транспортные средства, следующие по маршруту из двух или более остановок, совпадающих с контрольными пунктами. Информация, полученная в нескольких контрольных пунктах, не дает полной картины о состоянии перевозочного процесса. Недостаточное владение оперативной информацией ведет к неэффективному диспетчерскому управлению и низкому качеству информирования пассажиров.

К основной задаче автоматизированной системы управления транспортным комплексом (АСУ ТК) России относится поддержание информационно-аналитической реализации Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года [20]. На сегодняшний день транспортная отрасль не имеет полных статистических данных, средств для их получения в режиме онлайн. Это не дает полноценно прогнозировать, планировать и моделировать транспортную ситуацию в крупных российских городах и в случае необходимости корректировать транспортные потоки. По этой причине нужно развивать системы статистического учета и построения транспортно-экономического баланса, применять основанные на нём математические методы прогнозирования потребностей населения в транспортных услугах, моделировать транспортные системы для выбора оптимальных вариантов [18]. Учитывая мировой опыт, для улучшения качества работы транспортного комплекса и примене-

ния транспортной инфраструктуры требуется интегрировать системы управления транспортными потоками и интеллектуальные транспортные системы.

К главным задачам разработки и внедрения АСУ на городском пассажирском транспорте относятся:

- рост качества принятия управленческих решений. Данная задача может быть выполнена путем внедрения новых инструментов управления в транспортную отрасль, базирующихся на актуальных информационных технологиях, которые соответствуют российскому и мировому опыту в области управления системами в масштабе страны;

- рост уровня безопасности путем внедрения единой государственной системы обеспечения транспортной безопасности (ЕГИС ОТБ) как части АСУ ТК, которая поддерживает решения, позволяющие предотвратить акты незаконного вмешательства в задачи обеспечения транспортной безопасности в области транспортного комплекса;

- информирование субъектов транспортного рынка о состоянии транспортной отрасли, необходимого для решения стратегических и оперативных управленческих решений.

Достигнуть такую цель возможно путем организации единого информационного пространства транспортной отрасли, внедрения существующих и вновь созданных автоматизированных систем, в том числе интеллектуальных транспортных систем, развития средств сбора и анализа информации. Функциональная архитектура АСУ ТК состоит из шести функциональных сегментов:

- центральный сегмент, отвечающий за мониторинг и управление ТК, и пять сегментов по видам транспорта, относящимся к федеральным службам и агентствам;

- сегмент обеспечения, реализующий функции сбора данных с разных автоматизированных систем, в том числе от интеллектуальных транспортных систем, отвечает за информационную безопасность, эксплуатацию и сопровождение системы. Функциональные сегменты являются независимыми частями АСУ ТК. Его основой являются информационные системы, учитывающие специфику работы подведомственных Минтрансу России служб и агентств.

Предлагается использовать новый подход систематизации транзакции данных между подведомственными Минтрансу России служб, основанный на быстром сборе информации, поступающей из различных сегментов транспортного комплекса. Данный подход схематично изображен на рисунке 1.

Объекты АСУ ТК реализуются на трех ступенях – федеральной, региональной и линейной.

На федеральном уровне представлены: Федеральный центр обработки данных, Компоненты федерального уровня сегментов видов транспорта, федеральные центры [19]:

- управления транспортным комплексом;
- управление комплексной безопасности и обеспечения стабильности

транспортной системы;

- управления эксплуатацией и технической поддержкой;
- обучения персонала.

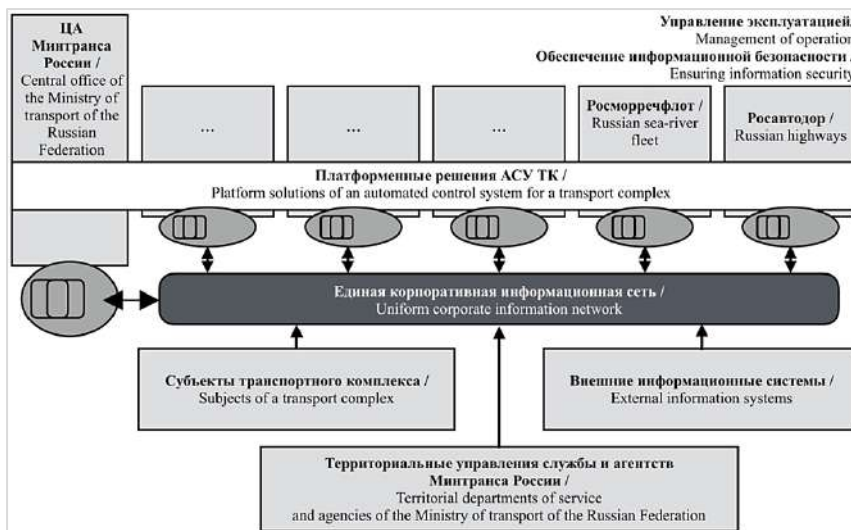


Рисунок 1 – Сегменты АСУ ТК

Региональный уровень включает в себя региональные точки обработки данных и региональные точки управления, которые обеспечивают получение информации с линейного уровня, а после обработки и обобщения передают ее на федеральный уровень.

Линейный уровень представлен логистическими центрами, контрольно-пропускными пунктами, транспортными узлами, объектами инфраструктуры транспортного комплекса, обеспечивающий предоставление нужной информации на региональную ступень.

Структура сегментов АСУ ТК (рисунок 2) включает следующие виды подсистем:

- прикладные подсистемы предназначены для автоматизирования ключевых процессов управления отраслью;
- платформенные решения, которые обеспечивают прикладные подсистемы сервисами обмена информации, доступа к нормативно-справочной информации, электронному документообороту и географическим данным;
- аналитические подсистемы представляют информацию, которая содержится в распределенной базе данных АСУ ТК в различных разрезах для принятия грамотных управленческих решений и получения необходимой отчетности.

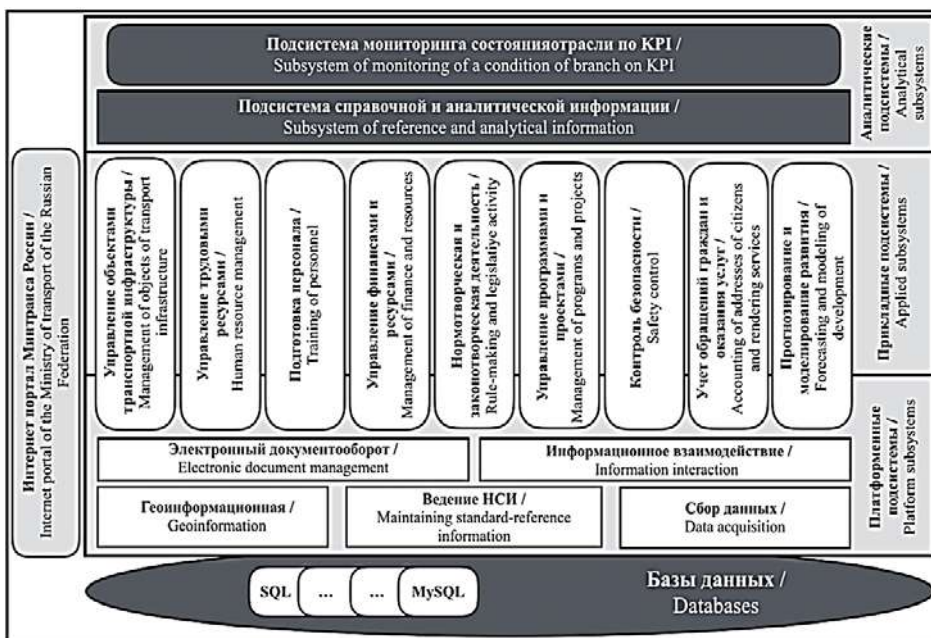


Рисунок 2 – Подсистемы АСУ ТК

Главная задача АСУ ТК – объединение существующих, развивающихся и новых автоматизированных систем Министерства транспорта, его служб и агентств за счет их информационной интеграции. Отраслевые системы управления, существующие на сегодняшний день, сохраняют свою базовую функциональность, а их внедрение в АСУ ТК реализуется за счет дооснащения интеграционными компонентами [6]. АСУ ТК взаимодействует с государственными автоматизированными системами, поддерживает информационный обмен Министерства транспорта с федеральными, региональными и муниципальными органами власти и со всеми участниками и пользователями рынка транспортных услуг. Предварительная стоимость АСУ ТК – 8,5 млрд. рублей. Более точная оценка возможна после технического проектирования АСУ ТК.

К целям АСУ ТК относятся:

- рост доступности транспортных услуг для населения;
- уменьшение аварийности на транспортных объектах;
- рост товарооборота на территории страны;
- уменьшение транспортных издержек в экономике;
- увеличение конкурентоспособности транспортного комплекса;
- реализация транзитного потенциала страны;
- уменьшение затрат на взаимодействие органов управления транспортным комплексом с организациями, которых осуществляют деятельность, связанную с транспортом.

Исходя из вышесказанного можно выделить основные количествен-

ные и качественные показатели эффективности интеграции АСУ ТК:

1) Количественные показатели:

– снижение временных затрат на доступ и последующую обработку информации, %;

– снижение издержек государственных расходов на выполнение государственных функций, руб;

– увеличение доходов в бюджет за счет роста выдаваемых лицензий, взятых платежей и штрафов, руб.

2) Качественные показатели:

– увеличение понятности и доступности государственных услуг населению;

– смена директивного управления отраслью на управление по результатам;

– контроль показателей в реальном времени;

– рост деловой культуры служащих в масштабе транспортной отрасли [8].

Автоматизированная система обработки информации и управления (АСОИУ) представляет собой достижение специалистом организационно-производственных целей при помощи информационного обеспечения, основой которого является программное обеспечение (ПО), разработанное на этапе проектирования и внедрения автоматизированной системы управления (АСУ) [4,16]. Общие теоретические вопросы разработки и внедрения элементов АСУ получили широкое рассмотрение в отечественной (Оленев В.А., Фролов В.П., Лисенков С.М.) и зарубежной литературе (Pawley A.J.R.) [15,17]. Авторы Кузнецов И.А., Николаев А.Б., Алексахин С.В., Строганов В.Ю., Юрчик П.Ф. в работе «Автоматизированные системы управления на автомобильном транспорте» уделили особое внимание функционированию АСУ на автомобильном транспорте, созданию и применению конкретных систем [3].

Ниже приведен пример некоторых существующих на сегодняшний день АСУ, применяемых в транспортной отрасли:

- АСУ «ГОРОД-ДД» обеспечивает эффективное управление движением потоков транспорта и пешеходов в населённых пунктах с помощью светофоров, позволяет проводить видеоконтроль и регистрацию нарушений на дорогах, также позволяет контролировать движение маршрутного транспорта и др. [2].

- АСУ ГПТ – система реализована на базе платформы системы комплексной автоматизации транспорта (СКАТ), которая позволяет координировать и централизованно контролировать пассажирские перевозки на государственном уровне. Навигационно-коммуникационная база СКАТ основана на технологии ГЛОНАСС/GPS. Применение СКАТ не требует от перевозчика менять уставленные системы. Применение данной СКАТ успешно реализовано в Санкт-Петербурге и Москве [9].

- АСУ-Навигация – автоматизированная радионавигационная систе-

ма диспетчерского управления пассажирским транспортом, – позволяет осуществлять диспетчерское управление транспортом, соблюдать непредвзятый инструментальный контроль и учитывать выполненные транспортные работы [5].

- АСДУ ГПТ «Диспетчер-0440» позволяет обеспечивать автоматизированный контроль и управление городским пассажирским транспортом в режиме онлайн. Система может применяться в средних и крупных пассажирских автотранспортных предприятиях, которые осуществляют перевозки по фиксированным городским маршрутам по расписанию [1].

- АСУ-Транспорт – система предназначена для консолидированного управления работой транспорта [10]. В состав данного комплекса АСУ входит:

- АСУ-Транспорт (МТУ) – система взаимоотношениями между заказчиком и исполнителем транспортных услуг (магазин транспортных услуг);

- АСУ-Транспорт (ЗАК) – система используемая предприятием компании (заказчик транспортных услуг);

- АСУ-Транспорт (ТУ) – система объединенной отчетности по использованию транспорта в компании (транспортное управление);

- АСУ-Транспорт (АТП) – система управления автотранспортным предприятием (исполнитель транспортных услуг).

- АСУ АТП – WDS: система управления автоперевозками – автоматизация процесса управления автопарками при помощи ГЛОНАСС/GPS технологий. Данная система основана на базе технологической платформы 1С: Предприятие 8.3 и системы спутникового мониторинга «Навигатор-С». АСУ АТП – WDS позволяет решать совокупность задач по управлению автопарком и автоперевозками, включая учет транспортных средств и автоматическое формирование транспортной документации, а также развернутую аналитику в разрезе различных элементов и объектов системы [11].

Среди достоинств АСУ, применяемых в транспортной отрасли, можно выделить следующие:

- получение объективных данных в режиме онлайн;
- техногенная, экономическая и террористическая безопасность предприятия;

- управление логистикой и движением транспортных средств на дорогах, относящимся к различным категориям;

- ликвидация заторов, увеличение пропускной способности на территории объекта;

- исключение ошибок за счет человеческого фактора.

К недостаткам внедрения АСУ на предприятиях, в том числе транспортной отрасли, можно отнести:

- высокий уровень затрат на внедрение таких систем;

- трудности при переобучении кадрового состава в связи с внедрением АСУ в их повседневные рабочие будни. Создание АСУ ТК позволяет увеличить эффективность и результативность государственного управления транс-

портным комплексом и мониторинга на базе слаженного функционирования и развития информационно-технологических ресурсов отрасли и создания единого информационного пространства транспортного комплекса.

При сбоях в работе транспортной системы и управлении транспортными средствами основная ответственность ложится на диспетчера, который должен четко знать, как характеризуются сбои и каков алгоритм действий для их устранения. Таким образом, под принятием решения по устранению сбоев в работе транспортной системы понимаются действия диспетчера, направленные на выбор оптимального пути решения сложившихся проблем.

Внедрение и повседневное использование АСУ позволит повысить производительность труда диспетчера, что в следствии позволит сократить временные затраты на устранение проблем в работе пассажирского городского транспорта, и в итоге приведет к повышению качества обслуживания пассажиров.

#### *Литература*

1. Автоматизированная система управления городским пассажирским транспортом (АСДУ ГПТ) «Диспетчер-0440» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.kbret.ru/index.php?catid=5&Itemid=55&option=com\\_sobi2&sobi2Id=2&sobi2Task=sobi2Details](http://www.kbret.ru/index.php?catid=5&Itemid=55&option=com_sobi2&sobi2Id=2&sobi2Task=sobi2Details) (дата обращения 21.12.2017).
2. Автоматизированная система управления дорожным движением «Город-ДД» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cbst.by/rus/activity/traffic/asu/assud> (дата обращения 15.12.2017).
3. Автоматизированные системы управления на автомобильном транспорте : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / [А.Б. Николаев, С.В. Алексахин, И.А. Кузнецов и др.]; под ред. А.Б. Николаева. 2-е изд., стер. // М.: Издательский центр «Академия». 2012. 288 с.
4. Анохин А.Н. Основы проектирования АСОИУ. Учебное пособие по курсу «Проектирование АСОИУ» для студентов специальности 220200 – Обнинск. ИАТЭ, 2006. 84 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.academia.edu/5677211/Анохин\\_А.Н.\\_Основы\\_проектирования\\_АСОИУ](http://www.academia.edu/5677211/Анохин_А.Н._Основы_проектирования_АСОИУ).
5. АСУ-Навигация [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://sibtransnavi.com/?page\\_id=349](http://sibtransnavi.com/?page_id=349) (дата обращения 20.12.2017).
6. Будумян В. Надзорный глаз следит за ГЛОНАСС / В. Будумян // Транспорт России. 2013. № 44 (7759). С. 4.
7. Виноградова С.Н., Петухова Н.Г. Транспортное обслуживание // М.: Высшая школа. 2016. 224 с.
8. Глухов А.К. Психологические аспекты безопасности дорожного движения в России: монография / А.К. Глухов // М.: Логос. 2013. 64 с.
9. Городской транспорт под контролем СКАТ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://controleng.ru/otraslevye-resheniya/gorodskoj-transport-pod-kontrolem-skat/> (дата обращения 20.12.2017).



10. Комплекс автоматизированных систем управления транспортом «АСУ-Транспорт» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.asu-project.ru/TRANS-main.html> (дата обращения 21.12.2017).
11. Комплексная автоматизированная система управления автопарками [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://moscow.ends-russia.ru/solutions/kompleksnaya-avtomatizirovannaya-sistema-upravleniya-avtoparkami> (дата обращения 21.12.2017).
12. Кравченко П.А. Об инновационных технологиях в сфере обеспечения безопасности дорожного движения // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 55(330). С. 68-71.
13. Кузнецов В.П. Анализ систем и функций управления корпорации // Мининский вестник. № 1 (2014) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vestnik.mininuniver.ru/jour/article/view/449/425> (дата обращения 21.10.2017).
14. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. // Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2004. 352 с.
15. Лисенков С.М. Принципиальная технология автоматизированного контроля регулярности и управления движением автобусов на городских маршрутах // Автомоб. трансп.: Науч.-техн. реф. сб. // М-во автомоб. трансп. РСФСР. ЦБНТИ. 1982. Вып. 7. С.1-26.
16. Маргарян С.А. Автоматизированные системы диспетчерского управления на транспорте и в дорожном хозяйстве // Автоматизация в промышленности. 2010. С. 57-61.
17. Оленев В.А., Фролов В.П. Автоматизированная система диспетчерского управления движением городского транспорта // Пути соверш. техн. эксплуат. и ремонта машин АТК: Тез. докл. // Владимир. 1995. С. 64-65.
18. Пивоваров А.Д. Повышение работоспособности систем диспетчерского управления автотранспортных пред.приятий // Молодой ученый. 2013. № 110. С. 374-376.
19. Страшун Ю.П. Основы сетевых технологий для автоматизации и управления: Учебное пособие для вузов по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» // М.: Изд-во МГТУ. 2003. 111 с.
20. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года (Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rosavtodor.ru/storage/b/2014/03/23/strategia.pdf> (дата обращения 05.09.2017).

УДК 621.793.06

**Исследование влияния напыляемого материала на режимы работы и тепловые характеристики плазматрона**

**В.Г. Исаев**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
управления качеством и стандартизации,

**А.Г. Костылев**, к.т.н., доцент кафедры управления качеством и  
стандартизации,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*Авторами представлены результаты исследования влияния присадок на характеристики плазматрона при их вводе в плазменную струю генератора низкотемпературной плазмы. Для исследования влияния напыляемого материала на режимы и тепловые характеристики плазматрона авторами вводился порошок меди дисперсностью 15-20 мкм. По результатам исследований были выбраны характеристики, обеспечивающие оптимальный режим работы генератора плазмы. Отмечено, что плазматроны с представленными характеристиками целесообразно использованы для получения парогазовых потоков применительно к технологии нанесения защитных покрытий.*

Покрытие, плазма, технологии.

**Investigation of the effect of the sprayed material on the operating modes and thermal characteristics of the plasma torch**

**V.G. Isaev**, PhD, associate professor, head of the department of  
quality management and standardization,

**A.G. Kostylev**, PhD, associate professor of quality management  
and standardization,

State Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*Authors have presented results of a research of influence of additives on characteristics of the plasmatron at their input to a plasma stream of the generator of low-temperature plasma. For a research of influence of napylyaemy material on the modes and thermal characteristics of the plasmatron by authors copper powder was entered by dispersion of 15 - 20 microns. By results of researches the characteristics providing an optimum operating mode of the generator of plasma have been chosen. It is noted that plasmatrons with the submitted characteristics are expediently used for receiving steam-gas streams in relation to technology of drawing sheetings.*

Covering, plasma, technologies.

Развитие новых технологических процессов невозможно без разработки и исследования новых технологических инструментов. Одним из новых направлений является использование паров и плазмы материалов, используемых в качестве защитных покрытий. Особый интерес представляет использование плазмы металлов, позволяющих получать покрытия с новыми свойствами при рекомбинации ионов напыляемого материала на подложке.

Поэтому пристальный интерес для получения паровых составов заданной концентрации и плазмы металлов вызывают мощные генераторы плазмы, выполненные по схеме дуговых каналковых плазмотронов. Обладая достаточно высоким КПД, они могут обеспечить получение активной среды оптимального состава для получения требуемых характеристик покрытий.

Следует отметить, что для получения паров металлов заданного состава и концентрации целесообразно подавать рабочее тело в виде порошка с целью его расплавления и испарения в плазменной струе. Поэтому используемый для этих целей генератор низкотемпературной плазмы (ГП) должен отвечать многим требованиям [2], к главным, из которых следует отнести обеспечение интенсивного нагрева и испарения мелкодисперсных частиц материала присадки, а также обеспечение работы ГП в течение длительного промежутка времени.

Таким условиям отвечают электродуговые плазмотроны постоянного и переменного тока, высокочастотные и сверхвысокочастотные. Более широкое применение получили электродуговые плазмотроны постоянного тока каналкового типа. Наиболее обще эту группу можно разделить на две: дуговые плазмотроны с независимой и зависимой дугой [1, 4]. Как правило, чаще используются плазмотроны с косвенной дугой. В этом случае дуга замыкается на стенку канала (сопла) и выдувается наружу в виде плазменного факела потоком газа. Важным значением для стабильной работы плазмотрона является выбор способа пространственной стабилизации плазменной дуги: аксиальная, вихревая, магнитная, стабилизация стенкой [3]. Конструктивная простота, достаточно высокий тепловой КПД нагрева газа и большой срок службы – являются основными факторами широкого применения на практике плазмотронов с вихревой стабилизацией. Способ ввода плазмообразующего газа в электрический разряд оказывает существенное влияние на эффективность преобразования энергии, стабилизацию разряда и т.д. Условно можно отметить четыре различных вида ввода: аксиальный, тангенциальный, распределенный и через пористую вставку.

Тангенциальная подача обеспечивает более стабильное горение дуги, тогда как при осевой подаче происходит более равномерное распределение порошка в объеме плазменной струи.

Наиболее широко на практике используются два типа плазмотронов с самоустанавливающейся дугой и с секционированным каналом. Основным недостатком плазмотронов с самоустанавливающейся дугой является наличие

падающей вольтамперной характеристики, что влияет на стабильность параметров плазменной струи. Кроме этого, следует отметить снижение коэффициента использования порошка из-за большого градиента температур в радиальном направлении плазменной струи и пульсации параметров потока, а также ограничение электрической мощности, связанное с малой длиной дуги. Поэтому все большее распространение получают плазмотроны, в которых протяженная дуга создается за счет секционирования канала. Это так называемые плазмотроны с межэлектродной вставкой (МЭВ). Наилучшим решением в данном случае было бы использование одной диэлектрической протяженной вставки, но в настоящее время не существует достаточно термостойких материалов, которые имели бы необходимый ресурс работы. Поэтому секционированные каналы изготавливают из охлаждаемых металлических вставок, как правило, медных, определенной длины, разделенных электроизолирующими прокладками. Благодаря фиксированной протяженной дуге работа плазмотрона происходит по восходящей ветви вольтамперной характеристики. Это приводит к положительному энергобалансу, несмотря на увеличение теплотерь в протяженном секционированном канале. Термический КПД таких плазмотронов согласно работе может достигать 65-80% без существенного увеличения силы тока.

Для эффективного испарения материала присадки плазмотроны должны отвечать следующим дополнительным требованиям:

- а) иметь достаточно протяженную зону взаимодействия мелкодисперсных материалов с высокотемпературным газовым потоком,
- б) иметь высокую стабильность параметров плазмы,
- в) обеспечивать возможность работы с требуемыми плазмообразующими газами,
- г) обладать минимальными тепловыми потерями в зоне передачи энергии от плазмы к порошку.

Применительно к плазмотронам, служащим для создания высокотемпературного потока газа, в котором вводимые частицы претерпевают фазовые превращения и приобретают скорость перемещения, необходимо добиться равномерной подачи порошка в струю плазмы, его интенсивного разогрева испарения и поддержание такого состояния полученной смеси в течение требуемого интервала времени.

Одним из факторов, влияющих на разогрев и ускорение частицы, а, следовательно, на концентрацию паров материала присадки, является место ввода порошка в плазменную струю, т.е. это определяется температурой той зоны струи, куда попадает порошок.

Исходя из требований по получению парогазовых потоков с достаточно высокой концентрацией паров металлов для проведения экспериментов, авторами была выбрана схема плазмотрона с МЭВ, обладающая высоким коэффициентом преобразования подведенной электрической энергии в энтальпию потока. Стабильность параметров дуговой плазменной струи достигается за счет работы ГП по восходящей ветви вольтамперной характеристики. Дан-

ная схема позволяет осуществить ввод мелкодисперсного материала в канал плазмотрона в любом его сечении. Стабилизация разряда твердой стенкой с аксиальным вводом плазмообразующего газа с закруткой обеспечивает более равномерное распределение частиц по сечению плазменной струи. В турбулентном потоке, несмотря на некоторое улучшение эффективности нагрева порошка по сравнению с ламинарным, существует опасность зарастания канала, связанная с осаждением расплавленных частиц на стенки. Поэтому наиболее целесообразен ламинарный режим течения. Выбор конструкции определяется также с учетом увеличения температуры газа на оси канала, что достигается применением катодов больших диаметров при прочих равных условиях. Исходя из вышесказанного, за прототип ГП авторами была принята конструктивная схема плазмотрона, предложенная в работе [5].

Получение данных по распределению теплового потока газа по длине канала является важным условием при изучении условий теплового взаимодействия частиц с плазмой с целью определения оптимальных режимов работы ГП. Тепловой баланс определялся авторами из экспериментальных измерений распределения потенциала плазмы по длине канала и тепловых потерь в стенки плазмотрона. Измерение потенциала определялось относительно катода. Секции МЭВ в данном случае служили одновременно и шайбамизондами, потенциал которых принимался равным потенциалу точки дуги, примерно соответствующей среднему сечению секции. Прямолинейный участок на всех режимах работы ГП указывает на стационарный характер течения (рисунок 1).

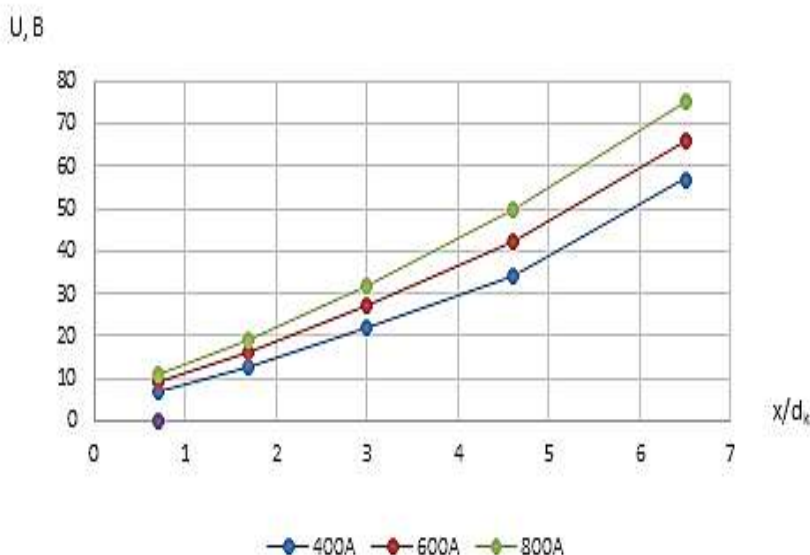


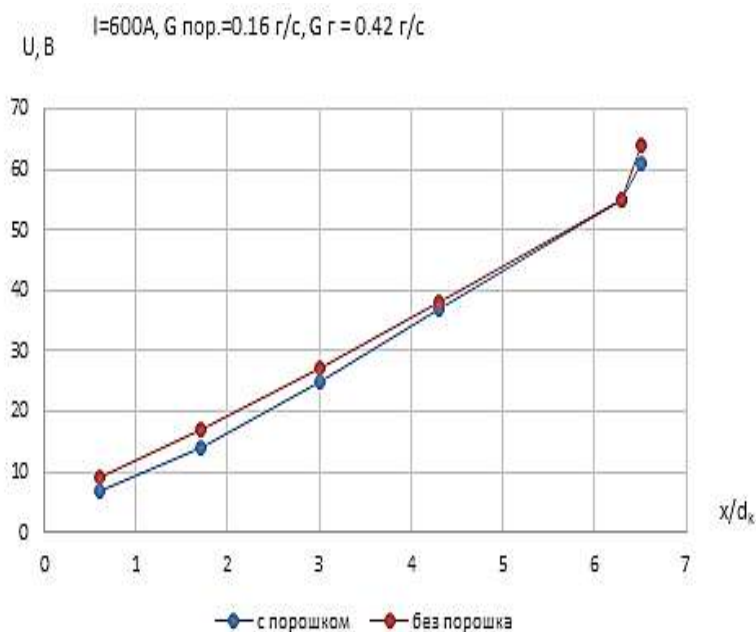
Рисунок 1 – Распределение потенциала плазмы по длине канала

Напряженность поля при этом остается практически неизменной. Ис-

следования режимов работы проводились в широком диапазоне подводимой мощности (23-67 кВт) при расходах газа от 0,17 г/с до 1 г/с.

Для исследования влияния напыляемого материала на режимы и тепловые характеристики плазматрона авторами вводился порошок меди дисперсностью 15- 20 мкм.

Как показали проведенные исследования наличие порошка (Cu) несущественно сказывается на угле наклона кривой при различных значениях подводимой мощности, что вероятно связано с малыми изменениями проводимости плазмы (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Распределение потенциала плазмы по длине канала при наличии и отсутствии порошка (Cu)**

Очевидно, испарение в канале невелико, т.к. давление газа выше, чем давление насыщенных паров данного материала при данной температуре частиц материала присадки.

Тепловые потери в секции плазматрона и в катоде определялись калориметрическим путем

$$\Delta Q_{2i} = G_i C_p \Delta T_i$$

где  $G_i$  – расход охлаждающей воды;  $C_p$  - теплоемкость воды;  $\Delta T_i$  – перепад температур на выходе и входе шайбы.

Температура воды определялась термопарами хромель-капель, диаметром 0,5 мм с помощью автоматизированной системы на базе ЭВМ. Сигнал от термопары поступал на коммутатор, выполненный в одном блоке с аналого-цифровым преобразователем, а оттуда на ЭВМ, где обрабатывался. Оп-

рос каналов осуществлялся последовательно. На каждом режиме цикл измерений проводился по 5 раз. Предварительная тарировка термпар выполнялась с использованием термометра типа TGL-II. Погрешность измерения теплового потока, идущего в стенку канала, составляла до 5,2%. Влияние расхода газа на теплотерии в стенку канала представлена на рисунке 3.

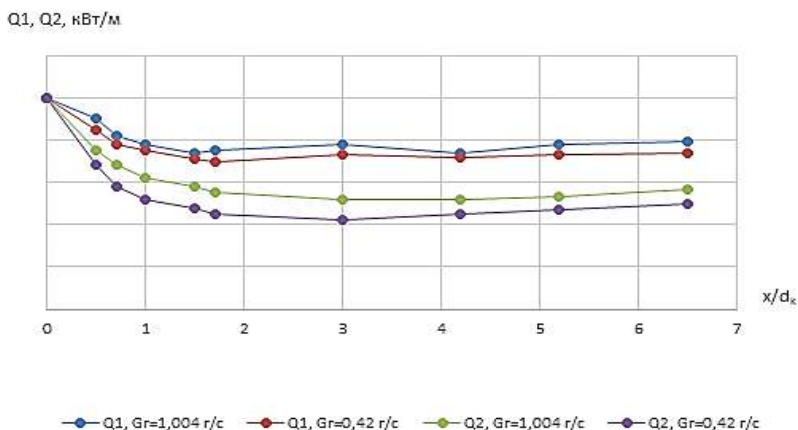


Рисунок 3 – Влияние расхода газа на теплотерии в стенку канала

Измерения проводились для двух длин канала 74 и 105 мм. Тепловая мощность, выделяющаяся в канале на каждой секции:

$$\Delta Q_{li} = J \cdot \Delta \varphi$$

где:  $\Delta Q_{li}$  – тепло выделяющееся в столбе разряда;  $J$  – ток;  $\Delta \varphi$  – потенциал точки дуги относительно катода; а также прикатодных и прианодных областях разряда:

$$\Delta Q_k = \Delta \varphi_k \cdot J - Q_k; \Delta Q_a = \Delta \varphi_a \cdot J - Q_a$$

где:  $\Delta \varphi_k, \Delta \varphi_a$  – величины катодного и анодного падения потенциала, соответственно;  $Q_k, Q_a$  – тепло, отводимое от катода и анода, соответственно.

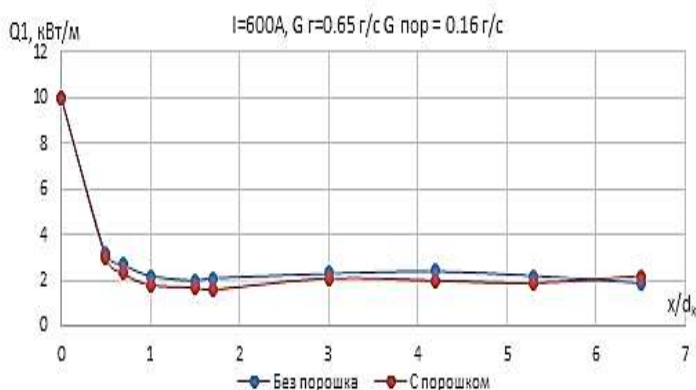


Рисунок 4 – Влияние порошка на распределение подведенной мощности ( $Q_1$ )

На участке от катода до рассматриваемого участка тепловая мощность, идущая на нагрев газа в канале, определялась выражением:

$$Q_r = J \cdot U - (Q_k + \sum_{i=1}^n \Delta Q_{2i} + Q_a)$$

где:  $n$  – число секций в канале.

Приращение полной энтальпии по длине канала определялась как

$$\Delta i = Q_r / G$$

Влияние порошка на распределение подведенной мощности ( $Q_1$ ) и отведенного тепла в стенки канала ( $Q_2$ ) для одного из режимов представлено на рисунке 4.

Увеличение расхода позволяет повысить эффективность нагрева газа на всем протяжении канала (см. рисунки 5 и 6).

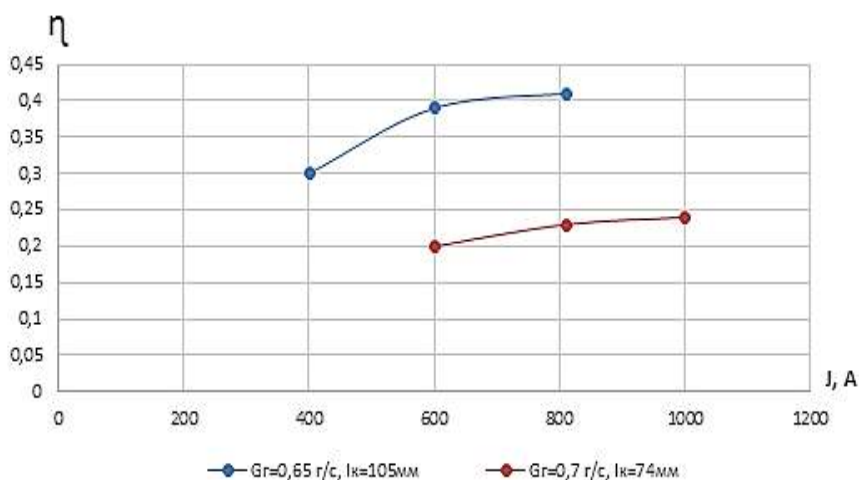


Рисунок 5 – Зависимость КПД генератора от длины канала

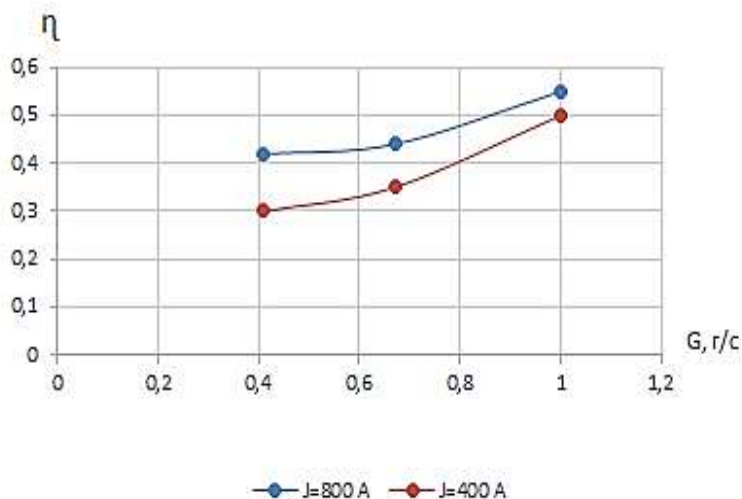


Рисунок 6 – Зависимость КПД генератора от расхода газа



**Заключение.** Проведенные авторами исследования и представленные полученные данные свидетельствуют о том, что данный генератор плазмы обладает хорошими энергетическими характеристиками. Применение плазмотрона с МЭВ позволяет увеличить КПД преобразования при увеличении длины канала. Благоприятно сказывается на КПД и увеличение расхода газа. Влияние порошка на характеристики плазмотрона в исследуемом диапазоне мощностей и давлений является незначительным.

По результатам исследований для оптимального режима работы генератора плазмы был выбран диапазон, характеризующийся следующими параметрами:

ток разряда	600-800 А;
расход газа	0,7-1 г/с;
длина канала	105 мм.

Дальнейшее увеличение длины канала не приводит к росту КПД.

Данные типы плазматронов могут быть успешно использованы для получения парогазовых потоков применительно к технологии нанесения защитных покрытий.

#### *Литература*

1. Генераторы плазменных струй и сильноточные дуги. Под ред. Ф.Г Рутберга. 1973 // Л. Наука. С. 152.
2. Жуков М.Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы // Низкотемпературная плазма. 1999. Т. 17. С. 712.
3. Жуков М.Ф. Экспериментальные исследования плазматронов. Под ред. М.Ф. Жукова. 1977 // Наука. Сибирское отделение. С. 390.
4. Костылев А.М. Электродуговые установки (плазматроны) // М. МВТУ. 1969. С. 109.
5. Исаев В.Г., Костылев А.Г. Напыление в динамическом вакууме – дальнейший путь улучшения качества покрытий // Информационно-технологический вестник. 2016. № 3(09) С. 114-118.

УДК 678.5-1

**Высокотеплопроводный углепластик на основе углеродного волокна из пека и дисперсно-наполненной матрицы ЭНФБ**

**Е.А. Николаева**, аспирант кафедры «Управление качеством и стандартизация»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

**А.Н. Тимофеев**, д.т.н., первый заместитель генерального директора,

**К.В. Михайловский**, к.т.н., начальник отдела,

Открытое акционерное общество «Композит» (ОАО «Композит»),

г. Королев, Московская область

*В настоящей статье приведены результаты разработки высокотеплопроводного углепластика на основе углеродного волокна из пека и матрицы ЭНФБ, модифицированной углеродным порошком высокой теплопроводности. Представлены данные по технологической схеме получения и результаты определения физико-механических и теплофизических характеристик углепластика.*

Высокотеплопроводный углепластик, углеродные волокна на основе пека, углеродный порошок высокой теплопроводности, физико-механические и теплофизические характеристики углепластика.

**High thermal conductivity carbon fiber reinforced polymer based on a carbon fiber from pitch and dispersed-filled ENPB matrix**

**E.A. Nikolaeva**, graduate student of the Department of Quality control and Standardization,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

**A.N. Timofeev**, doctor of technical sciences, first deputy of general director,

**K.V. Mikhaylovskiy**, PhD, head of department,

Joint Stock Company «Kompozit» (JSC «Kompozit»), Korolyov, Moscow region

*This article describes the results of the development of a high thermal conductivity carbon fiber reinforced polymer based on carbon fiber from pitch and an ENPB matrix modified with a carbon powder of high thermal conductivity. Data of the technological scheme of production and the results of determining the physico-mechanical and thermophysical characteristics of carbon fiber reinforced polymer are presented.*

High thermal conductivity carbon fiber reinforced polymer, carbon fibers from

pitch, carbon powder of high thermal conductivity, physico-mechanical and thermophysical characteristics of carbon fiber reinforced polymer.

В настоящее время в ракетно-космической технике (РКТ) востребованы конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ), способные работать без изменения геометрических размеров в интервале температур от минус 150 °С до плюс 150 °С. Производство таких ПКМ необходимо в связи с созданием нового поколения спутников связи, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и орбитальных комплексов.

Для обеспечения большей многозадачности современные космические средства телекоммуникации, навигации и геодезии оснащаются все более сложным и энергоемким оборудованием. В перспективных КА и модулях находится множество бортовой аппаратуры, обладающей повышенным энергопотреблением (более 8 кВт) и, соответственно, большим тепловыделением за счёт работы электрооборудования. Для работы бортовой аппаратуры в эксплуатационном диапазоне температур необходимо снижение температурных деформаций, и, как следствие, применение теплообменных аппаратов из материалов с высокой теплопроводностью. Существующие на сегодняшний день теплообменные аппараты из алюминия не в полной мере соответствуют требованиям массовой эффективности конструкции, а углепластики типа КМУ-4Л и КМУ-4Э обладают низкой поперечной теплопроводностью (около 0,85 Вт/(м·К)), что не позволяет обеспечить эффективный теплоотвод при все более энергоёмком бортовом оборудовании. В связи с этим, проводится разработка технологии изготовления высокотеплопроводного углепластика, а также деталей и конструкций на его основе в интересах ряда предприятий РКТ.

Для изготовления высокотеплопроводного углепластика авторами в ОАО «Композит» ранее была проведена работа по выбору углеродного волокна. Установлено, что наибольшей теплопроводностью обладают углеродные волокна на основе пека [1-4]. Но поскольку в настоящее время в РФ только ведётся разработка таких волокон, то для отработки технологических режимов изготовления высокотеплопроводного углепластика применялось зарубежное пековое волокно Granos XN-90-60S, обладающее комплексом физико-механических характеристик, характерных для углеродного волокна на основе пека: высоким модулем упругости и коэффициентом теплопроводности, низким относительным удлинением.

На намоточном станке СН-8.0-1100 была отработана технология изготовления препрега с минимальной деформацией волокна [5], изготовлены и испытаны образцы препрега. На основе полученного препрега изготовлены образцы однонаправленного углепластика, углепластика со схемой армирования 0°/45°/-45° и углепластика со схемой армирования 0°/90°, проведены их физико-механические и теплофизические испытания как наиболее применяемые в конструкциях из ПКМ в РКТ. Максимальными характеристиками по значению прочности 1336 МПа, модуля упругости при растяжении 520 ГПа, а также продольного коэффициента теплопроводности 236,9 Вт/(м·К) обладал однонаправленный углепла-

стик. Однако поперечная теплопроводность углепластика находилась на уровне 1 Вт/(м·К), что недостаточно для эффективного теплоотвода в зоне эксплуатации приборных блоков.

В связи с этим необходимо принимать дополнительные меры по обеспечению однородного теплового режима и снижению температурных градиентов конструкций. Данная задача может быть решена увеличением поперечной теплопроводности углепластика за счет внедрения высокотеплопроводных дисперсных частиц в объем матрицы. Проведена работа по анализу дисперсного наполнителя и выбран углеродный порошок с размерами частиц 60-70 нм, полученный размолотом пекового волокна марки Granoc HC-600-15M. Отработана технология изготовления дисперсно-наполненной матрицы ЭНФБ, изготовлены образцы и проведены их теплофизические испытания. Определены значения коэффициентов теплопроводности матрицы при различном содержании углеродного порошка. Максимальное значение 4,74 Вт/(м·К) было достигнуто при степени наполнения порошком 25,5% по массе.

Разработана технологическая схема изготовления высокотеплопроводного углепластика, включающая следующие этапы:

- проведение входного контроля компонентов, входящих в состав углепластика;
- изготовление дисперсно-наполненной матрицы ЭНФБ;
- изготовление препрега на основе углеродных волокон из пека и дисперсно-наполненной матрицы ЭНФБ;
- проведение контроля качества препрега;
- разметку и раскрой препрега;
- подготовку оснастки для формования;
- формирование вакуумного мешка;
- вакуумно-автоклавное формование.

На основе высокотеплопроводного углеродного волокна Granoc XN-90-60S и дисперсно-наполненной матрицы ЭНФБ с содержанием углеродного порошка 16% изготовлены образцы однонаправленного углепластика размерами 250x12x2 мм для проведения испытаний на определение прочности и модуля упругости при растяжении (рис. 1), диаметром 12 мм и длиной 20 мм для проведения испытаний на определение продольного коэффициента теплопроводности (рис. 2) и диаметром 12 мм и толщиной 4 мм для проведения испытаний на определение поперечного коэффициента теплопроводности (рис. 3) в количестве 5 штук каждого вида. Процентное содержание порошка определено на основе серии испытаний модифицированной матрицы.

В соответствии с ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах» проведены испытания образцов углепластиков по определению прочности и модуля упругости при растяжении. Результаты испытаний представлены в таблице 1.



**Рисунок 1 – Образцы высокотеплопроводного углепластика на основе углеродного волокна из пека и дисперсно-модифицированной матрицы ЭНФБ для проведения испытаний на растяжение**



**Рисунок 2 – Образцы высокотеплопроводного углепластика на основе углеродного волокна из пека и дисперсно-модифицированной матрицы ЭНФБ для определения продольного коэффициента теплопроводности**



**Рисунок 3 – Образцы высокотеплопроводного углепластика на основе углеродного волокна из пека и дисперсно-модифицированной матрицы ЭНФБ для определения поперечного коэффициента теплопроводности**

**Таблица 1 – Результаты физико-механических испытаний образцов**

№ образца	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа
1	1136	471
2	1206	433
3	1238	465
4	1080	443
5	1290	488
Среднее значение	1190,0 ± 103,1	460,0 ± 27,4

В соответствии с МВИ № 7443-1-85 «Методика выполнения измерений теплопроводности углеродных материалов» проведены испытания образцов углепластика по определению продольного и поперечного коэффициентов теплопроводности (табл. 2).

**Таблица 2 – Результаты теплофизических испытаний образцов**

№ образца	Продольный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Поперечный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
1	184,2	2,6
2	183,4	2,4
3	178,6	2,4
4	185,9	2,4
5	181,9	2,3
Среднее значение	182,8 ± 3,4	2,42 ± 0,14

Для анализа полученных данных необходимо сравнить физико-механические и теплофизические характеристики образцов углепластиков на основе дисперсно-модифицированной и немодифицированной матрицы ЭНФБ (табл. 3).

Из таблицы 3 видно, что при добавлении в матрицу ЭНФБ 16% углеродного порошка прочность, модуль упругости и коэффициент теплопроводности вдоль укладки волокна однонаправленного углепластика снижаются от 10% до 30%, но коэффициент теплопроводности поперек укладки волокна увеличивается более, чем в 2 раза.

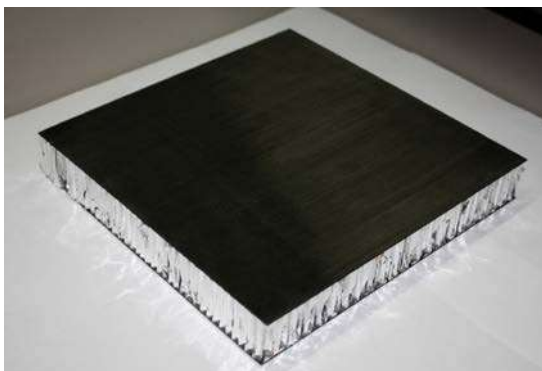
На основе разработанного высокотеплопроводного углепластика и алюминиевого сотового заполнителя в АО «ИСС» изготовлены образцы сотопанели (рис. 4) для оценки применения данного материала при изготовлении размеростабильных платформ спутников связи и ДЗЗ.

В АО «ИСС» проведены испытания образцов сотопанели на основе высокотеплопроводного углепластика по определению коэффициента теплопроводности в поперечном направлении в соответствии с методикой испытаний № 262.ПМ370-1059-13 «Методика испытаний опытного образца сотопанели и образцов-свидетелей из высокотеплопроводного углепластика».

**Таблица 3 – Результаты физико-механических и теплофизических испытаний образцов углепластиков на основе дисперсно-модифицированной и немодифицированной матрицы ЭНФБ**

№ п/п	Показатель	Значение для углепластика на основе немодифицированной матрицы ЭНФБ	Значение для углепластика на основе дисперсно-модифицированной матрицы ЭНФБ
1	Прочность при растяжении, МПа	1336,0 ± 214,3	1190,0 ± 103,1
2	Модуль упругости при растяжении, ГПа	520,4 ± 25,9	460,0 ± 27,4
3	Коэффициент теплопроводности вдоль укладки волокна, Вт/(м·К)	236,9 ± 11,4	182,8 ± 3,4
4	Коэффициент теплопроводности поперек укладки волокна, Вт/(м·К)	1,00 ± 0,17	2,42 ± 0,14

В результате испытаний установлено, что коэффициент теплопроводности сотовой панели в поперечном направлении на основе разработанного углепластика в диапазоне температур от 50 °С до 100 °С составляет 1,36-1,40 Вт/(м·К), что превышает теплопроводность сотовых панелей на основе углепластиков, используемых в настоящее время в АО «ИСС», на 12-18%.



**Рисунок 4 – Образец сотопанели на основе высокотеплопроводного углепластика**

Для оценки сохраняемости внешнего вида образца сотопанели и коэффициента теплопроводности в поперечном направлении в условиях отапливаемого помещения проведены ускоренные климатические испытания (УКИ),

имитирующие хранение в условиях складского помещения в течение 9 лет при температуре от 5 °С до 35 °С, относительной влажности воздуха до 80%. Визуальный осмотр образца сотовой панели после УКИ показал, что, поверхность углепластика не содержит вздутий, трещин и расслоений, геометрия образца не нарушена. В результате испытаний установлено, что коэффициент теплопроводности в поперечном направлении образца сотовой панели в диапазоне температур от 50 °С до 100 °С не изменился и составил 1,37-1,41 Вт/(м·К).

Для оценки сохраняемости внешнего вида образца сотовой панели и коэффициента теплопроводности в поперечном направлении в условиях эксплуатации изделия на околоземной орбите с квалификационным запасом в 10 °С проведено термоциклирование образца с циклическим перепадом температур от минус 160 °С до плюс 160 °С при вакуумном давлении 0,001-0,01 Па. Визуальный осмотр образца сотовой панели после термоциклирования не выявил никаких дефектов на поверхности углепластика и геометрических изменений образца. В результате испытаний установлено, что коэффициент теплопроводности в поперечном направлении образца сотовой панели в диапазоне температур от 50 °С до 100 °С не изменился и составил 1,35-1,41 Вт/(м·К).

Таким образом, разработана технологическая схема изготовления высокотеплопроводного углепластика на основе углеродного волокна из пека и дисперсно-наполненного связующего ЭНФБ. Изготовлены образцы однонаправленного углепластика, проведены их физико-механические и теплофизические испытания. Установлено, что при использовании матрицы, модифицированной 16% углеродного порошка, полученного размолотом пекового волокна марки Granoc HC-600-15M, поперечная теплопроводность углепластика возрастает более, чем в 2 раза.

Разработанный высокотеплопроводный углепластик был использован в качестве обшивок для образцов сотовой панели, изготовленных в АО «ИСС». Установлено, что поперечная теплопроводность данных образцов превышает теплопроводность сотовых панелей на основе углепластиков, используемых в настоящее время в АО «ИСС», на 12-18%. Проведены УКИ, подтверждена стабильность поперечной теплопроводности сотовой панели после воздействия факторов хранения и после имитации факторов космического пространства на околоземной орбите.

Авторы выражают благодарность коллективу АО «ИСС» за оказанную помощь в опробовании высокотеплопроводного углепластика в составе образцов сотовой панели и их испытаниях.

#### *Литература*

1. In-plane thermal conductivity in thin carbon fiber composites / Silva C., Marotta E., Schuller M., Peel Larry, O'Neil Mark J // Thermophys. and Heat Transfer. 2007. 21. № 3. P. 460-467.
2. Structure – property relationships for high thermal conductivity carbon fibers / Gallego N.C., Edie D.D. // Compos. A. 2001. 32. № 8. P. 1031-1038.



3. Pitch-based carbon fiber with low modulus and high heat conduction / Arai Yutaka. // Nippon Steel Techn. Rept. 2001. № 84. P. 22-17.
4. Pitch based carbon fibers / Yamamoto Iwao, Fukagawa Toshihiro, Yoshiya Akihiko, Murio Mika // Патент 6303096 США. 16.10.2001.
5. Технологические особенности изготовления углепластика из высокомодульных высокотеплопроводных волокон / Е.А. Николаева, В.Н. Строителей / Сборник материалов V ежегодной научно-практической конференции «Инновационные аспекты социально-экономического развития региона» // М.: Издательство «Научный консультант». 2014. С. 361-371.

УДК 681.7

**Особенности проведения измерений терморadiационных характеристик материалов на интегральном фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И**

**М.Д. Озерский**, д.т.н., профессор кафедры управления качеством и стандартизации,

**А.М. Шамаев**, аспирант,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область,

**В.М. Просвириков**, начальник лаборатории Открытого акционерного общества Композит (ОАО «Композит»), г. Королев, Московская область

*В статье описаны особенности проведения измерений терморadiационных характеристик материалов: коэффициента поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  и коэффициента излучения  $\varepsilon$  на интегральных приборах: фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И. Приведено сравнение результатов определения  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$  полученных на фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И, с результатами, полученными на основе регистрации спектров отражения на высокоточных спектральных приборах. Указаны основные погрешности определения  $\alpha_s$  и  $\varepsilon$  на интегральном фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И, предложены способы их устранения.*

Терморadiационные характеристики материалов, космический аппарат, интегральный фотометр ФМ-59М, терморadiометр ТРМ-И, спектр отражения, терморегулирующие покрытие.

**Features of measurements of thermoradiation characteristics of  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$  materials on the integrated photometer FM-59M and thermoradiometer TRM-I**

**M.D. Ozersky**, Doctor of technical sciences, professor of the department of standardization and quality management,

**A.M. Shamaev**, graduate student,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region,

**V.M. Prosvirikov**, Head of Laboratory of the Open Joint Stock Company Composite (OJSC «Composite») Korolev, Moscow region

*The paper describes the features of the measurements of the thermoradiation characteristics of materials: the absorption coefficient of solar radiation- $\alpha_s$  and the emission coefficient –  $\varepsilon$  on compact integral devices: the FM-*

*59M photometer and the TPM-I thermoradiometer. The results of the determination of  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$  are compared on the FM-59M photometer and TPM-I thermoradiometer with the results obtained on the basis of recording the reflection spectra on high-precision spectral devices. The main errors in the determination of  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$  on the integral photometer FM-59M and thermoradiometer TRM-I are indicated, and methods for their elimination are proposed.*

Thermoradiation characteristics of materials, spacecraft, integrated photometer FM-59M, thermoradiometer TRM-I, reflection spectrum.

### **Введение**

Коэффициент поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  и коэффициент излучения  $\varepsilon$  являются функциональными терморadiационными характеристиками материалов и покрытий, применяемых на внешних поверхностях космического аппарата (КА) и его бортового оборудования.

Коэффициент поглощения солнечного излучения есть отношение поглощённого потока солнечного излучения к падающему,

$$\alpha_s = \Phi_e / \Phi_n, \quad (1)$$

и характеризует приток тепловой энергии за счет поглощения солнечного излучения материалом.

Коэффициент излучения есть отношение тепловой энергетической светимости тела к энергетической светимости черного тела при той же температуре,

$$\varepsilon(T) = \frac{M(T)}{M^0(T)}, \quad (2)$$

и характеризует отток тепловой энергии за счет собственного излучения материала, находящегося при заданной равновесной температуре.

Материалы и покрытия, применяемые на внешних поверхностях КА, представляют собой эмалевые покрытия, комбинации металлических и диэлектрических слоев, металлы с различными видами обработки поверхности (полирование, анодирование и др.), и др. По характеру отражения покрытия классифицируются на зеркально-отражающие, диффузно-отражающие и обладающие смешанным характером отражения [7].

В зависимости от конкретных задач на КА применяют покрытия с различными значениями  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$ . Покрытия с низким значением  $\alpha_s$  и высоким  $\varepsilon$  используются, как терморегулирующие (ТРП), поддерживающие температуру КА в определенном температурном диапазоне за счет отражения внешней поверхностью КА падающего солнечного излучения и его переизлучения в космическое пространство. Покрытия с высоким значением  $\alpha_s$  используются в блендах приборов звездной ориентации КА, предназначенных для снижения уровня фоновой засветки от объектов вне поля зрения приборов ориентации КА [3], [6].

Точное определение значений терморadiационных характеристик  $\alpha_s$ ,

$\varepsilon$  покрытий является одним из условий, определяющих надежность работы элементов и оборудования космического аппаратов (КА) и, как следствие, величину срока его активного существования. Согласно международному стандарту [6], для наиболее точного определения терморadiационных характеристик необходимо проведение измерений спектров отражения материалов в соответствующих диапазонах длин волн на спектральных приборах по которым проводится расчет интегральных значений  $\alpha_s$  и  $\varepsilon$ . Однако данные приборы дорогостоящие и имеют большие габариты, что создает неудобство при измерениях непосредственно на элементах КА. Поэтому, на спектральных приборах проводится определение  $\alpha_s, \varepsilon$  идентичных материалов, используемых в качестве эталонных образцов при измерениях на интегральных приборах, обладающих меньшими габаритами и стоимостью. К таким приборам относят интегральный фотометр ФМ-59М и терморadiометр ТРМ-И. Определение  $\alpha_s$  и  $\varepsilon$  материалов на интегральном фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И проводится относительным методом с использованием эталонных образцов сравнения. При выполнении измерений градуировка приборов проводится по сигналу, соответствующему темновому фону и сигналу, соответствующему отражению от эталонного образца сравнения. Для точного определения  $\alpha_s$  и  $\varepsilon$  на интегральном фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И эталонный образец сравнения должен обладать сходством с измеряемым образцом по виду спектральной кривой отражения, индикатрисе отражения, характеру отражения, шероховатости поверхности. Определение  $\alpha_s$  и  $\varepsilon$  проводят на материалах, обладающих разнообразием указанных свойств, в том числе на материалах, прошедших испытания по воздействию факторов космического пространства (ФКП), приводящих к изменению спектра, характера отражения и др. свойств материала [10]. От точности измерений оптических параметров ТРП при ускоренных испытаниях на стойкость к воздействию факторов космического пространства зависит точность прогнозирования деградации свойств ТРП в условиях эксплуатации. Расчетно-экспериментальные исследования, проведенные в ОАО «Композит», показали, что под действием факторов космического пространства происходят такие сложные взаимосвязанные процессы как потеря массы, изменения состава материала ТРП, деградация оптических характеристик и другие процессы, которые необходимо учитывать в прогностических моделях [4], [8], [11].

Из-за недостатков в конструкции оптических схем приборов, отличие в одном из указанных свойств измеряемого и эталонного образца, может привести к значительной погрешности определения  $\alpha_s, \varepsilon$ , а использование эталонного образца со схожими свойствами с измеряемым образцом не всегда реализуемо на практике [1], [2], [5]. Поэтому, для повышения точности определения  $\alpha_s, \varepsilon$  при отличии эталонного и измеряемого образца необходимо устранение недостатков оптических схем приборов.

**Целью статьи** являлся анализ причин возникновения погрешностей определения  $\alpha_s, \varepsilon$  на интегральном фотометре ФМ-59М и терморadiометре ТРМ-И и определение способов их устранения.

Проведено сравнение результатов определения  $\alpha_s$ ,  $\varepsilon$  образцов на интегральном фотометре ФМ-59М и терморадиометре ТРМ-И с расчетными значениями, полученными на основании измеренных спектров отражения на высокоточных спектральных приборах. Регистрацию спектров отражения материалов в диапазоне длин волн от 0,25 до 2,50 мкм проводили на двухлучевом спектрофотометре с приставкой на основе интегрирующей сферы. Коэффициент отражения внутренней поверхности интегрирующей сферы, покрытой диффузно-отражающим материалом спектралон, составляет не менее 0,95 в диапазоне длин волн от 0,25 до 2,50 мкм. Внутренний диаметр сферы составлял 150 мм, погрешность измерений спектрального коэффициента отражения не более 0,01. Коэффициент поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  определялся в соответствии с соотношением:

$$\alpha_s = \int_{0,2\text{ мкм}}^{2,5\text{ мкм}} (1 - R(\lambda)) \cdot S(\lambda) d\lambda \Big/ \int_{0,2\text{ мкм}}^{2,5\text{ мкм}} S(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где  $R(\lambda)$  – спектральный направленно полусферический коэффициент отражения материала.

$S(\lambda)$  – спектральное распределение энергетической освещенности Солнечного излучения.

Регистрацию спектров отражения в диапазоне от 3 до 25 мкм проводили на инфракрасном Фурье спектрометре с приставкой на основе интегрирующей сферы. Коэффициент отражения внутренней поверхности интегрирующей сферы, покрытой диффузно-отражающим золотым покрытием, составляет не менее 0,92 в диапазоне длин волн от 3 до 20 мкм. Внутренний диаметр сферы составлял 76,2 мм, погрешность измерений спектрального коэффициента отражения не более 0,01. Коэффициент излучения  $\varepsilon$  определялся в соответствии с соотношением:

$$\varepsilon = \int_{2,5\text{ мкм}}^{25\text{ мкм}} (1 - R(\lambda)) \cdot I_0(\lambda) d\lambda \Big/ \int_{2,5\text{ мкм}}^{25\text{ мкм}} I_0(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $I_0(\lambda)$  – спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела при заданной температуре

#### **Определение $\alpha_s$ на интегральном фотометре ФМ-59М**

Коэффициент поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  на интегральном фотометре ФМ-59М определяется путем измерения его интегрального коэффициента отражения в соответствии с соотношением

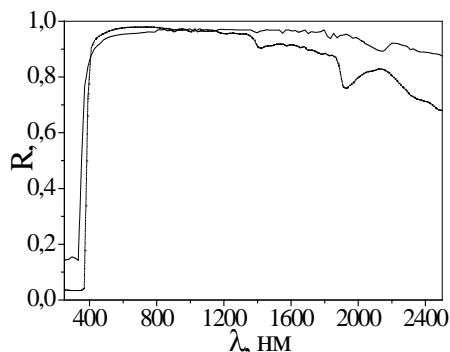
$$\alpha_s = 1 - R_s, \quad (5)$$

где  $R_s$  – коэффициент отражения солнечного излучения образца.

Измерение коэффициента отражения  $R_s$  образца на приборе основывается на регистрации фотоприёмниками усреднённой освещенности участка внутренней поверхности интегрирующей сферы. Размеры участка определяются углом обзора фотоприемников. Величина освещенности участка внутренней поверхности сферы пропорциональна коэффициенту отражения образца. На образец, приложенный к отверстию в сфере, падает зондирующий поток излучения. Отраженный от образца поток путем многократных переот-

ражений от стенок сферы равномерно распределяется по ее поверхности. Внутренняя поверхность интегрирующей сферы покрыта сульфатом бария, коэффициент диффузного отражения которого, в диапазоне длин волн от 0,25 до 2,40 мкм составляет более 0,90. Пространственное распределение яркости отраженного от внутренней поверхности сферы излучения подчиняется закону Ламберта.

На рисунке 1 представлены спектры отражения образцов с различным характером отражения и подобными спектрами отражения.



**Рисунок 1 – Спектры коэффициента отражения образцов, измеренные на двухлучевом спектрофотометре**

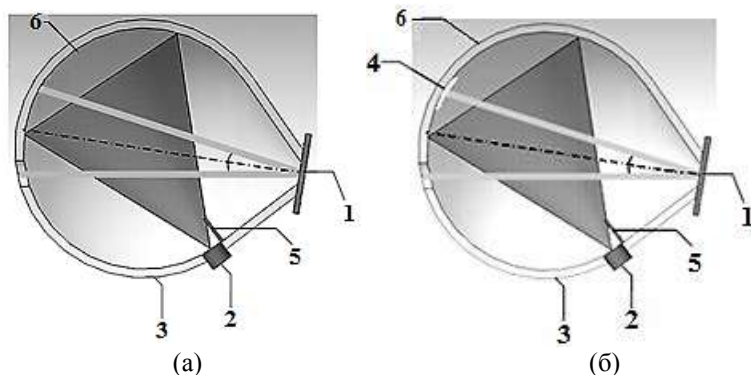
**Пунктирная линия – спектр отражения эталонного образца с диффузным характером отражения  $R_s = 0,910$ ,  $\alpha_s = 0,090$**

**Сплошная линия – спектр отражения измеряемого образца с зеркальным характером отражения  $R_s = 0,890$ ,  $\alpha_s = 0,110$**

Освещенность участка внутренней поверхности интегрирующей сферы при градуировке прибора на диффузно отражающем образце будет равномерной (рисунок 2а). При измерении зеркально-отражающего образца, на фоне равномерной освещенности участка  $\beta$  внутренней поверхности интегрирующей сферы будет световое пятно, обусловленное зеркальной составляющей отражения образца (рисунок 2б). Из-за попадания светового пятна зеркальной составляющей отражения в угол обзора фотоприемников значение коэффициента отражения измеряемого образца оказывается завышенным до 0,990 (расчетное значение составляет 0,890).

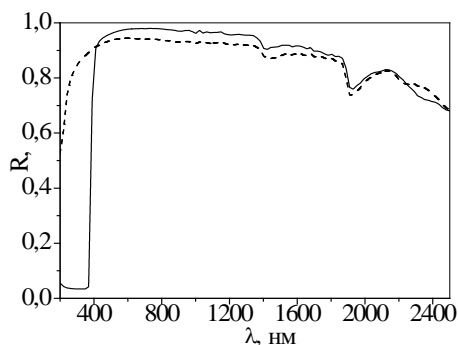
Снижение погрешности измерения  $R_s$  образцов, отличающихся по характеру отражения, достигается установкой дополнительной интегрирующей сферы с отверстием для попадания пятна зеркальной составляющей отражения образца или перенос фотоприемников в другое место сферы с ограничением их угла обзора дополнительным экраном. В этом случае пятно, обусловленное отражением зеркальной составляющей образца, окажется вне угла регистрации фотоприемников. Вторым недостатком фотометра ФМ-59М является слабая чувствительность прибора в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра, что приводит к погрешности измерения  $R_s$  при отличии эталонного и

измеряемого образца по интенсивности спектра отражения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. На рисунке 3 представлены спектры отражения двух образцов, которые имеют значительное отличие по интенсивности в УФ диапазоне.



- 1 – образец;
- 2 – фотоприемники;
- 3 – интегрирующая сфера;
- 4 – световое пятно зеркальной составляющей отражения;
- 5 – экран;
- 6 – участок интегрирующей сферы, регистрируемый фотоприемниками.

**Рисунок 2 – Распределение освещенности на внутренней поверхности интегрирующей сферы при отражении светового потока от образцов**  
**(а) – с диффузным характером отражения**  
**(б) – с зеркальным характером отражения**



**Рисунок 3 – Спектры коэффициента отражения образцов, измеренные на двухлучевом спектрофотометре**  
**Пунктирная линия – спектр отражения эталонного образца с высоким коэффициентом отражения в УФ диапазоне  $R_s = 0,910$ ,  $\alpha_s = 0,090$**   
**Сплошная линия – спектр отражения измеряемого образца с низким коэффициентом отражения в УФ диапазоне  $R_s = 0,877$ ,  $\alpha_s = 0,123$**

При проведении градуировки прибора на образце с высоким уровнем отражения в УФ диапазоне и измерении образца с низким уровнем отражения в данном диапазоне результатом будет завышенное отражение  $R_s = 0,970$  (расчетное значение  $R_s = 0,877$ ). Значение коэффициента отражения в данном случае будет определено не в области от 0,25 до 2,40 мкм, а в области от 0,40 до 2,40 мкм, где спектр отражения измеряемого образца в области максимальной чувствительности источника излучения прибора превышает спектр отражения эталонного образца. Для устранения данного недостатка необходимо применение источника излучения, имеющего в своем спектре необходимый уровень УФ излучения, а также фотоприемника с повышенной квантовой эффективностью в УФ диапазоне спектра в комбинации с предусилителем с высоким коэффициентом усиления.

### **Определение коэффициента излучения $\varepsilon$ на терморadiометре ТРМ-И**

На терморadiометре определяют коэффициент излучения –  $\varepsilon$  материалов в диапазоне длин волн от 3 до 40 мкм относительным методом с использованием зеркального эллипсоида и эталонных образцов сравнения. При этом коэффициент излучения измеряемого образца связан с его коэффициентом отражения соотношением

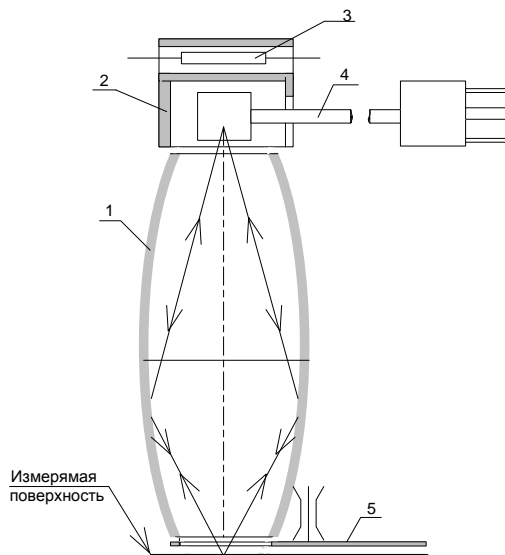
$$\varepsilon = 1 - \rho, \quad (6)$$

В основу работы терморadiометра положен метод сравнения тепловых потоков, отраженных от зеркальной поверхности модулятора и от исследуемой поверхности объекта. Величина сигнала  $\Delta U$  на болометре, пропорциональна разности этих потоков  $\Delta R$ , которая имеет место из-за поглощения излучения при отражении от исследуемой поверхности и зависит от коэффициента излучения  $\varepsilon$  этой поверхности. Следовательно, между коэффициентом излучения исследуемых поверхностей и сигналом, поступающим в измерительную схему прибора, существует прямо-пропорциональная зависимость. Основным элементом оптической схемы терморadiометра является эллипсоид вращения 1, представленный на рисунке 4, в одной из фокальных плоскостей которого расположена приемная площадка болометра 4, а в другой – исследуемая поверхность объекта.

Измерения  $\varepsilon$  на терморadiометре ТРМ-И проводят с двумя эталонными образцами: позолоченным зеркалом и моделью черного тела. Материалы и покрытия ТРП в большинстве случаев обладают диффузным характером отражения. Диффузная составляющая отраженного излучения частично рассеивается на зазоре между зеркальным модулятором и плоскостью среза эллипсоида. Это приводит к погрешности определения  $\varepsilon$  при градуировке прибора на позолоченном зеркале и измерении диффузно-отражающих образцов. Измерения диффузно-отражающих образцов и градуировку прибора необходимо проводить на высоко-отражающим диффузном образце. В качестве такого образца использовался образец из алюминиевого сплава после пескоструйной обработки поверхности с последующей химической полировкой. Значение спектрального коэффициента отражения данного образца составляет более



0,93 в диапазоне длин волн от 3 до 25 мкм.

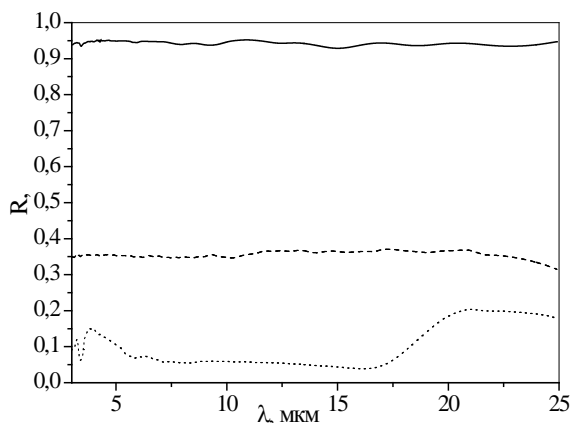


- 1 – эллипсоид вращения;
- 2 – нагреватель в виде модели черного тела;
- 3 – резисторы для нагрева;
- 4 – приемная площадка болометра;
- 5 – зеркальный модулятор.

**Рисунок 4 – Оптическая схема терморадометра ТРМ-И**

В таблице 1 представлены результаты определения коэффициента излучения  $\epsilon$  трех диффузно-отражающих материалов при градуировке терморадометра ТРМ-И на зеркально и диффузно отражающем образце, а также расчетные значения  $\epsilon$ , полученные на основании измеренных спектров отражения на высокоточном ИК-Фурье спектрометре (рисунок 5). Из таблицы видно, что при градуировке прибора на высоко-отражающем диффузном образце, значение коэффициента излучения  $\epsilon$  материалов оказывается более близким к значениям  $\epsilon$ , полученным расчетным путем на основании измеренных спектров отражения.

Вторым недостатком прибора является регистрация болометром дополнительного потока собственного излучения образца, обусловленного его нагревом. Зондирующее излучение вызывает нагрев образца, в результате которого к отраженному от образца потоку излучения добавляется собственный поток излучения. Оба потока модулируются зеркальным модулятором и попадают на болометр, что приводит к завышенному значению коэффициента излучения  $\epsilon$ . Для образцов с низким значением теплоемкости, погрешность определения  $\epsilon$  оказывается наиболее значительной, поскольку они обладают большим собственным излучением из-за прогрева их поверхности образца.



№1 – верхняя спектральная кривая,  $\rho = 0,946$ ,  $\varepsilon = 0,054$   
 №2 – средняя спектральная кривая,  $\rho = 0,380$ ,  $\varepsilon = 0,620$   
 №3 – нижняя спектральная кривая,  $\rho = 0,081$ ,  $\varepsilon = 0,919$

**Рисунок 5 – Спектры отражения трех образцов, измеренные на ИК-Фурье спектрометре**

**Таблица 1 – Сравнительные результаты определения коэффициента излучения  $\varepsilon$  диффузно-отражающих материалов**

Образец	Значение $\varepsilon$		
	Определенное по результатам измерений на ИК-Фурье спектрометре	Определенное на ТРМ-И	
		при градуировке на позолоченном зеркале	при градуировке на диффузно-отражающем образце
1	0,054	0,160	0,070
2	0,620	0,675	0,625
3	0,919	0,925	0,920

За счет выноса модулятора за пределы эллипсоида и введения зондирующего излучения в отверстие эллипсоида под небольшим углом к его оси, на образец падает и отражается от него модулированное излучение. Напротив, собственное излучения образца является в предлагаемой схеме немодулированным и не будет зарегистрировано болометром.

**Выводы**

1 Определены источники основных погрешностей определения  $A_s, \varepsilon$  на интегральном фотометре ФМ-59М и терморадиометре ТРМ-И и предложены способы по повышению точности определения  $A_s, \varepsilon$  на приборах

1.1 Для повышения точности определения  $A_s$  на интегральном фотометре ФМ-59М необходимо:

- устранение из поля зрения фотоприемников светового пятна на внутренней поверхности интегрирующей сферы, обусловленного отражением зеркальной составляющей образца;

- повышение чувствительности прибора в ультрафиолетовом диапазоне спектра от 0,25 до 0,40 мкм.

1.2 Для повышения точности определения коэффициента  $\epsilon$  излучения на терморадиометре необходимо:

- для диффузно-отражающих образцов градуировку прибора проводить на образце с высоким коэффициентом диффузного отражения;
- устранить влияние собственного излучения образца, перемещением модулятора за пределы эллипсоида с вводом зондирующего излучения в отверстие эллипсоида под небольшим углом к его оси [8].

2 В соответствии с предложенными в настоящей работе вариантами усовершенствования приборов повышается точность определения  $\alpha_s$ ,  $\epsilon$  и уменьшается количество эталонных образцов сравнения.

#### *Литература*

1. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Основные направления создания отечественных многоразовых космических систем // Информационно-технологический вестник 2014. № 1. С.34-43.
2. Парфинский В.А. Фотометрические методы измерений коэффициента излучения при температурах, близких к комнатным // Оптический журнал 1995. № 6. Россия. Санкт-Петербург. ИТМО.С 63-71.
3. Филиппова О.В. Разработка комбинированной светозащитной бленды звездного датчика С 248 // Вторая всероссийская научно-техническая конференция современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов 2010 г. Россия. Таруса.
4. Хасаншин Р.Х., Тимофеев А.Н., Просвириков В.М., Першина Е.О. Радиационно-стимулированные изменения оптических свойств модельных композиционных материалов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2008. Вып.1 С. 14-17.
5. Хрусталева Б.А. Методы исследования радиационных свойств поверхностей твердых тел // Лучистый теплообмен. Калининград: КГУ. 1974. С. 5-51.
6. ИСО 16397:2013 Международный стандарт // Космические системы. Измерения термооптических свойств терморегулирующих материалов. 2013. Международная организация по стандартизации.
7. Модель космоса. Научно-информационное издание // Под ред. Новикова Л.С.– Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов // М.: КДУ. 2007. 1144 С.
8. Edgar R. Miller; Richard J. Mell, both of Huntsville, Ala. // Patent Method and apparatus for measuring total specular and diffuse optical properties from the surface of an object 5,659,397 Aug. 19, 1997.
9. Prosvirnikov V.M., Grigorevskiy A.V., Kiseleva L.V., Zelenkevich A.P., Tsvelev V.M. Influence of space environment on spectral optical properties of temperature control coatings // Protection of Materials and Structures from the Space Environment ICPMSE-7. Vol 6. 2006. pp.61-69.
10. Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Grigorevskiy A.V., Galygin A.N. Influence of UV radiation on outgassing of polymeric composites // AIAA Journal of

- Spacecraft and Rockets. Vol. 43, No. 2. 2006. pp. 410-413. URL: <https://doi.org/10.2514/1.15847>. (дата обращения 28.02.2018).
11. Khassanchine R.H., Timofeev A.N., Galygin A.N., Kostyuk V.I. Simulation of electron radiation on outgassing of spacecraft materials // AIAA Journal of Spacecraft and Rockets. Vol. 43, No. 3. 2006. pp. 509-513. URL: <https://doi.org/10.2514/1.15317> (дата обращения 24.02.2018).

УДК 678.5/7:536.45:629.7.02

## **Выбор состава металлоперехода для камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги**

**А.С. Разина**, аспирант третьего года обучения кафедры «Управления качеством и стандартизации»,

**Н.П. Асташева**, д.б.н., профессор кафедры «Управления качеством и стандартизации»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области

«Технологический университет», г. Королев, Московская область

*При замене металлических камер сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги на камеры из углерод-керамического материала возникает проблема соединения металла и углерод-керамики. Для решения этой проблемы в работе представлены результаты прочностных расчетов соединения различных материалов в виде переходного кольца. Замена материала позволит избежать воздействия термических коэффициентов линейного расширения на работу жидкостного ракетного двигателя малой тяги для сохранения герметичности узла стыка при воздействии рабочих температур.*

Углерод-керамический композиционный материал, камера сгорания, металлопереход, переходное кольцо.

## **The choice of the composition of the metal transition for the combustion chamber of low-thrust liquid thruster**

**A.S. Razina**, graduate third year of the Department of Quality Control and Standardization,

**N.P. Astasheva**, Doctor of Biological, professor of Department of Quality Control and Standardization,

State Educational Institution of Higher Education

Moscow Region «University of technology», Korolev, Moscow region

*When replacing the metal combustion chambers of a low-thrust liquid rocket engine to combustion chambers made of carbon-ceramic composite material, a problem arises between the connection of metal and carbon-ceramic. To solve this problem, in this work presents the results of strength calculations of the connection of various materials in the form of a transition ring. Replacement of the material will avoid the effect of thermal coefficients of linear expansion on the operation of a low-trust liquid rocket engine to maintain the tightness of the joint node when exposed to operating temperatures.*

Carbon-ceramic composite material, combustion chamber, metal transition, adapter ring.

Использование камер сгорания из углерод-керамического композиционного материала для жидкостных ракетных двигателей малой тяги открывает новые возможности для увеличения эффективности жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Повышение рабочей температуры стенки камеры сгорания позволит увеличить среднее по камере сгорания соотношение компонентов и, как следствие, повысить удельный импульс жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Основной проблемой при создании камер сгорания из углерод-керамического композиционного материала является создание конструкции узла металлоперехода. Различие в термическом коэффициенте линейного расширения углерод-керамического композиционного материала и металла приводит к нарушению герметичности стыка и потери несущей способности конструкции узла стыка при температурах выше 300 °С. Оба материала, которые должны быть соединены, неоднородны и имеют разные термические коэффициенты линейного расширения (сталь –  $\alpha_{ст} = 16 * 10^{-6} 1/K$ ; углерод-керамический композиционный материал вдоль волокон –  $\alpha_{км||} = 4,4 * 10^{-6} 1/K$ ; углерод-керамический композиционный материал поперек волокон –  $\alpha_{км\perp} = 0,42 * 10^{-6} 1/K$ ), которые приводят к высоким остаточным напряжениям. Более того, разница в модулях Юнга может привести к возникновению концентраций напряжений на границе разнородных материалов. Чтобы справиться с несоответствием термических коэффициентов линейного расширения, необходим подбор материала, который способен выдерживать заданную температуру в окислительной среде.

Во всех вариантах конструкции узла стыка (рисунок 1) используется элемент, условно названный переходным кольцом. Именно эта деталь непосредственно контактирует с композиционным материалом и несет функцию крепления камеры сгорания к смесительной головке (рисунок 2).

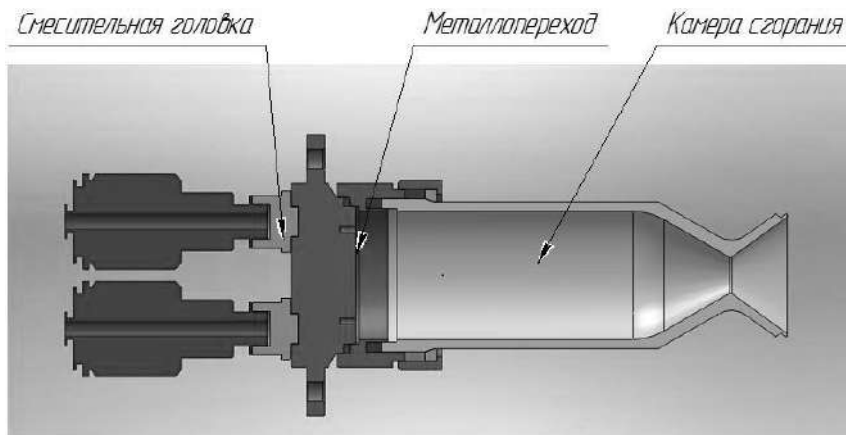


Рисунок 1 – Конструкция узла стыка камеры сгорания и смесительной головки

В настоящее время в качестве материала переходного кольца используется титан-ниобиевый сплав с заданным термическим коэффициентом линейного расширения марки ТВ-36. Изготовленные из сплава ТВ-36 переходные кольца фиксируются на камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги при помощи газофазного осаждения карбида кремния [3] на порошок карбида кремния [2] в месте контакта.

Данный материал обладает следующими преимуществами:

- имеет однофазную внутреннюю структуру;
- плотность  $8,1 \text{ г/см}^3$ ;
- малый термический коэффициент линейного расширения в интервале температур от  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+100 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\alpha_{\text{ТВ-36}} = 0,5 * 10^{-6} \text{ 1/K}$ ).

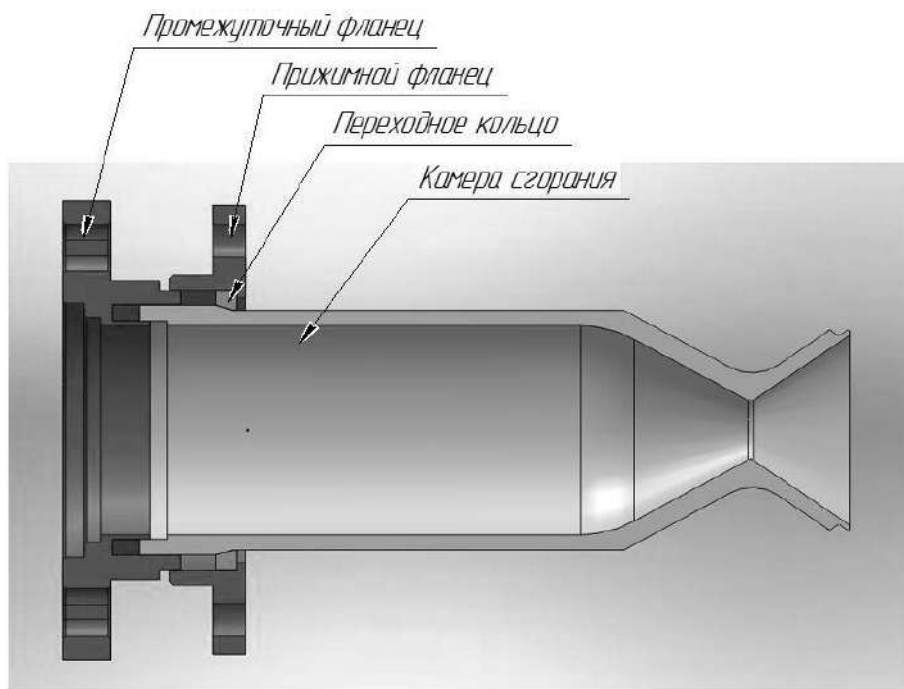
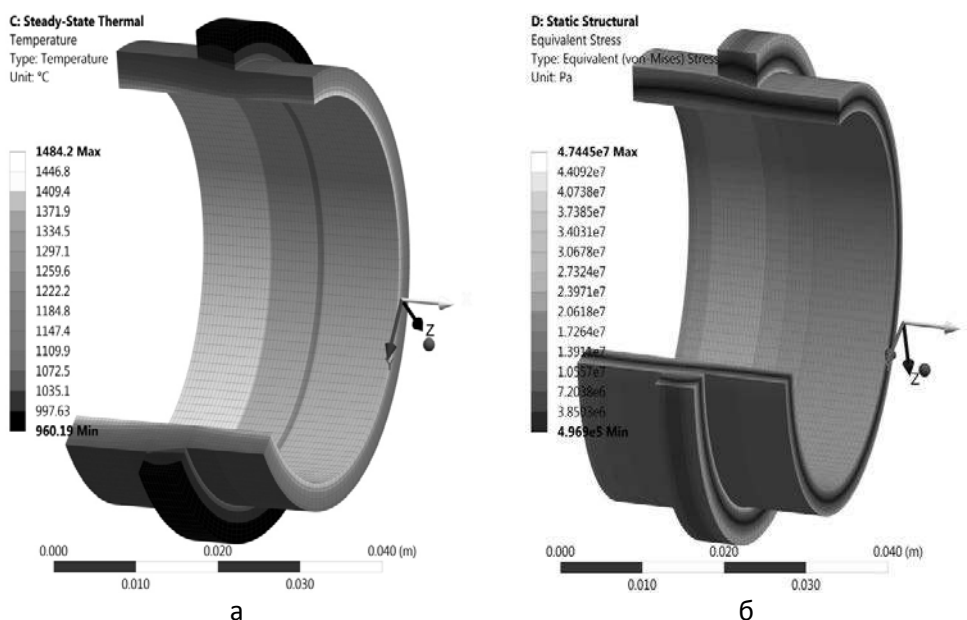


Рисунок 2 – Конструкция металлоперехода

Из-за большой разницы в значениях коэффициента линейного термического расширения для применяемых в металлопереходе материалов (металла и углерод-керамического композиционного материала), возникает значительное различие в работе данных материалов. Разное тепловое расширение деталей приводит к возникновению излишних деформация и зазоров между ними. В результате проведения теплового расчета было получены поле температур и распределение эквивалентных напряжений для конструкции узла стыка (рисунок 3). Расчет температурного поля конструкции необходим в качестве граничных условий для проведения прочностного анализа.



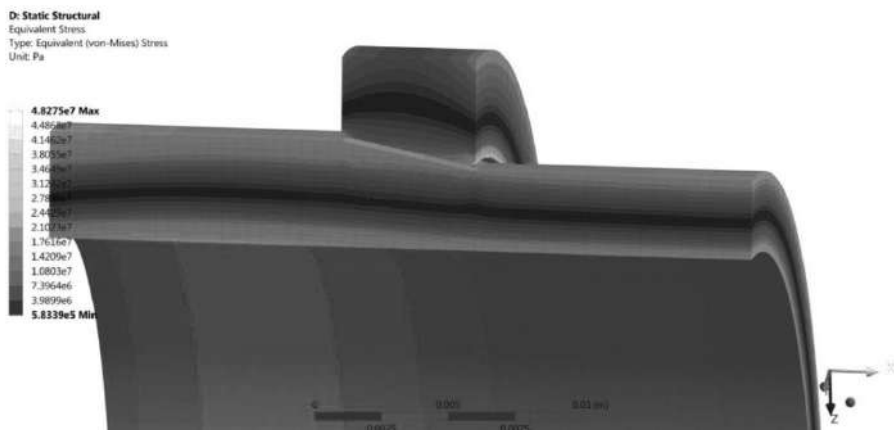
**Рисунок 3 – Тепловой и прочностной расчеты конструкции металлоперехода камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги: а) - Температурное поле конструкции; б) - Эквивалентные напряжения к конструкции**

По техническим условиям эксплуатации для данной конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги, изменение геометрических характеристик узла сопряжения не представляется возможным, соответственно, единственным решением проблемы доработки металлоперехода является выбор материала переходного кольца. В качестве возможных вариантов были рассмотрены:

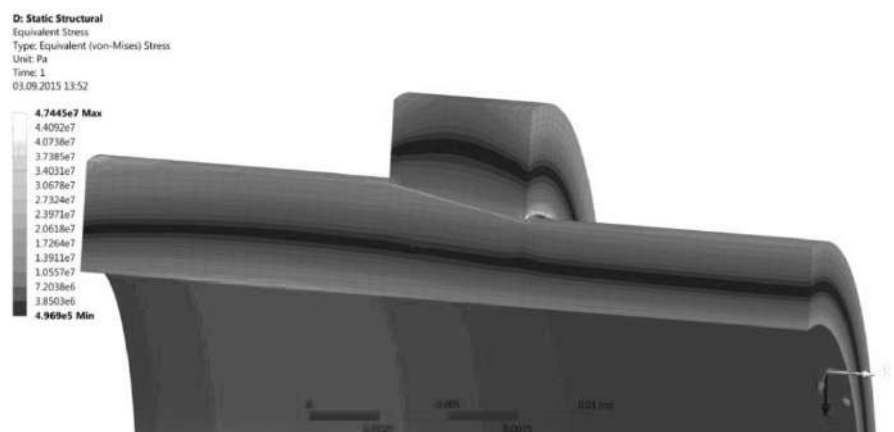
- 1) титановые сплавы (BT-1, BT-5Л, BT-6Л, BT-9Л, BT-21Л, BT-3-1Л);
- 2) титан-ниобиевый сплав с заданным термическим коэффициентом линейного расширения марки ТВ-36;
- 3) углерод-керамический композиционный материал типа «КМК-МС»;
- 4) углерод-керамический композиционный материал типа «Ипрескон».

На этапе выбора материала произведен прочностной расчёт со всеми возможными вариантами материалов прижимного кольца. В расчетах принималось, что контакт не идеальный, и присутствует контактное термическое сопротивление, возникающее при прохождении теплового потока между соприкасающимися поверхностями твердых тел, обусловленное дискретным характером фактического контакта (рисунок 4).

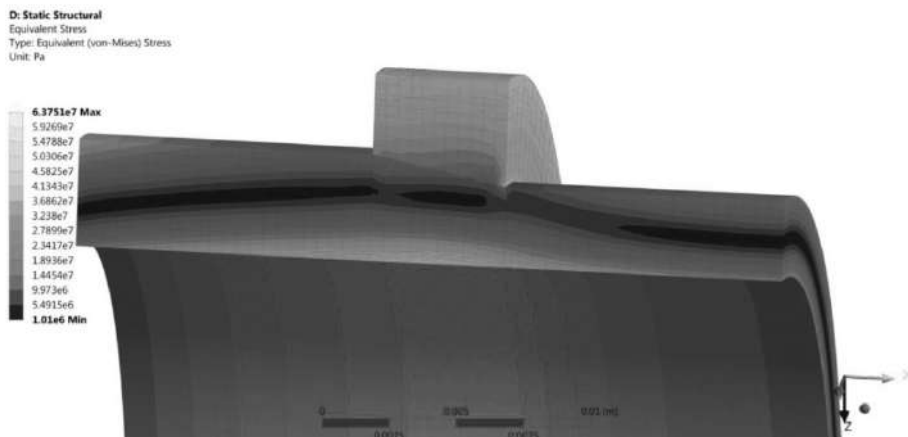




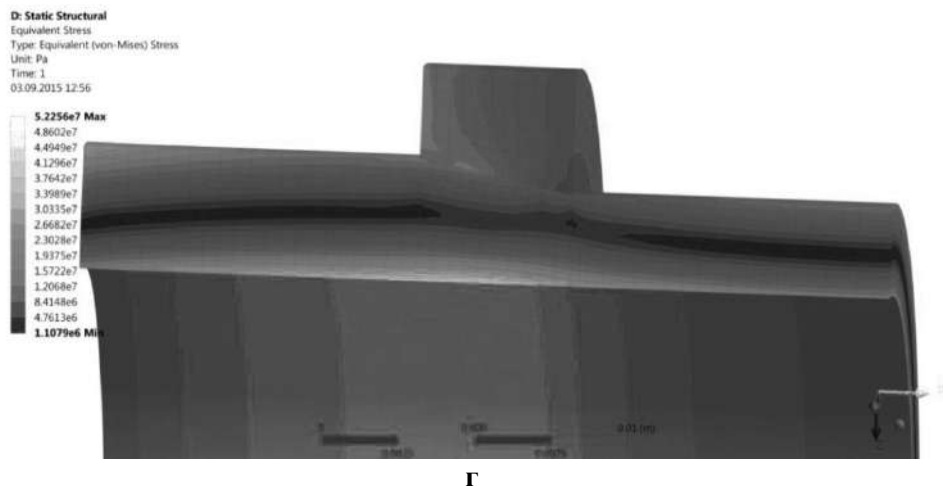
а



б



в



г

**Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения в конструкции при разных материалах для переходного кольца: а) – Титановые сплавы (BT-1, BT-5Л, BT-6Л, BT-9Л, BT-21Л, BT-3-1Л); б) – Титан-ниобиевый сплав с заданным термическим коэффициентом линейного расширения марки ТВ-36; в) – углерод-керамический композиционный материал типа «КМК-МС»; г) – углерод-керамический композиционный материал типа «Ипресскон»**

Значение межконтактного давления и выполнение условия прижима в месте контакта представлено в таблице 1.

**Таблица 1 – Величина межконтактного давления**

Материал кольца	Межконтактное давление, Па	Условие контакта
Титановые сплавы (BT-1, BT-5Л, BT-6Л, BT-9Л, BT-21Л, BT-3-1Л)	0	–
ТВ-36 при температуре 250 °С	4.61e+07	+
ТВ-36 при температуре 960 °С	0	–
Углерод-керамический композиционный материал типа «КМК-МС»	9.31e+06	+
Углерод-керамический композиционный материал типа «Ипресскон»	6.91e+06	+

Из результатов расчетов видно, что при использовании любого титанового сплава, в качестве материала переходного кольца, не будет возникать контакт при тепловом воздействии. Переходное кольцо, выполненное из титан-ниобиевого сплава марки ТВ-36, ввиду своего низкого термического коэффициента линейного расширения, при воздействии низких температур (до 300 °С) сжимает камеру сгорания из углерод-керамического композиционного материала до значения контактного термического сопротивления ~ 46,1 МПа;

однако при дальнейшем повышении температуры переходное кольцо из ТВ-36 начинает расширяться и, впоследствии, теряет контакт с камерой сгорания. При изготовлении прижимного кольца из углерод-керамического композиционного материала наблюдается нормальное значение контактного давления на всем промежутке нагрева изделия, причем стоимость изготовления углерод-керамического композиционного материала типа «Ипресскон» в разы ниже, нежели «КМК-МС».

На основании проведенных расчетов была изготовлена камера сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги из углерод-керамического композиционного материала с переходным кольцом из углерод-керамического композиционного материала типа «Ипресскон» (рисунок 5).



**Рисунок 5 – Камера сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги из углерод-керамического композиционного материала с переходным кольцом из углерод-керамического композиционного материала типа «Ипресскон»**

Использование углерод-керамического композиционного материала типа «Ипресскон» в качестве материала для переходного кольца металлоперехода жидкостного ракетного двигателя малой тяги позволит избежать воздействия термических коэффициентов линейного расширения на работу жидкостного ракетного двигателя малой тяги в части сохранения герметичности узла стыка при воздействии рабочих температур.

#### *Литература*

1. Исаев В.Г. О методическом подходе к оценке технического уровня агрегатов и систем космических ракетных комплексов // Информационно-технологический вестник. № 2(04). 2015.
2. Удинцев П.Г., Чунаев В.Ю., Богачев Е.А., Тимофеев А.Н., Лахин А.В. Способ неразъемного соединения деталей. Патент РФ № 2415822, приоритет от 15.10.2008.
3. Тимофеев А.Н., Богачев Е.А., Габов А.В., Абызов А.М., Персин М.И., Смирнов Е.П. Способ получения композиционного материала. Патент РФ №2130509, приоритет от 26.01.1998.

УДК 544.03

**Анализ результатов воздействия электронов средних энергий  
на защитные и терморегулирующие покрытия  
высокоорбитальных космических аппаратов**

**А.М. Шамаев**, аспирант,  
**М.Д. Озерский**, д.т.н., профессор кафедры управления качеством  
стандартизации,  
Государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования Московской области  
«Технологический университет» г. Королев, Московская область

*Проведен анализ результатов экспериментальных исследований влияния электронного облучения на стекла К-208 и СМГ, используемые для изготовления защитных покрытий солнечных батарей и терморегулирующих покрытий космических аппаратов (КА). Показано, что обусловленные электростатические разряды приводят к структурным изменениям поверхностей исследованных стекол. Намечены цели дальнейших исследований влияния протонного и электронно-протонного воздействия на свойства таких покрытий.*

Электронное облучение, электростатические разряды, микровыступы, разрядные каналы.

**Analysis of the results of medium-energy electrons on the protective and  
thermoregulatory coatings of high-orbit satellites**

**A.M. Shamayev**, graduate student,  
**M.D. Ozersky**, Doctor of technical sciences, professor of the department of Quality  
Management and Standardization,  
State Budget Educational Institution of Higher Education  
Moscow Region «University of Technological» Korolev, Moscow region

*The results of experimental studies of the effect of electron irradiation on K-208 and CMG glasses used for manufacturing protective coatings of solar batteries and thermal control coatings of space vehicles are analyzed. It is shown that the caused electrostatic discharges lead to structural changes in the surfaces of the glasses studied. The goals of further studies of the influence of proton and electron-proton effects on the properties of such coatings are outlined.*

Electron irradiation, electrostatic discharges, microprotrusions, discharge channels.

**Введение**

В настоящее время увеличивается спрос на космические аппараты, ко-

торые предназначены для телекоммуникаций и обеспечения связи, для наблюдения за окружающей средой и исследования ресурсов, для глобальной системы позиционирования и т.д. Удовлетворения такого спроса требует создания новых поколений спутников длительным сроком активного существования (САС), способных решать широкий спектр усложняющихся задач. Возрастающая сложность и многофункциональность космической техники в сочетании с длительным сроком службы предъявляют жесткие требования к надежности как отдельных систем, так и изделия в целом.

В частности, с ростом потребляемой энергии КА и увеличением их САС до 15 лет и более ужесточились требования к ресурсной оценке деградации солнечных батарей (СБ). Поэтому особенно актуальными становятся исследования электростатических разрядов, обусловленных электризацией СБ и диэлектрических материалов внешних поверхностей КА в горячей магнитосферной плазме и взаимодействием с электронами естественных радиационных поясов Земли, с целью создания методики прогнозирования изменения свойств материалов в условиях эксплуатации [12]. Защитные покрытия СБ и терморегулирующие покрытия (ТРП), обеспечивающие заданный тепловой режим функционирования КА, особенно КА находящихся на геостационарной орбите под действием электронов и протонов накапливают заряды. Накопленные в диэлектрических материалах заряды обуславливают появление поверхностных потенциалов до 20 кВ [12] и электрических полей больших напряженностей, приводящих к электростатическим разрядам (ЭСР) с большими амплитудами токов и короткими фронтами, которые, в свою очередь, создают сбои в работе приборов и оборудования КА и вызывают повреждение материалов КА.

В настоящее время отсутствует количественная теория, описывающая ЭСР и механизмы их протекания при облучении диэлектрических материалов, позволяющая интерпретировать данные полученные в экспериментах. Это связано с тем, что под действием ионизирующего излучения в диэлектрических материалах происходят сложные взаимосвязанные процессы: аккумуляция заряда [1],[2],[17], индуцирующего поля большой напряженности; электростатические разряды [5],[6],[7],[18],[17] эмиссия вторичных электронов [3],[14]; миграция и релаксация зарядов, радиационно-стимулированные токи, обусловленные радиационно стимулированной проводимостью. Например, в состав стекла входят ионы щелочных металлов которые определяют ее проводимость. Исследования изменений структуры поверхности оптических материалов под действием ионизирующих излучений актуальны с точки зрения космического материаловедения является определения сохранности их функциональных свойств в поле излучений. Например, воздействие излучений космического пространства (КП) может привести к увеличению оптической плотности стекол за счет накопления образующихся в них центров окраски и способствовать загрязнению продуктами собственной атмосферы оптических поверхностей и т.д. [8], [9], [10], [13], [14].

Среди негативных проявлений ЭСР можно выделить: создание элек-

тромагнитных помех для работы бортовой аппаратуры; деструкцию материала; выброс в окружающее пространство плазменных струй, стимулирующих дальнейшее развитие разрядов на заряженных участках спутника и загрязняющих его оптические поверхности. Разряды на солнечных батареях приводят к деструкции и загрязнению покровных стекол, т.е. к деградации их оптических свойств и, как следствие, к постепенному снижению мощности вырабатываемой энергии. Риск возникновения ЭСР на поверхностях геостационарных спутников увеличивается в период магнитосферных бурь.

Материалы внешних поверхностей КА занимают значительную площадь его поверхности и наиболее подвержены действию ионизирующих излучений (ИИ). Так, за один год эксплуатации на геостационарной орбите (ГСО) приповерхностная поглощенная доза составляет  $8,8 \times 10^6$  Гр [12]. Поэтому проведение экспериментальных исследований и разработка методики по влиянию уровней радиационных нагрузок на их функциональные свойства является актуальной задачей. Повреждения, вызванные облучением, могут изменять как физические, так и химические свойства материала. Понимание радиационно-стимулированных эффектов, приводящих к микроструктурной эволюции материала, имеет решающее значение для прогнозирования его характеристик после длительного облучения, что, например, очень актуально в связи с тенденцией к увеличению САС КА.

### 1. Лабораторное моделирование воздействия электронов средних энергий на защитные покрытия СБ геостационарных спутников

На ГСО существенный вклад в величину поглощенной дозы в тонких приповерхностных слоях материалов, находящихся на поверхности КА, дают частицы горячей магнитосферной плазмы с энергиями в диапазоне от 1 до 50 кэВ и это обстоятельство необходимо учесть в экспериментальных исследованиях.

Для определения значений параметров электронного облучения при лабораторных экспериментах, воспроизводящих радиационные нагрузки на заданной орбите, используют определенную схему расчета. Проиллюстрируем ее на примере, используемой в ОАО «Композит», методики расчета значения параметра  $\varphi_{e,0}$  – плотности потока электронов моделирующей установки

с фиксированным значением энергии частиц  $E_{e,0}$ . Для определения плотности потока энергии моделирующей установки, соответствующей условиям на геостационарной орбите, расчеты по этой схеме выполняются на основании соотношений

$$\int_{E_1}^{E_2} \left( \frac{d\varphi(E)}{dE} \right)_e E dE = \varphi_{e,0} E_{e,0}, \quad (1)$$

где  $\left( \frac{d\varphi(E)}{dE} \right)_e$  – спектр электронов на ГСО;  $E_1, E_2$  – верхняя и ниж-

няя граница интервала энергетического спектра электронов на ГСО;  $\varphi_{e,0}$  и

$E_{e,0}$  – плотность потока и энергия электронов при проведении экспериментов.

Известно, что при облучении диэлектриков электронами, длина пробега которых не превышает размеры облучаемого образца, в нем появляются локальные области с высокой плотностью заряда. При критических значениях электрического поля начинают протекать ЭСР. Изучением разрядов при электронном облучении диэлектриков, заняты многие лаборатории мира. При этом не сформулированы общепринятые механизмы развития разрядов и не разработаны корректные модели их количественного описания.

## 2. Методика проведения экспериментов и применяемые материалы

Облучение осуществлялось в вакуумной камере моделирующей условия космического пространства установки «УВ-1/2» (ОАО «Композит») (см. рисунок 1) при давлении  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  Па электронами с энергиями 10, 20, 30 и 40 кэВ при плотности потока частиц от  $10^{10}$  до  $5 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Пучок электронов направлялся на квадратные образцы (40×40 мм) стекла СМГ и К-208 толщиной 120 и 170 мкм, предварительно очищенные в ультразвуковой ванне. При облучении образцы располагались на полированной металлической поверхности заземленного охлаждаемого столика, к которому они крепились медными пластинами шириной 2 мм. Для указанных значений энергии максимальные длины пробегов электронов в стекле не превышают соответственно 1,5, 5, 9 и 16 мкм и поэтому разряды стекло – металлическая подложка не рассматривались.

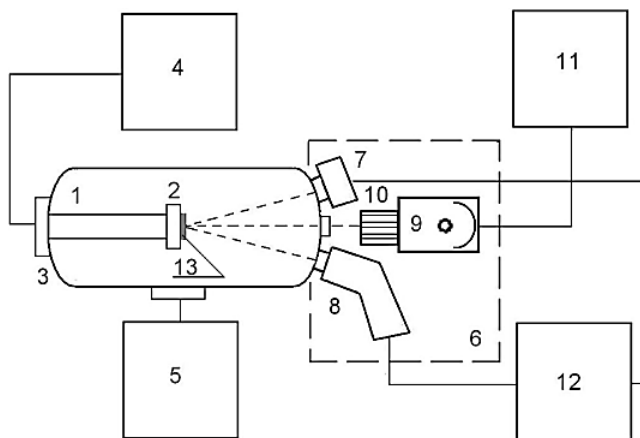


Рисунок 1 – Стенда «УВ-1/2»

1 – вакуумная камера; 2 – измерительный столик; 3 – термостат; 4 – система вакуумной откачки и контроля вакуума; 5 – блок измерений; 6 – блок имитаторов КП; 7 – ускоритель электронов; 8 – ускоритель протонов; 9 – источник электромагнитного излучения (ЭМИ); 10 – формирующее оптическое устройство; 11 – блок управления имитатором солнечного излучения; 12 – блок управления ускорителями; 13 – образец

Поверхности исходных и облученных образцов контролировалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). Рельеф поверхности образцов исследовался в режимеполуконтактной атомно-силовой моды.

Лабораторные эксперименты по изучению условий возникновения и развития ЭСР при облучении электронами с энергией от 10 до 50 кэВ проводились с образцами стекол К-208 и СМГ. Варьирование параметров облучения позволило управлять пространственно-временным распределением заряда термализованных электронов и исследовать зависимость типа разряда и параметров, характеризующих деструкцию поверхности материала, от энергии и интенсивности излучения, а так же остаточного давления в вакуумной камере. При этом основное внимание было уделено сравнительному анализу развития ЭСР в указанных стеклах при одинаковых условиях облучения. Необходимо отметить, что образцы стекла СМГ, покрытые пленкой толщиной 110 нм из фторида магния ( $MgF_2$ ) для снижения коэффициента отражения стекла в рабочей спектральной области элементов солнечных батарей, использовались для сравнительного анализа и интерпретации радиационно-стимулированных процессов, сопровождающих облучение защитных покрытий. Выбор стекол К-208 и СМГ обусловлен тем, что коэффициенты ВЭЭ  $\delta(E_e)$  этих стекол, в интересующем нас диапазоне энергий, различаются почти в три раза (рисунок 2).

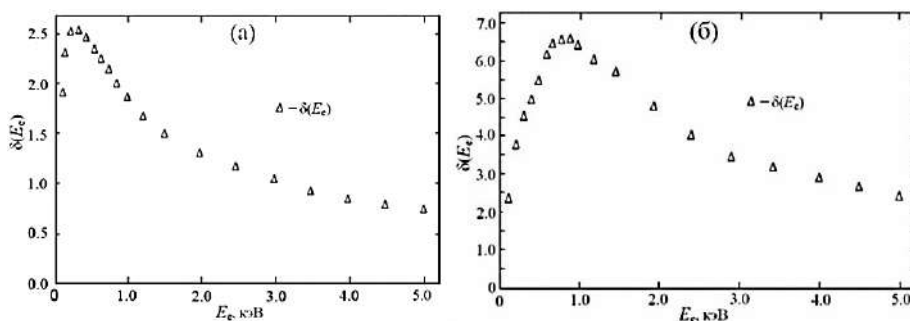


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов ВЭЭ стекла К-208 (а) и фторида магния (б) от энергии первичных электронов

Выход вторичных электронов происходит из тонкого приповерхностного облучаемого слоя толщиной порядка 10 нм, что в 11 раз меньше толщины покрытия из фторида магния стекла СМГ. Следовательно, в случае стекла СМГ, ВЭЭ полностью определяется материалом покрытия стекла.



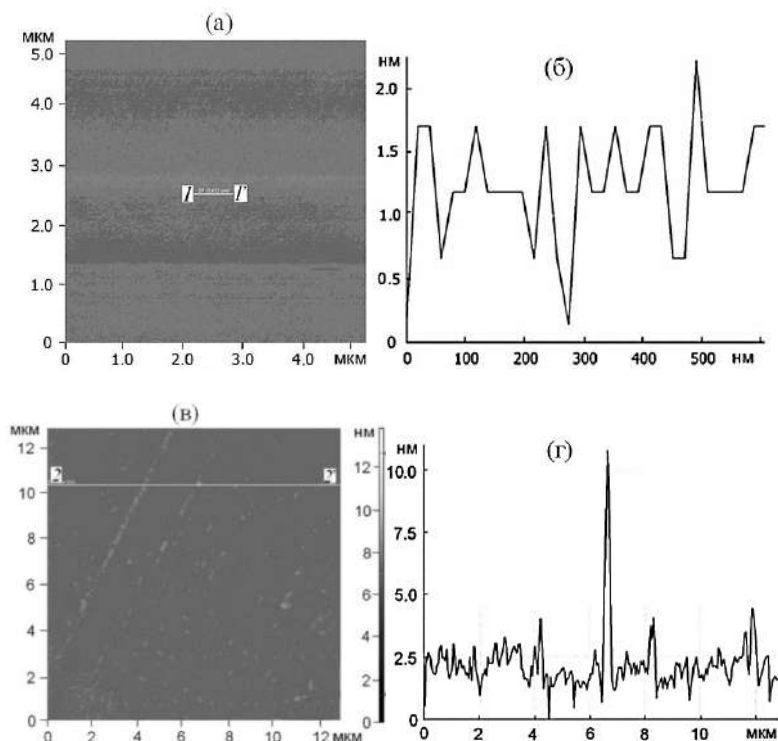


Рисунок 3 – АСМ-изображения исходных образцов: SMG – фрагмент поверхности 5,5×5,5 мкм и его сечение вдоль линии 1-1' (а, б); К-208–фрагмент поверхности 13×13 мкм и его сечение вдоль линии 2-2' (в, г)

Для сравнения качества поверхностей образцов стекол SMG и К-208 на рисунке 3 приводятся их АСМ-изображения. Из этого рисунка видно, что рельефы поверхностей SMG и К-208 отличаются размерами и количеством микровыступов, высота которых на поверхностях этих стекол достигают 1 нм (см. рис. 3, б) и 12 нм (см. рисунок 3, г) соответственно.

### 3. Анализ влияние интенсивности и энергии воздействующих электронов на структурные изменения поверхности стекол К-208 и SMG [5],[6],[7],[18]

При облучении заряженными частицами стеклянных образцов, размеры которых превышают максимальную длину пробега воздействующих частиц, в образцах появляются области локализации зарядов, индуцирующих электрические поля с высокой напряженностью. Превышение напряженности поля накопленного заряда критического значения приводит к разрядам, изменяющим структуру стекла [3]. Облучение интенсифицирует так же процессы высвобождения и дальнейшей миграции ионов металлов в электрическом поле внедренного заряда, которые сопровождаются перестройкой структуры стекла.

Облучение стекла сопровождается также отжигом структурных дефектов, концентрация которых особенно велика в его приповерхностном слое.

Отжиг дефектов и дислокаций приводит к появлению дополнительных механическим напряжениям и радиационно-стимулированному ускорению диффузии, которая обеспечивает перенос массы в облучаемом слое стекла, в том числе и к микровыступам. Перечисленные процессы приводят к изменениям физических свойств и структуры стекла.

Стекла К-208 и СМГ являются стойкими к воздействию радиации, что достигается за счет добавления в них церия  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . Следовательно, влияние накопления центров окраски в стеклах при электронном облучении дозами, соответствующими дозовым нагрузкам за период их эксплуатации на ГСО, не приводит к существенным изменениям их оптических свойств. Поэтому основное внимание уделялось исследованиям структурных изменений поверхностей образцов, вызванных ЭСР, при разных энергиях электронов и интенсивностях облучения.

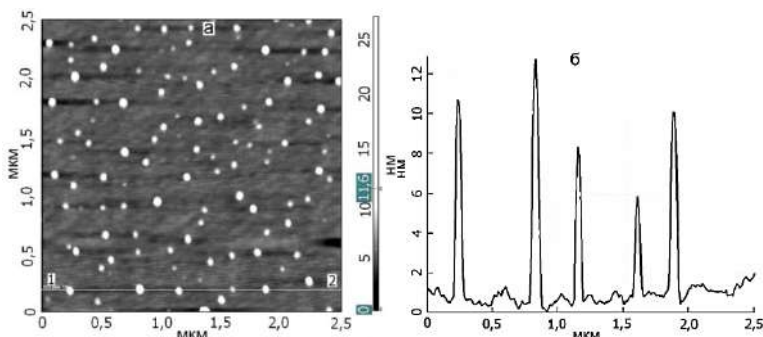
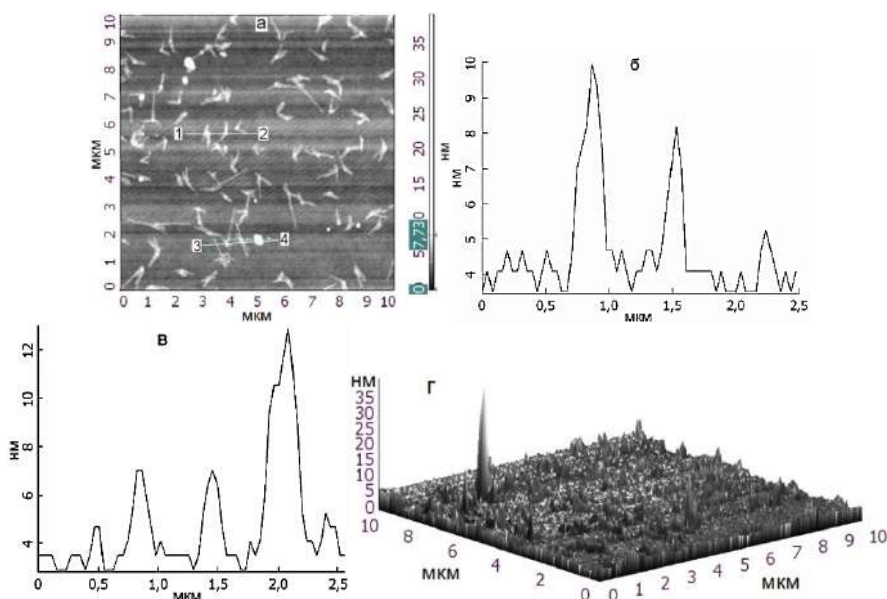


Рисунок 4 – АСМ-изображение рельефа облученного К-208: а – фрагмент поверхности  $2,5 \times 2,5$  мкм; б – сечение кадра вдоль линии 1- 2

На рисунке 4а приведено 2D-изображение образца, из которого видно, что в результате облучения электронами с энергией 10 кэВ и  $\Phi_e = 5,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  при  $\varphi_e = 2,8 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  на стекле появились микровыступы высотой до 25 нм. Из показанного на рисунке фрагмента поверхности, видно, что высота большинства микровыступов не превышает 12 нм. Следуя выше изложенным рассуждениям можно полагать, что появление и рост микровыступов связан с отжигом дефектов и дислокаций и диффузионными процессами в приповерхностном слое, и с разрядами между стеклом и ионизованной остаточной атмосферы вакуумной камеры, которые сопровождаются выбросом в окружающее пространство плазмы.

Между разрядами напряженность поля у облучаемой поверхности и концентрация положительных ионов возрастает, особенно в окрестностях микровыступов, в которых напряженность поля имеет локальные максимумы. Бомбардировка вершечек микровыступов ускоренными ионами приводит к их разогреву, что стимулирует развитие ЭСР. Повторение разрядов с микровыступов, обусловленное их повышенной электропроводимостью, приводит к увеличению их размеров.

По мере увеличения значения  $\varphi_e$  от  $3.0 \times 10^{10}$  до  $9.0 \times 10^{10}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  средняя высота микровыступов снижается с 12 до 8 нм и на поверхности образца появляются следы разрядов характерные для случаев облучения электронами с энергией порядка 10 кэВ, когда вокруг отдельных микровыступов образуются кластеры. В качестве примера на рисунке 5 показаны АСМ-изображения фрагмента образца, облученного флюенсом  $\Phi_e = 1.0 \times 10^{15}$   $\text{см}^{-2}$  при  $\varphi_e = 8.3 \times 10^{10}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Изображения на рисунках 5а и 5г демонстрируют структуры кластеров появившихся на поверхности облученного стекла и наличие на ней отдельного микровыступа высотой около 35 нм. Сечения кадра (рисунок 5а) вдоль линий 1-2 и 3-4 показаны на рисунках 5б и 5в. Анализ структуры поверхности показал, что средняя высота кластеров составляет 8 нм.



**Рисунок 5 – АСМ-изображения облученного образца К-208:**  
**а – 2D-изображение фрагмента поверхности 10×10 мкм; б и в – сечения кадра**  
**вдоль линий 1-2 и 3-4 соответственно; г – 3D-изображение**

Облучение образцов СМГ электронами с энергией 10 кэВ при значениях  $\varphi_e$  в диапазоне от  $2.0$  до  $9.5 \times 10^{10}$   $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$  не сопровождалось ЭСР, которые привели бы к заметным изменениям структуры их поверхностей. Такой результат может быть связан с тем, что стекло СМГ по сравнению с К-208, во-первых, обладает большей проводимостью, обеспечивающей сток избыточного заряда с тонкого приповерхностного слоя, а во-вторых, характеризуется меньшей концентрацией дефектов и дислокаций, отжиг которых приводит к появлению микровыступов. Еще одним фактором, влияющим на развитие разрядов при облучении стекла СМГ, по-видимому, является наличие на его облучаемой поверхности покрытия из фторида магния.

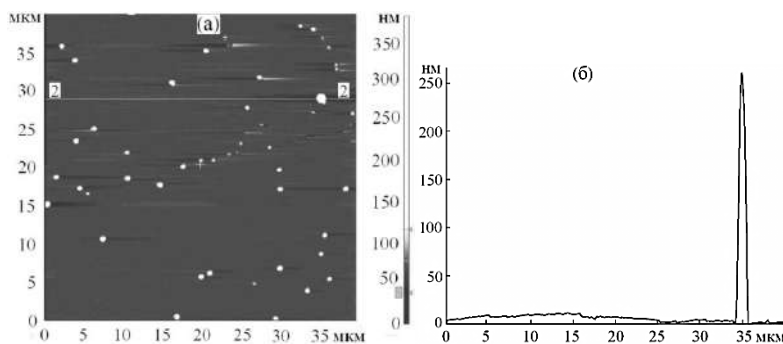


Рисунок 6 – АСМ-изображение поверхности облученного образца ( $\varphi_e = 4.3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ )

Структурные изменения поверхностей образцов К-208, облученных электронами с энергией 20 кэВ, существенно отличаются от тех, которые были показаны на рисунке 4 и 5. Результаты АСМ исследований образцов приведены на рисунках 6 – 8, в порядке возрастания параметра  $\varphi_e$  от 0 до  $2.3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

АСМ изображения после воздействия электронов с энергией 20 кэВ представлены на рисунках 6-8.

Из сравнения изображений, представленных на рисунках 3 и 6 следует, что на поверхности образца, облученного при  $\varphi_e = 4.3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , появляются следы разрядов первого типа – микровыступы. Они представляют собой застывшее стекло в местах выхода разрядов на облучаемую поверхность имеют максимальную высоту 250 нм. Частота разрядов росла вместе со значениями  $\varphi_e$ . При разрядах регистрировалось импульсное возрастание давления в вакуумной камере, обусловленное выбросами из образцов плазменных струй.

Концентрация образующихся микровыступов на образцах возрастает вместе со значением  $\varphi_e$ . Однако высота микровыступов при этом ограничивается 50 нм и параллельно протекают разряды 2-го типа реализующиеся вдоль поверхности стекла. Часто (рисунок 7в) поверхностные разряды проходят через микровыступ, оставляя на стекле разрядные каналы до 2 нм.

При значениях  $\varphi_e$  превышающих  $10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  наблюдаются только поверхностные разряды, а глубина разрядного канала достигает 10 нм, при этом ЭСР первого типа не наблюдаются, а глубина разрядного канала достигает 10 нм.

Результаты АСМ-исследований образцов, облученных электронами с энергией 40 кэВ, показанные на рисунках 9 и 10, аналогичны данным полученным при облучении электронами с энергией 20 кэВ. При сохранении общих закономерностей развития электростатических разрядов в этом случае наблюдались микровыступы высотой более 400 нм с ярко выраженными впадинами у их основания (см. рисунок 9а). Необходимо отметить, что преобладание поверхностных разрядов начинается при плотностях потока больших, чем при облучении электронами с энергией 20 кэВ.

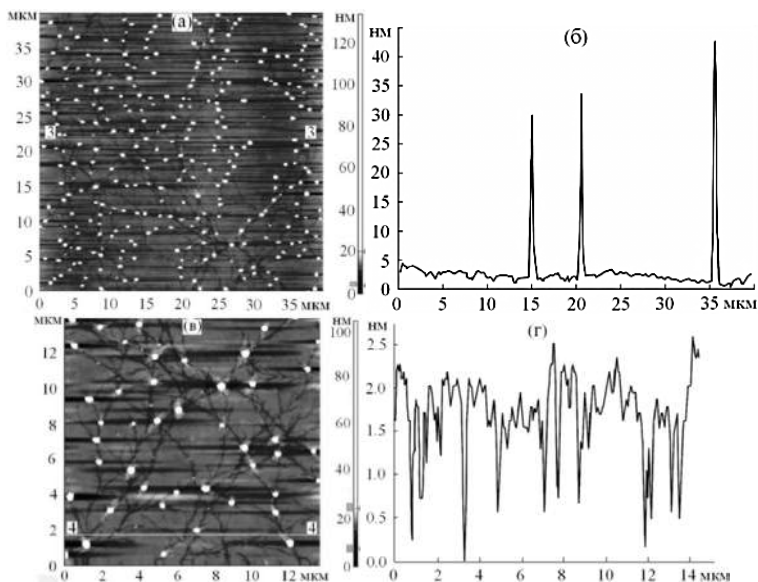


Рисунок 7 – АСМ-изображение поверхности облученного образца ( $\varphi_e = 8.6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ): фрагменты поверхности  $35 \times 35 \text{ мкм}$  (а),  $14 \times 14 \text{ мкм}$  (в) и сечения кадров вдоль линий «3-3» (б), «4-4» (г)

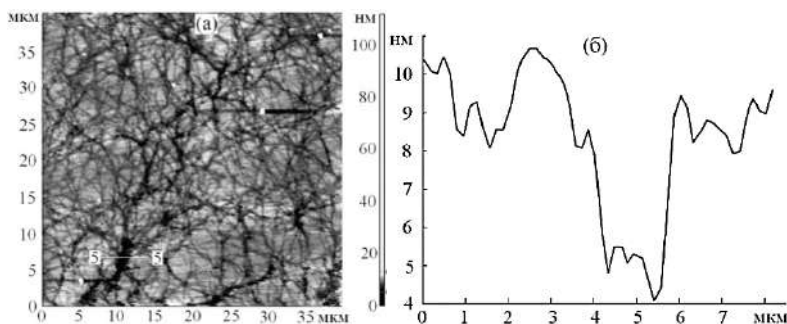


Рисунок 8 – АСМ-изображение поверхности облученного образца ( $\varphi_e = 2.16 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ): фрагмент поверхности  $35 \times 35 \text{ мкм}$  (а) и его сечение фрагмента вдоль линии «5 - 5» (б)

При облучении электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40 \text{ кэВ}$  образцов стекла SMG в зависимости от значения плотности потока излучения наблюдались разряды первого и второго типов. Так на рисунках 11-13 показаны АСМ-изображения образцов, облученных электронами с энергией  $20 \text{ кэВ}$  и флюенсами  $\Phi_e \leq 1.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , демонстрирующие некоторые особенности развития ЭСР в стеклах SMG.

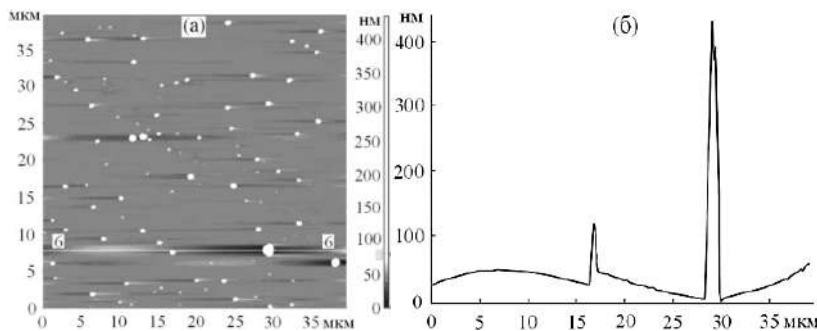


Рисунок 9 – АСМ-изображение поверхности облученного образца ( $\varphi_e = 7.5 \times 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ): фрагмент поверхности  $35 \times 35 \text{ мкм}$  (а) и сечение кадра вдоль линии «б - б» (б)

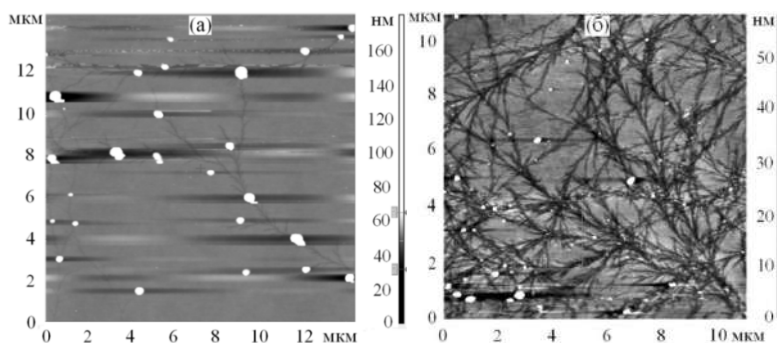


Рисунок 10 – АСМ-изображения поверхностей облученных образцов: а – фрагмент поверхности  $14 \times 14 \text{ мкм}$  ( $\varphi_e = 1.5 \times 10^{11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ); б – фрагмент поверхности  $12 \times 12 \text{ мкм}$  ( $\varphi_e = 2.14 \times 10^{11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ )

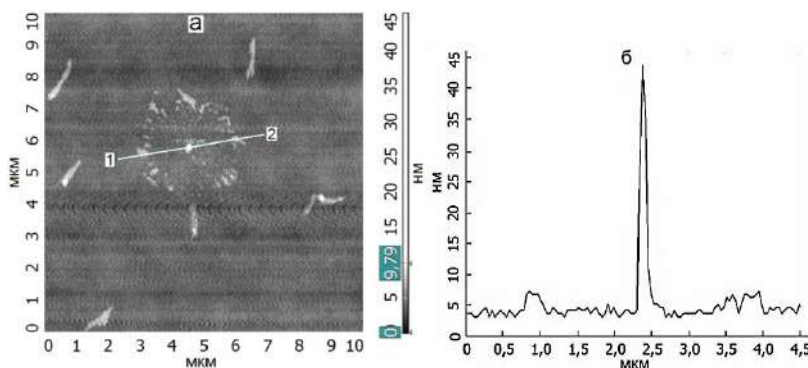


Рисунок 11 – АСМ-изображения участка  $10 \times 10 \text{ мкм}$  облученного образца SMG: а и б – 2D-изображение и его сечение вдоль линии 1-2 соответственно

Облучение образцов SMG флюенсом  $\Phi_e = 7.6 \times 10^{14} \text{ см}^2$  при  $\varphi_e = 3.0 \times 10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$  привело к структурным изменениям их поверхностей, обусловленным, как и в случаи облучения К-208, радиационно-

стимулированными процессами в облучаемом слое и ЭСР первого типа. В экспериментах многократно повторяющиеся разряды через отдельные микровыступы сопровождались выбросом плазмы в окружающее пространство и увеличением их размеров. При этом на поверхности стекла в местах осаждения положительно заряженных компонентов плазмы появлялись новые центры роста микровыступов, через которые происходили разряды первого типа. На рисунке 11б показано, что в результате ЭСР вокруг микровыступа высотой 45 нм на расстоянии порядка 1.5 мкм образовались микровыступы высотой до 8 нм. Отметим, что при облучении образцов К-208 такие процессы не наблюдались.

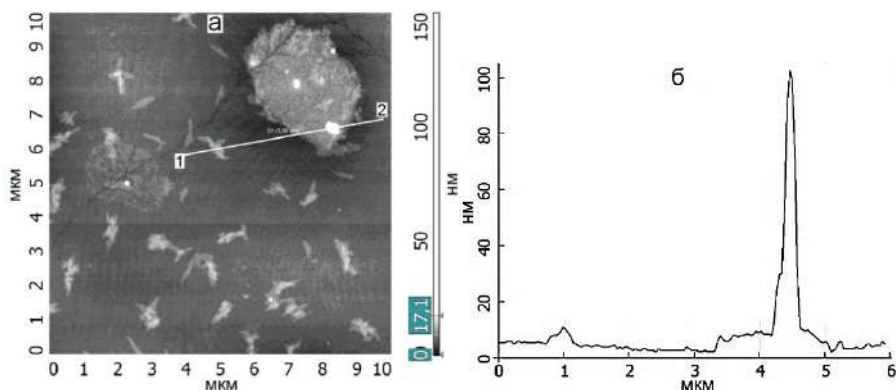


Рисунок 12 – АСМ-изображения образца СМГ: а и б – 2D-изображение участка 5×5 мкм и его сечение вдоль линии 1-2 соответственно

Изображения на рисунке 12 свидетельствуют о том, что увеличение плотности потока электронов до значения  $8,7 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  приводит к образованию отдельных микровыступов высотой около 120 нм и к образованию разрядных каналов – следов разрядов второго типа (рисунок 12а). В случае облучения стекла К-208 разряды второго типа начинали проявляться при меньших значениях  $\varphi_e = 6,0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

По мере дальнейшего увеличения плотности потока облучения растет как концентрация ионизованного газа у поверхности образца, так и его радиационная проводимость. Эти процессы стимулирует разряды второго типа, которые при наличии достаточной тангенциальной составляющей напряженности электрического поля развиваются вдоль облучаемой поверхности образца. На рисунке 13 показаны АСМ-изображения образца СМГ облученного флюенсом  $\Phi_e = 1.2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при  $\varphi_e = 1.12 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Представленные на этом рисунке результаты свидетельствуют о том, что при указанном режиме облучения преобладает второй тип ЭСР. Глубина разрядных каналов в стекле (рисунок 13 б) не превышает 2,5 нм, что в три раза меньше чем при облучении стекла К-208 в аналогичных условиях.

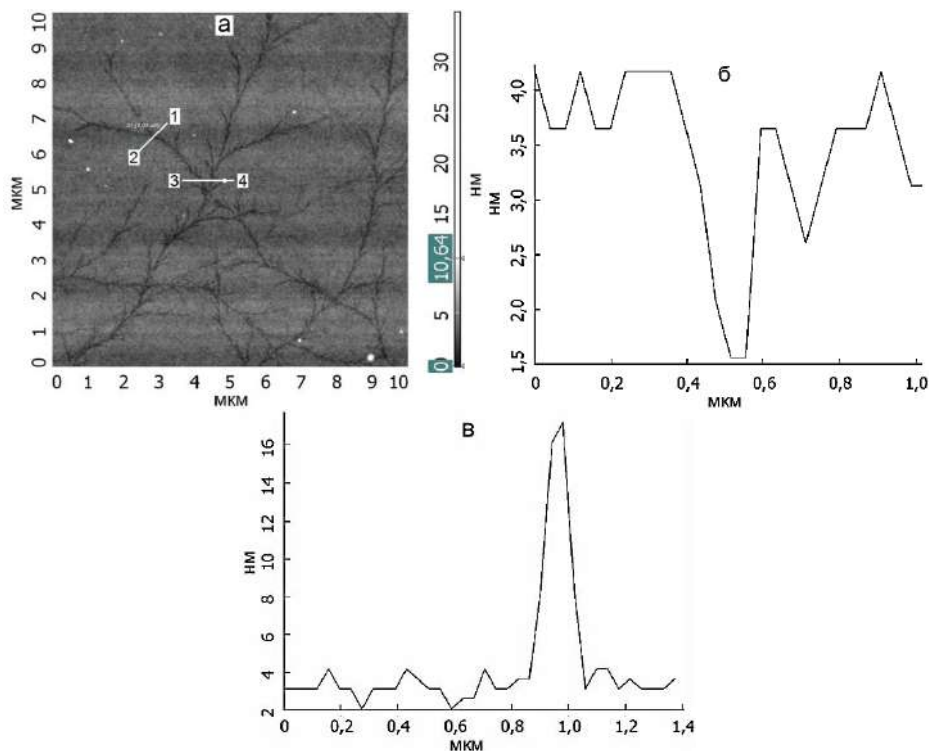


Рисунок 13 – АСМ-изображения образца СМГ: а – 2D-изображения кадра 10×10 мкм; б и в – сечения кадра (а) вдоль линии 1-2 и 3-4 соответственно

Анализа результатов исследований, полученных как в процессе, так и после облучения образцов К-208 и СМГ электронами с энергиями 30 и 40 кэВ, показал их качественное совпадение с данными полученными при энергии электронов 20 кэВ. Однако есть ряд количественных отличий. Во-первых, с увеличением энергии при одинаковых значениях остальных параметров облучения растет высота микровыступов, с которых происходят разряды первого типа. Например, при  $\varphi_e \approx 3,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $\Phi_e \approx 7,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  максимальная высота микровыступов при энергии электронов 20, 30 и 40 кэВ соответственно составила: для образцов стекла К-208 150, 190 и 250 мкм; для образцов стекла СМГ 45, 80 и 150 мкм. Во-вторых, с увеличением энергии электронов разряды второго типа начинают проявляться и становятся преобладающими при больших плотностях потока электронов. Так значения  $\varphi_e^*$  при облучении электронами с энергиями 20, 30 и 40 кэВ соответственно составили: для образцов К-208  $1,2 \times 10^{11}$ ,  $1,4 \times 10^{11}$  и  $2,0 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; для образцов СМГ  $1,3 \times 10^{11}$ ,  $1,7 \times 10^{11}$  и  $2,3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Необходимо отметить, что при перечисленных плотностях потока максимальные значения глубины разрядных каналов образующихся за счет разрядов второго типа в образцах К-208 и СМГ укладываются в диапазоны от 6 до 10 нм и от 1,5 до 3 нм, соответственно. Таким обра-



зом, каналы разрядов второго типа при облучении стекла CMG образуются в просветляющем покрытии из фторида магния.

### Заключение

При электронном облучении стекол CMG и К-208 наблюдались разряды типа стекло-ионизованная остаточная атмосфера вакуумной камеры и разряды, развивающиеся вдоль облучаемой поверхности, приводящие к структурным изменениям образцов. Сравнительный анализ результатов АСМ-исследований рельефов поверхностей облученных стекол показал, что:

1. Максимальная высота микровыступов образующихся на образцах облученных при  $\varphi_e \approx 3,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $\Phi_e \approx 7,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  электронами с энергиями 20, 30 и 40 кэВ: для стекла К-208 составила: 150 мкм, 190 мкм и 250 мкм; для стекла CMG 45 мкм, 80 мкм и 150 мкм. Увеличение  $\varphi_e$  в диапазоне от  $2 \times 10^{10}$  до  $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при  $\Phi_e \leq 10^{15} \text{ см}^{-2}$  для указанных выше значений  $E_e$  привело к росту размеров микровыступов при незначительном изменении их числа. По мере дальнейшего изменения  $\varphi_e$  от  $5 \times 10^{10}$  до  $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , наблюдалось увеличение числа микровыступов, однако уже при значениях  $\varphi_e \approx 7,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  их максимальная высота на поверхности К-208 и CMG не превышала соответственно 50 и 25 нм. При облучении стекла К-208 электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40$  кэВ разряды второго типа начинали проявляться при  $\varphi_e > 5 \times 10^{10}, 5,8 \times 10^{10}, 6,7 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Аналогичные значения  $\varphi_e$  для стекла CMG оказались в среднем на 30% выше.

2. Придельные значения плотности потока  $\varphi_e^*$ , начиная с которых наблюдались разряды только второго типа, при облучении электронами с энергиями  $E_e = 20$  кэВ,  $E_e = 30$  кэВ,  $E_e = 40$  кэВ составили соответственно: для К-208  $1,2 \times 10^{11}, 1,4 \times 10^{11}$  и  $2,0 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ; для CMG  $1,3 \times 10^{11}, 1,7 \times 10^{11}$  и  $2,3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

3. В экспериментах наблюдались следующие основные отличия в протекании разрядов в стеклах К-208 и CMG:

при облучении электронами с  $E_e = 10$  кэВ и значениях  $\varphi_e$  от  $2,0$  до  $9,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  ЭСР наблюдались только при облучении на образцах К-208;

количество микровыступов образующихся на единице поверхности образцов К-208 при облучении электронами с  $E_e = 20, 30$  и  $40$  кэВ значительно превысило их число на поверхности образцов CMG, облученных при тех же условиях;

разряды первого типа, происходящие через отдельные микровыступы на поверхности стекла CMG, стимулируют образование в их окрестностях новых микровыступов;

при варьировании значения  $\varphi_e$  в пределах от  $1,0 \times 10^{11}$  до  $2,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  максимальные значения глубины разрядных каналов в образцах К-208 и CMG изменялись в диапазоне от 2 до 10 нм и от 1,5 до 3,0 нм, соответственно.

Основные отличия в развитии разрядов в стеклах К-208 и CMG, по всей видимости, связаны с наличием у последнего просветляющего покрытия из фторида магния, большей проводимостью CMG и меньшей концентрацией

в нем дефектов и дислокаций по сравнению с К-208.

4. Для прогнозирования изменения функциональных свойств защитных и терморегулирующих покрытий высокоорбитальных спутников под действием условий эксплуатации необходимо:

провести экспериментальные исследования влияния совместного воздействия электронов и протонов средних энергий на эти материалы;

разработать методику ускоренных испытаний на совместное воздействие электронов и протонов средних энергий имитирующее действие магнитосферной плазмы;

разработать физико-математические модели и методику прогнозирования изменения свойств таких покрытий в условиях эксплуатации.

#### *Литература*

1. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики // М.: Энергоатомиздат. 1991. 240 с.
2. Бреховских С.М., Викторова Ю.Н., Ланда Л.М. Радиационные эффекты в стеклах // М.: Энергоиздат. 1982. 182 с.
3. Исаев В.Г., Озерский М.Д. Состояние и перспективы развития отечественной системы средств выведения космических аппаратов // Информационно-технологический вестник. 2014. № 2(02). 14 С.54-62.
4. Летин В.А., Еценко Л.С., Агеева Т.А., Суркова В.Ф. Защитные покрытия солнечных батарей космических аппаратов с большим ресурсом // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. 2008-2009. № 24-25. С. 3-13.
5. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Исследования электростатических разрядов при облучении стекла К-208 электронами // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 1. С. 88-93.
6. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Коровин С.Б. Электростатические разряды при раздельном, последовательном и совместном облучении стекла К-208 электронами и протонами // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 5. С. 5-11.
7. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С., Гаценко Л.С., Волкова Я.Б. Электроразрядные процессы при облучении стекол К-208 и СМГ электронами с энергией в диапазоне от 10 до 40 кэВ // Перспективные материалы. 2015. № 1. С. 22-30.
8. Хасаншин Р.Х., Надирадзе А.Б. Изменение оптических свойств функциональных поверхностей космических аппаратов при совместном воздействии электронов и ультрафиолета // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 3 С. 73-78.
9. Хасаншин Р.Х. Моделирование конденсации продуктов газовой выделенной при термовакуумном воздействии на материалы покрытий космических аппаратов // Космонавтика и Ракетостроение. 2003. вып. 4 (33). с.111-118.

10. Хасаншин Р.Х., Новиков Л.С. Изменения спектра пропускания стекла марки К-208 под действием ионизирующих излучений и молекулярных потоков // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 7. с. 83-87.
11. Эрнсбергер Ф.М. Прочность и упрочнение стекла // М.: Мир. 1969. 340 с.
12. Модель космоса. Научно-информационное издание // Под ред. Л.С. Новикова. Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов // М.: КДУ. 2007. 1144 с.
13. Hirokazu Masui, Electrostatic Discharge Plasma Propagation Speed on Solar Panel in Simulated Geosynchronous Environment / Hirokazu Masui, Kazuhiro Toyoda, Mengu Cho // IEEE Transaction on Plasma Science. 2008. vol. 36. pp. 2387-2394.
14. Kawakita S., Imaizumi M., Takahashi M., Matsuda S., Michizono S., Saito. Y., Influence of High Energy Electrons and Protons on Secondary Electron Emission of Cover Glasses for Space Solar Cells // XXth ISDEIV. 2002. pp. 187-203.
15. Khasanshin R.H., Novikov L.S. Structural changes of surfaces of spacecraft solar array protective glasses being irradiated by 20-keV electrons // Advances in Space Research. 2016. 57. pp. 2187-2195.
16. Ondrej Gedeon, Zemek Josef, Jurek Karel Changes in alkali-silicate glasses induced with electron irradiation // J. of Non-Crystalline Solids. 2008. vol.354. pp. 1169–1171.
17. Qingyan Wang and all, Radiation effects on optical and structural properties of GG17 Glasses induced by 170-keV electrons and protons, Wang and all // J. Appl. Phys. 2016. vol.119. pp. 023103.
18. Richard K. Brow, «Electron beam reduction of sodium-containing glass surfaces // J. of Non-Crystalline Solids. 1994. vol. 175. pp – 155-159.

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 01.06.2018  
Формат В5  
Печать офсетная. Усл.печ.л. 10,8  
Тираж 500 экз.  
Заказ № 73-14  
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