

№4⁺⁰
2018 [50]

ИЗВЕСТИЯ

научно-технический журнал
ИНСТИТУТА ИНЖЕНЕРНОЙ ФИЗИКИ



ЮБИЛЕЙНЫЙ НОМЕР ЖУРНАЛА



В НОМЕРЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2 Лапин Д.Г., Владыко В.Б., Кожурякин Д.А.

Реконструкция топологии интегральных микросхем методом фокусированного ионного пучка

9 Ермаков А.М., Ермакова О.Н., Шлектарев В.А.

Установка локальной генерации слабых переменных магнитных полей для биологических исследований

15 Хижняк Е.П., Маевский Е.И., Хижняк Л.Н., Иваницкий Г.Р., Смуров С.В.

Возможности адаптации миниатюрных инфракрасных камер нового поколения к требованиям медицинской диагностики

23 Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н., Волков Г.Г., Дунилин В.М., Смуров С.В.

Эффективное управление потоками тепловых нейтронов: направления применения

32 Мартынов С.В., Ерёмин Б.Г., Никитенко В.В., Бутранов А.С.

Методика применения теплового манекена для оценки теплофизических свойств эвакуационного средства

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

39 Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Зеленевский А.В., Шмырин Е.В., Дурнов А.С., Рыженков В.А.

Каскадное кодирование данных эквидистантными не двоичными и ортогональными двоичными кодами

43 Косяков Е.Н., Митряев Г.А.

Метод приоритетной диспетчеризации орбитального канального ресурса на основе немарковских приоритетных систем обслуживания

49 Чипига А.Ф., Шевченко В.А., Пашинцев В.П., Костюк Д.В.

Оценка энергетической скрытности низкочастотной системы спутниковой связи при произвольной кратности пространственно-разнесённого приема

56 Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Лягин М.А.

Методика оптимизации скоростей в ДКМВ каналах составного виртуального соединения при доставке многопакетных сообщений на сеансе связи

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

62 Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В.

Новые перспективы приложений универсальной системы утравивающихся периодов

67 Смирнов Д.В., Коротин А.М., Воронов Я.Р.

Общие положения методики построения систем контроля целостности ответственной информации в системах АЛС на базе широкополосного радиоканала

73 Мухин В.И., Самойлов С.В.

Автоматизированная информационная система прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов при воздействии ударных волн, генерируемых обычными средствами поражения

86 Смуров С.В., Масликов А.А., Волков Г.Г.

Идеи и методы генерации запутывания твердотельных спин-кубитов. Статистический ансамбль и матрица плотности

93 Попов А.Н., Тетерин Д.П., Атакищев О.И., Батраева И.А.

Матричный метод планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата переменной массы

99 Кукин Н.С., Васильев А.Н., Семёнов П.А., Смуров С.В., Каргин Н.И., Тарелкин С.А., Бормахов В.С., Трощев С.Ю., Голованов А.В., Трофимов С.Д., Корчевая И.О., Мурадова А.Р., Никитин А.К.

Создание одиночного NV-центра в заданном месте синтетического кристалла алмаза

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

102 Васильев В.В., Сосновский Е.Н.

Влияние эллипсности на массовые характеристики фюзеляжа

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

106 Смурова А.С.

К вопросу о механизме принудительного лицензирования как способе ограничения прав на интеллектуальную собственность в общественных интересах

109 СОБЫТИЯ

111 AUTHORS

113 ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

114 ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Научно-технический журнал

**ИЗВЕСТИЯ
Института инженерной физики
№4 (50) 2018**

Издается с апреля 2006 г. Выходит ежеквартально
ISSN 2073-8110

Включен в «Перечень ВАК»
по группам научных специальностей:
05.11.00. Приборостроение, метрология и
информационно-измерительные приборы и системы
05.12.00. Радиотехника и связь
05.13.00. Информатика, вычислительная техника
и управление

**Главный редактор,
председатель редакционного совета
и редакционной коллегии**

Алексей Николаевич Царьков

Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ»,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Редакционный совет

Геннадий Иванович Азаров

главный научный сотрудник ФГУП «16 ЦНИИИ МО РФ»
заслуженный деятель науки РФ, заслуженный
изобретатель РФ, лауреат Государственной
премии РФ, лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Владимирович Дворянкин

начальник департамента Государственной
корпорации «РОСТЕХ» ОАО КРЭТ,
доктор технических наук, профессор

Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»,
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор

Валерий Иванович Николаев

научный референт ОАО «Концерн «Созвездие»,
лауреат Государственной премии СССР,
лауреат премии Правительства РФ,
доктор технических наук, профессор

Владимир Георгиевич Редько

заместитель руководителя
Центра оптико-нейронных технологий
НИИ системных исследований РАН,
доктор физико-математических наук

Юрий Александрович Романенко

старший научный сотрудник
филиала ВА РВСН им. Петра Великого (г. Серпухов)
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Александр Викторович Синьговский

старший научный сотрудник
Европейского центра ядерных исследований (CERN),
Adjunct Assistant Professor
Университета Миннесоты (США),
кандидат физико-математических наук

Анатолий Васильевич Тодосийчук

главный советник аппарата Комитета ГД ФС РФ
по образованию и науке,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор экономических наук, профессор

Александр Павлович Царёв

заведующий кафедрой компьютерных архитектур
и телекоммуникаций Западно-поморского
технологического университета (Польша),
доктор технических наук, профессор

Игорь Анатольевич Шеремет

заместитель директора Российского фонда
фундаментальных исследований по науке,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор

Редакционная коллегия

Олег Николаевич Андрух
почетный работник науки и техники РФ,
кандидат технических наук, доцент

Борис Фёдорович Безродный
доктор технических наук, профессор

Сергей Борисович Беркович
почетный геодезист РФ
доктор технических наук, профессор

Владимир Эрнестович Бородай
лауреат Государственной премии СССР,
кандидат наук, старший научный сотрудник

Игорь Александрович Бугаков
заслуженный изобретатель РФ,
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Вадим Геннадьевич Грибунин
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук

Сергей Григорьевич Данилюк
доктор технических наук, профессор

Владимир Владимирович Зеленевский
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Николай Николаевич Казаков
член Союза писателей России
выпускающий редактор

Олег Павлович Кузнецов
кандидат технических наук, доцент

Александр Ильич Куприянов
доктор технических наук, профессор

Анатолий Викторович Мазин
доктор технических наук, доцент

Алексей Сергеевич Марков
доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Дмитрий Геннадьевич Митрофанов
заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор

Роман Леонидович Мусатов
кандидат технических наук
заместитель главного редактора

Игорь Николаевич Оков
доктор технических наук, профессор

Владимир Петрович Пашинцев
заслуженный работник высшей школы РФ,
доктор технических наук, профессор

Дмитрий Вячеславович Смирнов
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, доцент

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор

Валерий Николаевич Умников
доктор технических наук, профессор

Владимир Анатольевич Цимбал
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Сергей Николаевич Шиманов
почетный работник высшего профессионального
образования РФ, почетный радист РФ,
доктор технических наук, профессор



Николай Михайлович Емелин

главный научный сотрудник
ФГБНУ «Госметодцентр»

заслуженный деятель науки и техники
РФ

доктор технических наук, профессор
генерал-майор в отставке

член редакционного совета журнала
«Известия Института инженерной физики»

Уважаемые читатели, авторы, члены редакционного совета и редакционной коллегии!

У известного ученого в области методологии междисциплинарных исследований и системного исследования науки, доктора философских наук Э.М. Мирского есть очень точное, на мой взгляд, высказывание: «Анализ российских журналов – важный индикатор состояния исследований в России». Не буду замахиваться на все научные издания, сегодня мне хочется порассуждать об одном из них – нашем журнале «Известия ИИФ». Благо повод (и достаточно серьезный!) есть – перед вами юбилейный, 50-й, номер.

В первом номере главный редактор заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор А.Н. Царьков отметил: «... наша задача – объединить и систематизировать работу тех, кто заинтересован в развитии научных направлений: ученых, педагогов, изобретателей, молодых специалистов, аспирантов и студентов».

Как пишут в романах: «Шли годы». Неуклонно увеличивалось число исследований, которые проводит Институт, увеличивалось количество партнеров и коллег, с которыми Институт взаимодействует (это Петербургский ИЯФ им. Б.П. Константинова, ИТЭБ РАН, ВА РВСН им. Петра Великого, ГУ «Дубна», ВлГУ, МАИ, Государственный научно-методический центр, 4-й ЦНИИ МО РФ, ВКА им. А.Ф. Можайского, НИЯУ МИФИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и многие другие). Все новейшие разработки Института и его коллег в кратчайшие сроки находили отражение в научных статьях, публикуемых на страницах нашего журнала.

На сегодняшний день вышло в свет около 800 статей более 700 авторов. В общем рейтинге SCIENCE INDEX среди почти 8000 зарегистрированных российских журналов «Известия ИИФ» занимают 3142 место, по тематике «Электроника. Радиотехника» – 55, по тематике «Связь» – 27. Гарантией высокого качества научных публикаций в журнале служит система многоступенчатого рецензирования, а также состав редакционного совета и редакционной коллегии, включающий известных ученых из научно-исследовательских учреждений, вузов, корпораций и предприятий России, США, Польши.

О том, что журнал знают и ценят в научном мире, можно судить по ссылкам на статьи, опубликованным в «Известиях ИИФ», почти в двухстах изданиях, среди которых такие авторитетные, как «Труды НИИ радио», «Спецтехника и связь», «REDS: Телекоммуникационные устройства и системы», «Двойные технологии», «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», «Вопросы радиоэлектроники», «Информационные технологии в проектировании и производстве».

В 2008 году Решением Президиума ВАК журнал «Известия ИИФ» включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий», а после прохождения экспертизы в ВАК с 2015 года входит в «Перечень» по трем группам научных специальностей. А буквально на днях стало известно, что наш журнал получил положительные заключения Экспертных советов ВАК по всем четырем заявленным специальностям: 05.11.16. Информационно-измерительные и управляющие системы; 05.12.13. Системы, сети и устройства телекоммуникаций; 05.13.01. Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.19. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность. Это, безусловно, очень серьезное достижение!

Так что, возвращаясь к словам Э.М. Мирского, если судить по журналу «Известия ИИФ», исследования в России находятся на высоком уровне! Нам есть чем гордиться!

От всей души поздравляю с выходом юбилейного номера! Здоровья, счастья и дальнейших побед во славу российской науки! Уверен, у нашего журнала – большое будущее!

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК. 53.097

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ ФОКУСИРОВАННОГО ИОННОГО ПУЧКА

RECONSTRUCTION OF THE TOPOLOGY OF INTEGRATED CIRCUITS USING THE FOCUSED ION BEAM METHOD

Дмитрий Геннадьевич Лапин

аспирант
МИРЭА – Российский
технологический университет
Физико-технологический институт
Адрес: 119454, Москва,
пр-т Вернадского, д. 78
Тел.: 8(926)398-52-15
E-mail: box.f2016@yandex.ru

Владимир Борисович Владыко

доктор физико-математических наук, профессор
заведующий кафедрой
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8(916)932-63-48

Дмитрий Анатольевич Кожурякин

старший специалист управления АСУ и связи
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: 8-4967-35-13-71
E-mail: kozhuryakin4@iifmail.ru

Аннотация

В работе предложена технология реконструкции топологии интегральной микросхемы (ИМС) методом фокусированного ионного пучка (ФИП) для исправления ошибки в дефектном IP-блоке. Показана возможность изменения электрической схемы микросхемы без нарушения ее работоспособности. Продемонстрирована возможность получения доступа к топологии микросхемы со стороны кремниевой подложки полупроводникового чипа. Установлено влияние параметров ФИП системы на электрические свойства формируемых элементов топологии. Показана возможность равномерного травления межсоединений из поликристаллической меди.

Ключевые слова: интегральная микросхема, фокусированный ионный пучок, реконструкция топологии, осаждение материала из газовой фазы, ионно-лучевое травление меди.

Summary

In this paper, the technology of reconstruction of the topology of an integrated microcircuit (IC) by the method of a focused ion beam (FIB) is proposed to correct an error in a defective IP-block. The possibility of changing the circuit design of IC without disrupting its operability is shown. The possibility of gaining access to the topology of the IC from the side of the silicon substrate of a semiconductor chip is demonstrated. The effect of the FIB parameters on the electrical properties of the generated topology elements is determined. The possibility of uniform etching of the polycrystalline copper interconnection is shown.

Keywords: integrated microcircuit, focused ion beam, reconstruction of topology, deposition of material from the gas phase, ion-beam etching of copper.

Введение

Производители современных интегральных микросхем (ИМС) инвестируют значительные средства в развитие технологии отладки изделий микро- и нанoeлектроники на этапе тестового производства [1]. Исследования показывают, что порядка 60% ИМС, выпущенных в тестовой партии, имеют ошибки в электрической схеме

[2]. Исправление ошибки в электрической схеме предполагает изготовление новых литографических масок, что способствует увеличению финансовых затрат и замедлению процесса вывода новых ИМС на рынок [3]. Для решения подобных задач широко применяют технологию фокусированного ионного пучка (ФИП) [4], использование которой позволяет вносить изме-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

нение в трассировку межуровневых соединений дефектной ИМС без выпуска нового комплекта литографических масок [5].

Исследование процесса изменения топологии методом ФИП показало, что для сохранения работоспособности ИМС необходимо строго контролировать электрофизические параметры новых элементов топологии и точно прогнозировать результат ионно-лучевого распыления паразитных электрических связей.

В данной работе представлен анализ принципов функционирования технологии ФИП. Показано влияние параметров установки и пучка ионов на результат формирования новых и удаления паразитных элементов топологии. А также продемонстрирован процесс исправления электрической схемы дефектной ИМС методом ФИП.

Технология фокусированного ионного пучка

Технология ФИП реализуется в системах, позволяющих формировать тонкий зонд из высокоэнергетических ионов, с диаметром до единиц нанометров, и сканировать им по поверхности образца. В основе функций ФИП систем (физическое распыление материала подложки, ионно-стимулированное травление (далее – ИСТ) и осаждение материала) лежит процесс взаимодействия высокоэнергетических ионов с поверхностью твердого тела [6].

Ионно-лучевое распыление (рисунк 1а) – одна из технологических операций, реализуемая ФИП системой.

Важным параметром, характеризующим этот процесс, является коэффициент распыления материала, который определяется как отношение

количества распыленных атомов к числу падающих ионов [7]. Согласно теории Зигмунда, коэффициент распыления определяется как:

$$Y(E, \Theta, d) = \frac{0.42 F_d(E, \Theta, d)}{N U_0}, \quad (1)$$

где F_d – распределение по глубине поглощённой энергии;

d – глубина распыленной поверхности в точке попадания иона;

E – энергия иона;

Θ – угол падения;

N – плотность материала мишени;

U_0 – средняя энергия поверхностных связей.

Наряду с технологией физического распыления широко применяется ИСТ. При проведении ионно-стимулированного травления молекулы газа прекурсора подаются к поверхности образца, а пучок ионов возбуждает химическую реакцию между молекулами прекурсора и поверхностью образца. Продукты реакции находятся в газообразном состоянии и отводятся от поверхности образца посредством вакуумной системы [8] (рисунк 1б). Ключевым преимуществом ИСТ относительно физического распыления является значительное снижение эффекта переосаждения за счет удаления продуктов травления от поверхности образца.

Процесс осаждения материалов из газовой фазы, стимулированный пучком сфокусированных ионов, позволяет формировать на поверхности трехмерные структуры с высоким пространственным разрешением (<10нм) [9]. Процесс ионно-стимулированного осаждения основан на взаимодействии высокоэнергетических ионов пучка с молекулами газа прекурсора [10] (рисунк 1в). В результате молекулы прекурсора

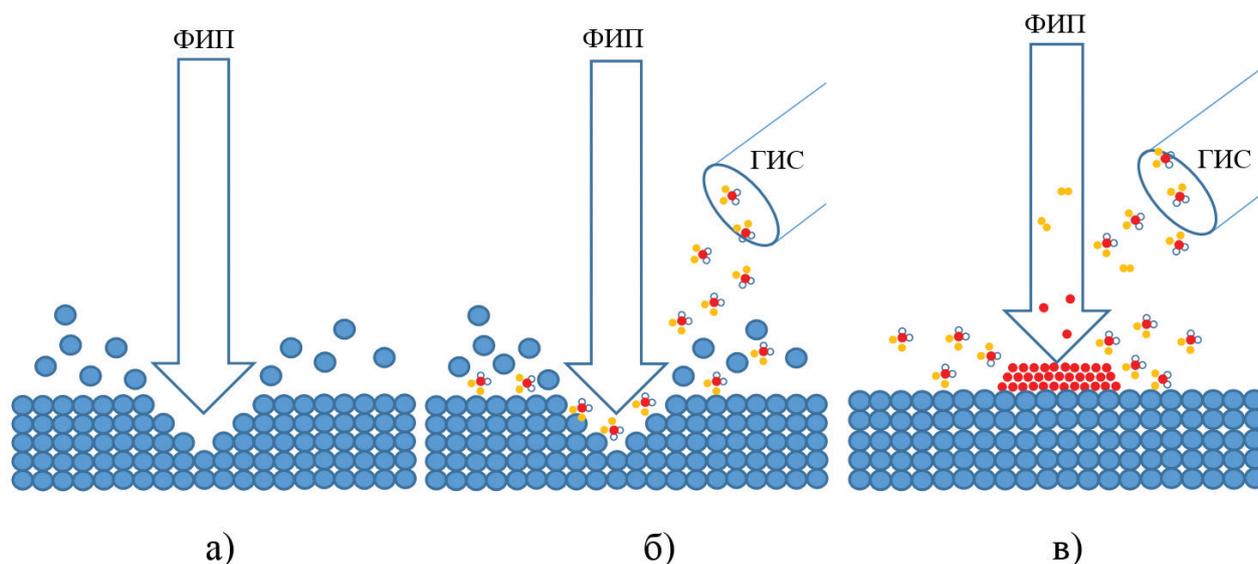


Рис. 1. Схема проведения технологии ФИП: а) физическое ионное распыление; б) ионно-стимулированное травление; в) ионно-стимулированное осаждение материала из газовой фазы.

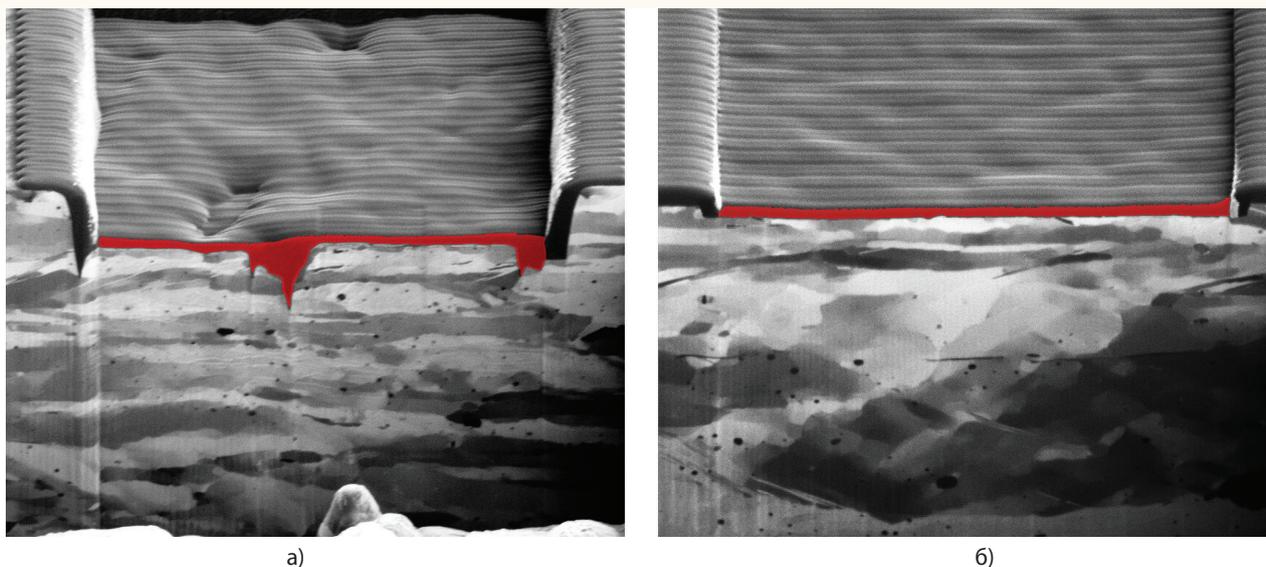


Рис. 2. Результат ионного распыления: а) поликристаллической меди; б) меди с аморфным приповерхностным слоем

ра делятся на молекулы осаждаемого материала и летучие продукты реакции. Газ-прекурсор адсорбируется из газовой фазы на растущий осажденный слой, и они подвергаются ионному распылению [11]. Для осаждения токопроводящих материалов используются гексакарбонил вольфрама ($W(CO)_6$) и триметил платины (IV) ($C_5H_4CH_3Pt(CH_3)_3$), а для осаждения изолятора – кислород с тетраэтоксидом (TEOS) [12]. Эти материалы обладают хорошим коэффициентом прилипания к поверхности и достаточным временем жизни вне газовой-инжекционной системы.

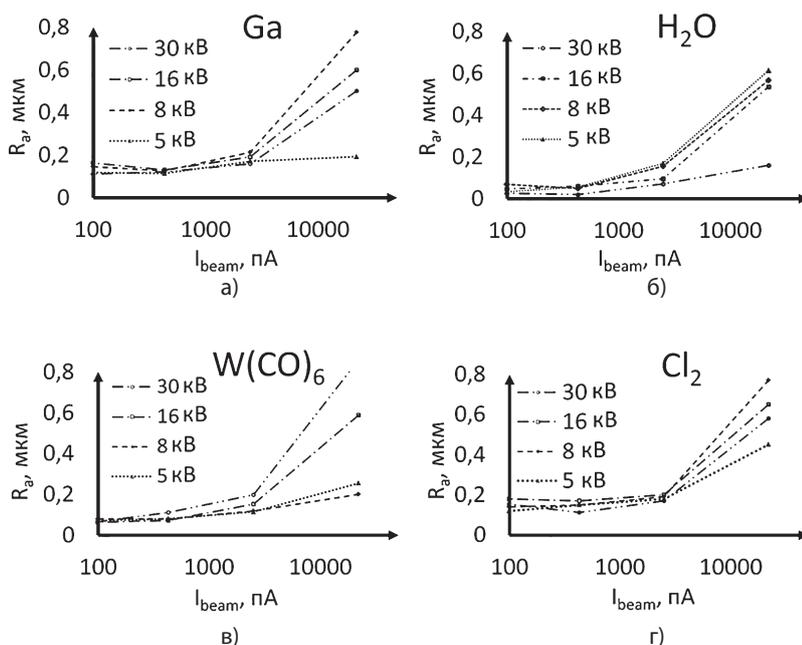


Рис. 3. Зависимость величины R_{sp} от ускоряющего напряжения и тока пучка ионов при: а) отсутствии прекурсора; б) прекурсор H_2O ; в) прекурсор $W(CO)_6$; г) прекурсор Cl_2

Особенности удаления паразитных элементов топологии

В большинстве современных ИМС используется система металлизации на основе меди, отличительной особенностью которой является ее поликристаллическая структура [13]. При падении под определенным углом пучка ионов на кристаллический материал, движение частиц направляется (канализуется) атомными цепочками или плоскостями [14]. Такой эффект позволяет ионам проникать глубже в структуру кристалла. По мере того как ионный пучок становится падающим в направлении канализования, коэффициент распыления уменьшается [15]. Основная причина уменьшения коэффициента распыления заключается в том, что при проявлении эффекта канализования, ионы испытывают в основном электронные потери энергии, в отличие от потерь в ядерной области, и способны проникнуть глубже в кристаллическую решетку. Следовательно, вероятность того, что ион вызовет каскад столкновений, который будет способствовать распылению приповерхностных атомов, будет снижаться. По причине неоднородности кристаллической структуры меди ионно-лучевое травление меди будет протекать неравномерно (рисунки 2а).

Стоит отметить, что при ионно-лучевом распылении аморфной меди эффект канализования не проявляется и, как следствие,

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

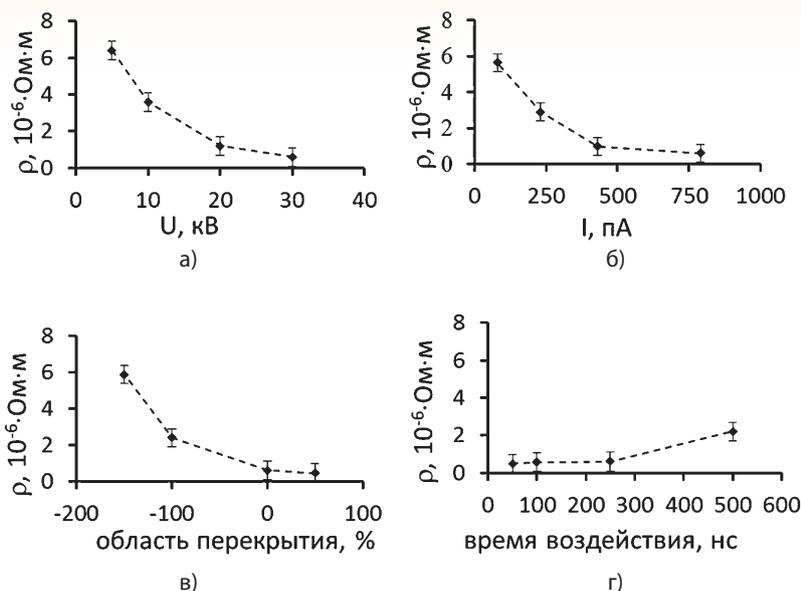


Рис. 4. Зависимость величины ρ от: а) энергии первичных ионов; б) тока пучка; в) области перекрытия пучка; г) времени воздействия в точке осаждаемого слоя пленки

распыление проходит с одинаковой скоростью по всей обрабатываемой поверхности (рисунк 2б). Одним из способов аморфизации приповерхностных слоев поликристаллической меди является применение газов-прекурсоров, которые при взаимодействии с поверхностью изменяют ее структуру и свойства.

В работе [16] установлена зависимость влияния параметров ФИП системы и типа используемого прекурсора (вода (H_2O), хлор (Cl_2) и гексакарбонил вольфрама ($W(CO)_6$)) на величину среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a (рисунк 3).

Анализ полученных результатов показал, что применение воды в качестве прекурсора позволяет проводить распыление медной межуровневой металлизации наиболее равномерно, практически исключая влияние эффекта каналирования.

Особенности формирования новых элементов топологии

Метод локального ионно-стимулированного осаждения материала из газовой фазы находит широкое применение при формировании токопроводящих элементов топологии ИМС на этапах производства тестовых образцов, отладки дизайна и диагностики.

Одним из недостатков метода локального ионно-стимулированного осаждения является высокое, по отношению к другим способам осаждения [17], удельное электрическое сопротивление (ρ) формируемых структур из вольфрама

[18]. Малая электрическая проводимость формируемых элементов топологии может привести к некорректным результатам производства тестовых образцов, отладки и диагностики ИМС.

В предыдущих исследованиях [19] установлено влияние режимов процесса локального ионно-стимулированного осаждения на величину ρ осаждаемых токопроводящих структур из вольфрама (рисунк 4).

Результаты исследования показали, что изменение параметров ионно-стимулированного осаждения вольфрама из газовой фазы позволяют варьировать величиной ρ токопроводящих структур в диапазоне $6.5-0.5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Таким образом, используя энергию

30 кВ, ток пучка 800 пА, область перекрытия 50% и время воздействия 500 нс можно добиться минимального значения удельного сопротивления новых элементов топологии.

Полученные результаты исследований имеют большую практическую ценность для решения задач по реконструкции топологии ИМС.

Исправление дефекта топологии ИМС методом ФИП

В данной работе продемонстрирована технология исправления ошибок в дефектном ИМС. ИМС выполнена по технологическому процессу 65 нм с 7-ю слоями медной межуровневой металлизации.

В ходе тестовых испытаний в исследуемой ИМС выявлена ошибка в работе демультиплексора (ДМ). Исследование временных диаграмм

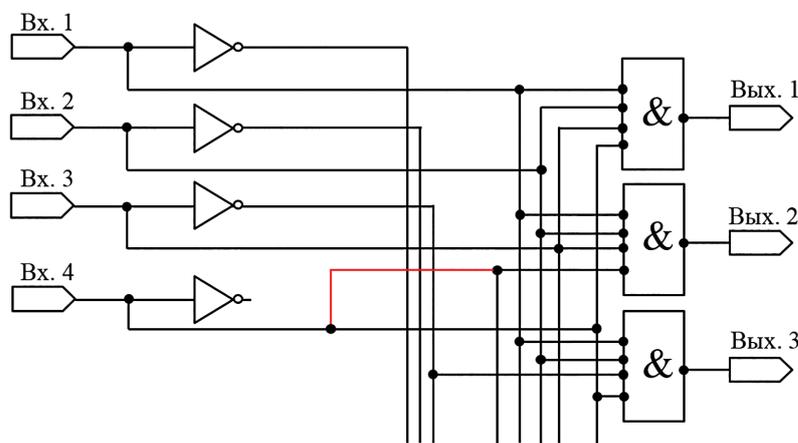


Рис. 5. Электрическая схема дефектного участка демультиплексора

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

дефектного блока показал, что старшие разряды демультимплексора всегда находятся в состоянии логического нуля. В результате анализа растрового изображения топологии исследуемого IP-блока установлено наличие паразитного электрического соединения на прямом входе демультимплексора и отсутствие нагрузки на инверсном входе. Ошибки топологии ИМС допущены на этапе проектирования дизайна электрической схемы (рисунк 5).

Устранение ошибок в топологии ИМС предполагает удаление дополнительной электрической связи 4-го входа ДМ и формирование нового соединения в инверсной цепи. Анализ топологии показал, что процедуру редактирования можно осуществить только со стороны кремниевой подложки.

Для получения доступа к топологии кристалла со стороны подложки разработано следующее технологическое решение (рисунк 6).

Доступ к кремниевому чипу ИМС производится при помощи локальной декапсуляции корпуса микросхемы методами жидкостного травления.

Используя технологию химико-механической полировки кремниевая подложка ИМС утоняется до толщины ≈ 20 мкм. Контроль толщины остаточного кремния осуществился методом оптической эллипсометрии с разрешающей способностью 100 нм.

После утонения кремниевой пластины исследуемая ИМС была помещена в камеру двулучевой системы для проведения технологических операций по редактированию топологии.

Для точного позиционирования ионного пучка GDS файл исследуемой топологии был совмещен с чипом микросхемы и локализован участок, необходимый для редактирования.

На участке 20×20 мкм с использованием ИСТ селективно удаляется кремний. Глубина распыления контролируется величиной вторичной

электронной эмиссии из области травления. Процедура была прервана при резком снижении эмиссии в следствии взаимодействия пучка с границей активных областей транзисторов (рисунк 7а). Энергия пучка ионов составила 30 кВ, ток – 1 нА, время травления – 20 минут.

Снизив ток пучка до 80 пА и избежав взаимодействия пучка с активными областями транзисторов выполнено травление участка ИМС 500×500 нм для получения доступа к паразитной электрической связи прямого выхода демультимплексора. Травление выполнено с использованием прекурсора XeF_2 для обеспечения высокой селективности скорости травления диэлектрика к скорости травления медной межуровневой металлизации. После получения доступа к участку межсоединения выполнено его удаление методом ИСТ с добавлением паров воды в качестве прекурсора. Для предотвращения агрессивного воздействия внешней окружающей среды и исключения возможности повторной коммутации отредактированного фрагмента технологическое отверстие заполняется диэлектриком, осажденным методом ФИП (рисунк 7б).

Для формирования нового межсоединения от инверсного входа демультимплексора к управляемой цепи использована методика локального ионно-лучевого осаждения вольфрама из газовой фазы. Используя полученные результаты исследований в области осаждения токопроводящих материалов [16] выбраны параметры ФИП системы и пучка ионов (таблица 1), при которых удельное сопротивление нового элемента топологии и величина области перераспыления будут минимальными.

Стоит отметить, что новое межсоединение выполнено поверх активных областей транзисторов (рисунк 7в). Для предотвращения воздействия ионного пучка на области легирования над активными областями осажден слой диэлектрика толщиной 1 мкм.

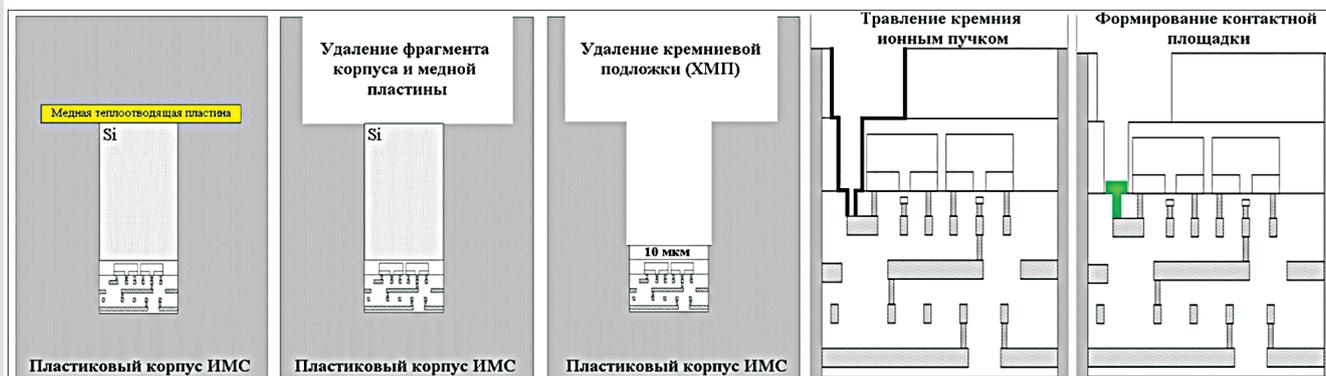


Рис. 6. Технология редактирования топологии со стороны кремниевой подложки

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

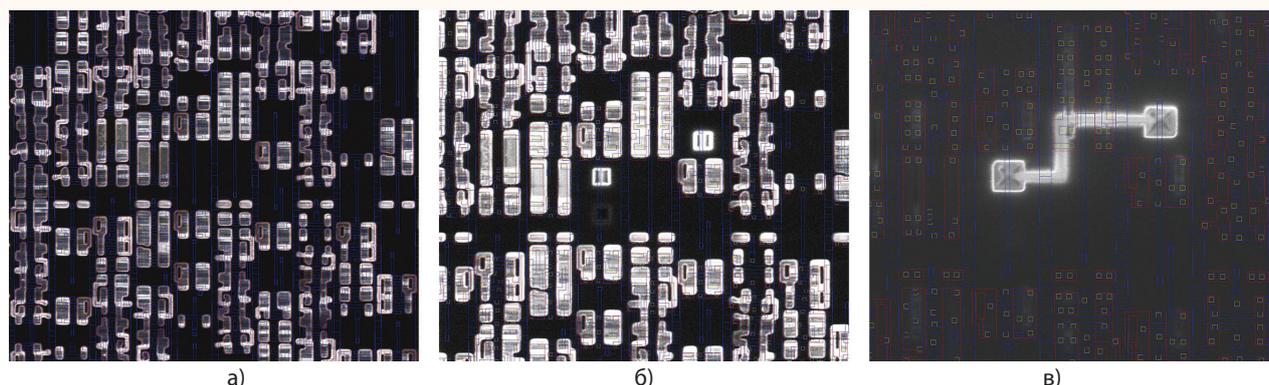


Рис. 7. Этапы реконструкции топологии ИМС методом ФИП

Таблица 1

Параметры формирования нового элемента
межсоединения

1	Ускоряющее напряжение	30 кВ
2	Ток пучка ионов	80 нА
3	Время экспонирования	120 сек
4	Область перекрытия	50%
5	Время экспонирования в дискретной точке	200 мксек
6	Тип источника	Ga+

В результате проведения процедуры реконструкции топологии была изменена электрическая схема дефектной ИМС (рисунк 8).

Контроль качества проведенных технологических операций выполнен путем проведения повторных тестовых испытаний, результаты которых показали отсутствие ошибок в работе демультимплексора.

Таким образом, в результате проведенных исследований, предложено технологическое решение, направленное на исправление ошибок в дефектном IP-блоке кремниевого чипа, выполненного по технологическому процессу 65 нм с 7-ю слоями медной межуровневой металлизации со стороны кремниевой подложки.

Выводы

Проведенные в работе исследования показали, что применение технологии ФИП для реконструкции топологии ИМС позволяет исправить ошибки, допущенные на этапе проектирования без производства новых литографических масок. Подобное технологическое решение позволяет снизить время и стоимость вывода нового изделия на рынок.

Литература

1. Malik T., Jain R. Novel Circuit Edit Solution for Bulk Copper Milling. //Proceedings of the 36th International Symposium for Testing and Failure Analysis. – 2010. – pp. 431-439.
2. Lundquist T., Thompson M. Circuit Edit at First Silicon. //Microelectronics Failure Analysis Desk Reference, Sixth Edition. – 2011. – pp. 594-606.
3. Mohiuddin T. Focused ion beam (FIB) circuit edit // Electronic Device Failure Analysis. – 2014. – V.16. – pp. 20–23.
4. Javed H., Saddiqi N., Islam M. Research article recent advancements in focused ion beam applications: a review // International Journal of Recent Scientific Research. 2014. № 5. pp. 123–127.
5. O'Donnell E., Scott D. Advanced Methodologies for Backside Circuit Edit / E. O'Donnell, D. Scott. // International Symposium for Testing and Failure Analysis. 2008. pp. 305-314.
6. Utke I., Moshkalev S., Russell P. Nanofabrication Using Focused Ion and Electron Beams // Oxford University Press. New York. 2012. p. 813.
7. Yao N. Focused Ion Beam Systems Basics and Applications. // Cambridge University Press. Cambridge. 2007. P. 395.

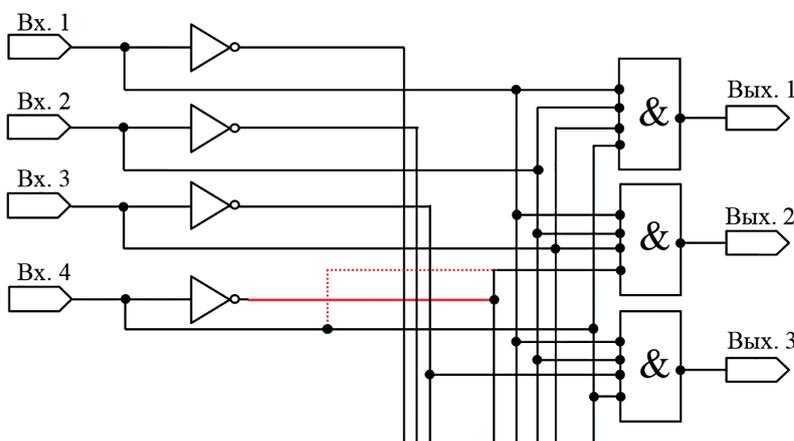
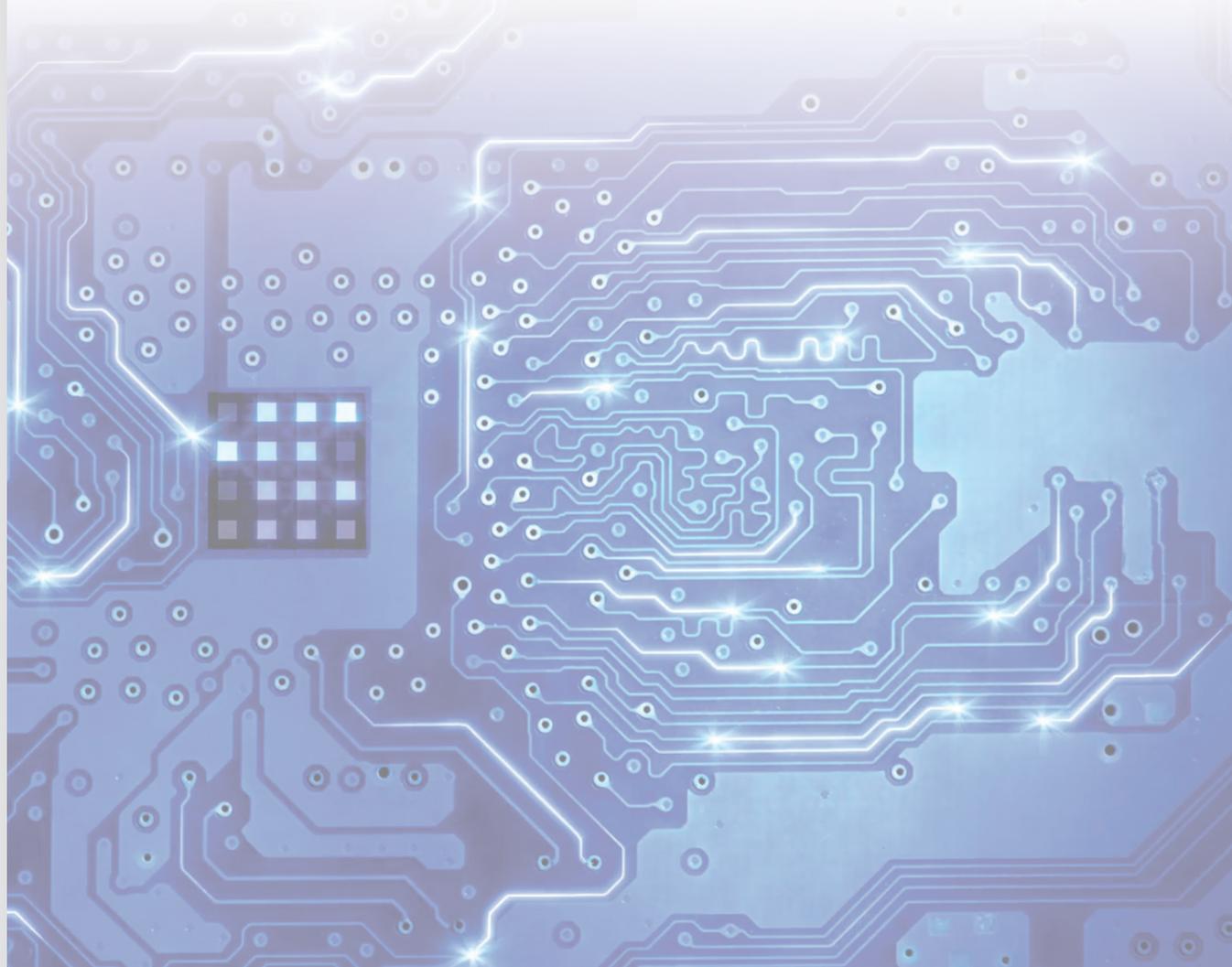


Рис. 8. Электрическая схема ИМС после проведения реконструкции топологии

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

8. Giannuzzi L., Stevie F. Introduction to Focused Ion Beam. Instrumentation, Theory, Techniques and Practic. // Springer. 2005. p. 357.
9. Fox D. et al. Nano-structuring, surface and bulk modification with a focused helium ion beam // Beilstein J. Nanotechnol. 2012. V.3 pp. 579–585.
10. Bassim N. et al. Recent advances in focused ion beam technology and applications // Materials Research Society. 2014. V.4. pp. 317–325.
11. Javed H., Saddiqi N., Islam M. Research article recent advancements in focused ion beam applications: a review // International Journal of Recent Scientific Research. 2014. № 5. pp. 123–127.
12. Rüdener F., et al. Quantitative model of FIB deposition // Advanced Engineering Materials. 2007. V.9. pp. 708–711.
13. J.David Casey Jr., Phaneuf M., Chandler C. Copper device editing: Strategy for focused ion beam milling of copper. Journal of Vacuum Science & Technology B 20, 2682. 2002. pp. 2682-2685.
14. C.Volkert, A.Minoret. Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining // Material Research Society. V.32. 2007. pp. 389-399.
15. Kempshall B.W., Schwarz S.M., Prenitzer B.I. Ion channeling effects on the focused ion beam milling of Cu. // J. Vac. Sci. Technol. B 19 3. 2001. pp. 749-754.
16. Лапин Д.Г., Овчинников И.С., Пахомов С.В. Ионно-стимулированное распыление поверхности поликристаллической меди высокоэнергетическими ионами галлия // Нано- и микросистемная техника, 2018. №9. С. 15-20.
17. Krusin-Elbaum L. et al. Effects of deposition methods on the temperature-dependent resistivity of tungsten films // Journal of Vacuum Science & Technology. 1986. V. 4(6). pp. 3106–3110.
18. DeMarco A., Melngailis J. Contact resistance of focused ion beam deposited platinum and tungsten films to silicon // Journal of Vacuum Science & Technology. 2001. V. 19(6). pp. 2543–2546.
19. Лапин Д.Г., Овчинников И.С. Получение наноразмерных проводников из вольфрама методом локального ионно-стимулированного осаждения из газовой фазы // «Наноматериалы и наноструктуры – XXI век», 2017. № 4. Т.8. С. 32-36.



ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 577.359, 57.043

УСТАНОВКА ЛОКАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ СЛАБЫХ ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ *

INSTALLATION OF LOCAL GENERATION OF WEAK ALTERNATING MAGNETIC FIELDS FOR BIOLOGICAL RESEARCH

Артем Михайлович Ермаков

*кандидат биологических наук
старший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: ao_ermakovy@rambler.ru*

Владимир Алексеевич Шлектарев

*инженер
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28*

Ольга Николаевна Ермакова

*кандидат биологических наук
научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7 (4967) 73-94-28
E-mail: beoluchi@yandex.ru*

Аннотация

В работе рассматривается конструкция и характеристики экспериментальной установки для локальной генерации слабого переменного синусоидального магнитного поля с помощью катушек Гельмгольца с заданными характеристиками амплитуды и частоты. Данная конструкция позволяет воспроизводимо получать переменные магнитные поля с заданной амплитудой и частотой и проводить биологические исследования в контролируемых стандартных условиях за счет наличия термостатируемых герметичных камер. С помощью данной установки была проведена серия экспериментов по исследованию воздействия комбинированных магнитных полей, настроенных по теории В.В. Леднева в режиме магнитного параметрического резонанса на определенные мишени – ионы кальция и калия. Была показана зависимость биологических эффектов от соотношения амплитуд постоянной и переменной компоненты и ее частоты, которая полностью соответствовала теоретическим предположениям. Технические решения и результаты проводимых биологических исследований с использованием разработанной установки позволят создать принципиально новые научно-обоснованные технологии направленной магнитотерапии и магнитотерапевтических установок.

Ключевые слова: экспериментальная установка, слабые переменные магнитные поля, теория В.В. Леднева, биологические эффекты переменных магнитных полей.

Summary

The design and characteristics of the experimental installation for local generation of a weak alternating sinusoidal magnetic field using Helmholtz coils with given amplitude and frequency characteristics are considered. This design makes it possible to reproducibly obtain alternating magnetic fields with a specified amplitude and frequency and conduct biological investigations in controlled standard conditions by the presence of thermostated sealed chambers. With the help of this device, a series of experiments was conducted to study the effect of combined magnetic fields tuned according to the theory of V.V. Lednev in the regime of magnetic parametric resonance for certain targets-calcium and potassium ions. The dependence of biological effects on the ratio of the amplitudes of a constant and a variable component and its frequency was completely consistent with theoretical assumptions. Technical solutions and results of conducted biological research using the developed installation will allow creating fundamentally new scientifically grounded technologies of directed magnetotherapy and magnetotherapeutic devices.

Keywords: experimental setup, weak alternating magnetic fields, theory V.V. Ledneva, biological effects of variable magnetic fields.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-015-00447 А.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Исследования биологических эффектов слабых переменных магнитных полей систематизировано проводятся с 70-х годов XX века и в настоящее время интерес к этим исследованиям не утихает [1]. Появляется все больше экспериментальных доказательств того, что слабые переменные магнитные поля оказывают существенное воздействие на ряд биологических процессов. В частности, они вызывают аномалии в развитии эмбрионов (тератогенные эффекты), ингибируют онкостатическое действие мелатонина и тамоксифена в клеточных культурах рака груди человека, изменяют активность ферментов, способны воздействовать на пролиферацию и дифференцировку клеток [2-5]. Наконец, результаты изучения влияния слабых магнитных полей на мозг крыс свидетельствуют о возможной роли переменных магнитных полей в стимуляции развития нейродегенеративных заболеваний (болезни Паркинсона, Альцгеймера) [6]. Эпидемиологические исследования также указывают на корреляцию между повышенным уровнем фоновых магнитных полей промышленных частот и риском возникновения нейродегенеративных заболеваний [7].

Уже первые исследователи биологической активности слабых переменных магнитных полей интуитивно понимали, что их биологическая активность зависит от неких резонансных параметров частоты поля [1, 8]. В работах Блэкмена и Либова было определено, что параметры постоянного геомагнитного поля могут определять положения частотных максимумов биологической активности слабых переменных магнитных полей, но у них не было четкого понимания зависимости наблюдаемых эффектов от настройки определенных параметров магнитного поля (в частности – соотношение амплитуда-частота) [9, 10]. Отсутствие таких представлений привело к тому, что, несмотря широкую представленность на рынке медицинской техники приборов для магнитотерапии, эффективность их применения до сих пор оценивается как мало предсказуемое по конечному эффекту [5].

В последние десятилетия благодаря исследованиям В. В. Леднева была создана теория магнитного параметрического резонанса (МПР), позволившая приблизиться к пониманию действия слабых и сверхслабых ($10^{-5} \div 10^{-9}$ Тл.) комбинированных магнитных полей на биологические объекты различного уровня организации [11, 12]. Согласно теории переменное магнитное поле на фоне постоянного поля Земли (по сути – комбинированное магнитное поле, КМП) в режиме МПР способно индуцировать биологические эффекты лишь при определенных («резонансных»)

значениях частоты переменной компоненты поля, равных «циклотронной» частоте прецессии иона (металла или любого иона) в активном центре фермента или ее субгармоникам. Значения биологически эффективных частот переменной компоненты поля для любого иона определяются выражением [8]:

$$f_n = \frac{1}{n} \frac{q}{2\pi m} B_{DC}, \quad (1)$$

где f_n – резонансная частота (в герцах);

q – заряд иона (в кулонах);

m – масса иона (килограмм);

B_{DC} – магнитная индукция постоянной компоненты КМП (Тесла);

n – целое число, равное 1, 2, 3....

Из этой формулы видно, что обязательным условием для проявления эффекта резонанса является наличие постоянного магнитного поля, без которого невозможна прецессия иона, от частоты которой и зависит резонансная частота настройки переменной компоненты. Согласно модели, величина эффекта (обозначим его символом p), индуцируемого КМП в режиме параметрического резонанса, т.е. при частотах переменной компоненты поля, близких к f_n , определяется квадратом функции Бесселя n -го порядка [13]:

$$p \cong J_n^2(2f_L/f) \frac{1}{1 + (nf - f_n)^2/\lambda^2}, \quad (2)$$

где f (Гц) – частота переменной компоненты поля;

f_L (Гц) – частота Лармора, соответствующая пику амплитуды переменной компоненты поля;

λ (сек⁻¹) – полуширина (на половине высоты) пика частотной зависимости ответа биосистемы на воздействие КМП, при этом $\lambda = k/2n$, где k (сек⁻¹) – константа скорости диссоциации данного иона из центра связывания в белке.

Второй множитель в правой части выражения (2) определяет зависимость величины биологического эффекта от частоты переменной компоненты КМП.

Наибольшая величина биологического эффекта достигается при точной настройке КМП на основную, или «циклотронную», частоту для конкретного иона, т.е. при $n=1$ и, соответственно, $f=f_1$. В этом случае (2) сводится к простому выражению:

$$p = J_1^2(2f_L/f) = J_1^2(B_{AC}/B_{DC}), \quad (3)$$

которое принимает максимальное значение при $B_{AC}/B_{DC} = 1.84$.

Исходя из теории магнитного параметрического резонанса, КМП может быть настроено на резонанс для ионов кальция и некоторых других не координационно связанных, а подвижных ионов, находящихся в активных центрах

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ферментов. К таким ионам относятся Mg^{2+} и K^+ . Например для ионов кальция, при величине постоянного магнитного поля Земли 38 мкТл, согласно формулам 1 и 3, резонансные настройки амплитуды и частоты переменной компоненты поля будут следующими (Ca^{2+} -КМП): $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC}=29$ Гц. Для ионов калия (K^+ -КМП) – $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC}=15$ Гц.

Представления, развитые В.В. Ледневым, дали возможность в дальнейших исследованиях выбирать конкретные частотно-амплитудные характеристики слабого низкочастотного переменного магнитного поля и адаптировать их к соответствующему объекту для решения задач направленного воздействия на биологические процессы [14], в том числе на рост растений [13], метаморфоз насекомых [15] и скорость регенерации планарий [13]. Во всех случаях было экспериментально доказано, что максимальный ответ на воздействие комбинированных магнитных полей наблюдался при соотношении $B_{AC}/B_{DC}=1.84$, а при соотношениях $B_{AC}/B_{DC}=0.0$ и 3.4 величина биоэффекта приближалась к нулю.

Ранее в наших исследованиях применялись катушки Гельмгольца, на которые подавалось переменное напряжение, создаваемое стандартным генератором. Это создавало ряд проблем при настройке параметров переменного магнитного поля (часто даже современные генераторы не могли задать необходимую форму сигнала) и его контроля (например, за счет развития собственной индуктивности на высоких частотах). Вторая проблема – невозможность создания специальных условий, например, для культивирования клеток млекопитающих и человека.

Поэтому при содействии Института инженерной физики нами была разработана конструкция исследовательской установки для генерации переменного магнитного поля и изучения его биологических свойств, которая позволила решить данные проблемы и выполнять исследования на новом экспериментальном уровне.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка для создания локального переменного синусоидального магнитного поля с заданными частотно-амплитудными характеристиками предназначена для исследований в области биологической активности слабых магнитных полей и разработки магнитотерапевтических технологий.

Предельные параметры создаваемого магнитного поля по частоте – от 1 Гц до 10000 Гц и амплитуде – от 1 пТл до 100 мкТл. Магнитное поле (МП) создается с помощью катушек Гельмгольца, в центре которых располагается термо-

стилируемая камера (рисунки 1а и б). В ней возможно экспонирование в магнитном поле биологических объектов. Каркас катушек и камеры, выполнены из немагнитизирующегося материала – органического стекла. Внутри камеры располагается термодатчик, контролирующий температуру внутри камеры и регулирующий температуру теплоносителя в теплообменном контуре. В крышке камеры располагаются трубки подачи газа (в частности смеси воздуха и CO_2) для создания оптимальной газовой атмосферы при культивировании клеток. Аналогичная камера расположена вне действия магнитного поля и служит для экспонирования контрольных образцов (рисунок 1г).

Подача переменного тока на обмотку контура катушек Гельмгольца с заданной частотой и напряжением осуществляется цифровым генератором (рисунок 1в). Генератор оснащен модулем обратной связи с катушками Гельмгольца, контролирует силу тока и компенсирует развиваемую на высоких частотах индуктивность. В одном корпусе с генератором расположены модуль управления температурой теплоносителя в термостате и модуль, позволяющий определять наведенную индуктивность из внешнего источника (для контроля уровня магнитного шума). Настройка частоты и амплитуды подаваемого магнитного поля производится с помощью кнопок управления на корпусе генератора и контролируется на информационном LED табло (рисунок 1в). Параметры генерируемого магнитного поля калибруются с помощью высокочувствительного магнитометра путем введения поправочных коэффициентов в режиме калибровки генератора.

Блок питания генератора вынесен за пределы экспериментальной зоны для минимизации создаваемых блоком электромагнитных помех (рисунок 1д). Термостатирование контрольной и экспериментальной камер для биологических объектов осуществляется с помощью водяного термостата (рисунок 1е).

Примеры проведенных работ с использованием разработанной установки

Исследование влияния слабых переменных магнитных полей на регенерацию плоских червей планарий. В ранее опубликованной нами работе [16] регенерирующие плоские черви (рисунок 3а) помещались в экспериментальную (в центре катушек Гельмгольца) и контрольную камеру. Планарии регенерировали в течение 3-х суток, далее производили фотографирование червей под бинокулярным микроскопом и анализ полученных изображений. С помощью раз-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

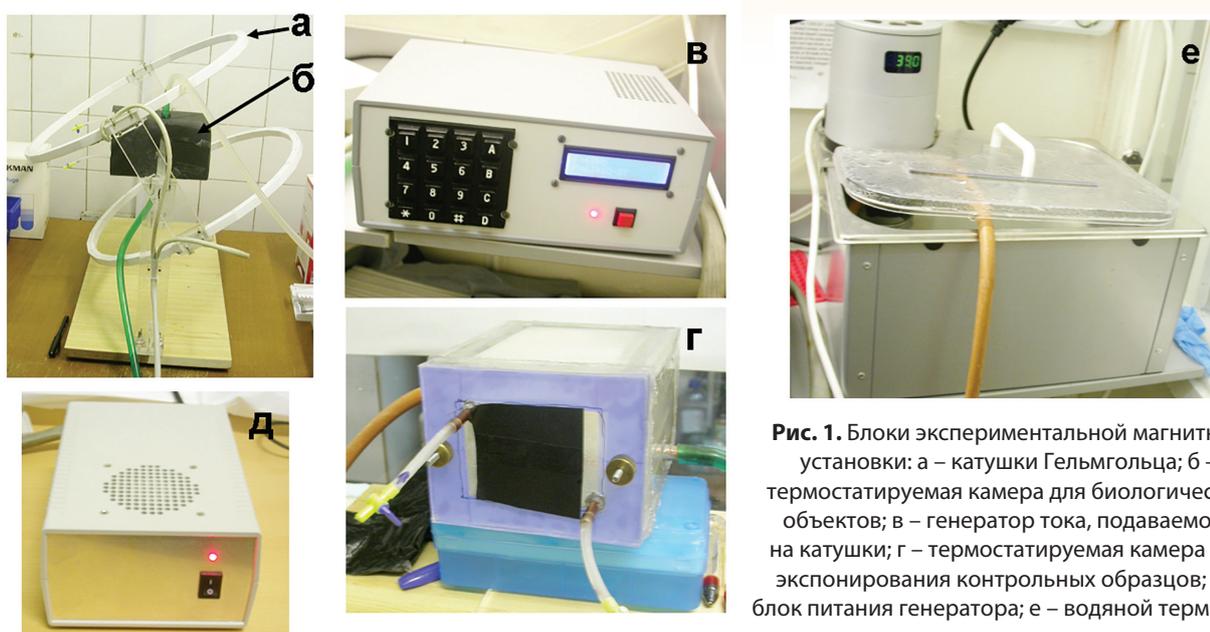


Рис. 1. Блоки экспериментальной магнитной установки: а – катушки Гельмгольца; б – термостатируемая камера для биологических объектов; в – генератор тока, подаваемого на катушки; г – термостатируемая камера для экспонирования контрольных образцов; д – блок питания генератора; е – водяной термостат

работанной установки было показано, что слабые магнитные поля в режиме МПР для ионов кальция (Ca^{2+} -КМП – $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC}=29$ Гц) стимулируют регенерацию головы планарий за счет активации специфичных генов и стимуляции пролиферации стволовых клеток - необластов, и напротив, магнитное поле настроенное на ионы калия (K^+ -КМП – $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC}=15$ Гц) замедляло регенерацию вследствие подавления транскрипции генов и пролиферации необластов (рисунок 2).

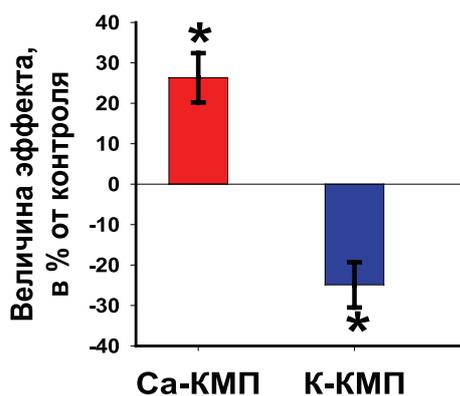


Рис. 2. Изменения скорости роста головной бластемы планарий *S. mediterranea* при экспонировании в Ca^{2+} -КМП ($f_{AC}=29$ Гц) (А) и в K^+ -КМП ($f_{AC}=15$ Гц) (Б) в течение 3-х дней. Параметры КМП: $B_{DC}=38$ мкТл, $B_{AC}=70$ мкТл. * $p<0,001$ [16]

Исследование влияния слабых переменных магнитных полей на рост и экспрессию генов культивируемых стволовых и трансформированных клеток

человека. В нашем исследовании [17] в обеих камерах были созданы одинаковые благоприятные условия (влажность 90%, температура 37°C, концентрация CO_2 5 %) для культивирования клеток человека (рис. 2, б). Нами было продемонстрировано, что слабое комбинированное магнитное поле, настроенное в режиме МПР на ионы кальция, не влияло на рост стволовых клеток, хотя вызывало изменения в уровне экспрессии генов (магнитное поле ускоряло процесс дифференцировки клеток в остеогенном направлении). В быстрорастущих трансформированных (раковых) клетках человека линий MNNG/HOS при экспозиции в слабом комбинированном магнитном поле активировалась экспрессия генов дифференцировки, некроза и апоптоза без изменения скорости роста клеток.

Результаты исследований, полученные на уровне планарий и культивируемых клеток человека, свидетельствуют о возможности с помощью КМП в режиме МПР направленного неинвазивного управления пролиферацией, дифференцировкой и регенерацией.

Полученные данные создают задел для научно-обоснованного применения магнитотерапии в регенеративной медицине для ускорения заживления ран, регенерации тканей и органов, регуляции дифференцировки стволовых клеток. Напротив, замедление пролиферации и увеличение дифференцировочного потенциала раковых клеток с помощью КМП демонстрирует возможность использования биологических свойств магнитного поля в онкотерапии для торможения роста опухолевых клеток и новообразований.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

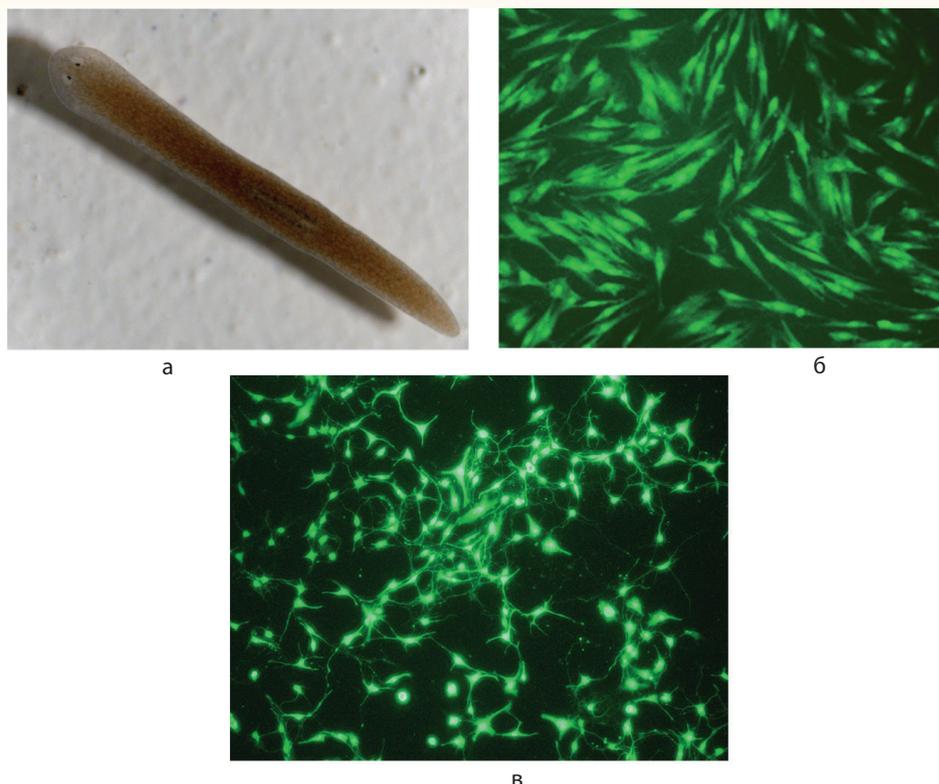


Рис. 3. Биологические объекты, которые исследовались в экспериментальной установке для создания слабых переменных магнитных полей.
а – плоские черви-планарии (*Schmidtea mediterranea*), б – культура стволовых клеток человека, в – культура нейронов гиппокампа крыс

Исследования влияния слабых переменных магнитных полей на рост нейритов в культуре нейронов гиппокампа новорожденных крыс. В новой оригинальной работе была применена возможность культивирования клеток в присутствии магнитного поля, в частности культивировали нейроны гиппокампа новорожденных крыс (рисунк 3 в). Результаты исследования влияния на рост нейрональных отростков КМП, настроенного в режиме МПР для ионов кальция представлены на рисунке 4. При экспонировании культуры клеток в Са-КМП размер нейритов уже на первые сутки культивирования был в среднем на 35% ($p < 0,001$) больше, чем в контроле. Тенденция к ускоренному росту сохранялась и в последующие 2 и 3 сутки экспонирования культуры клеток в КМП, но величина эффекта была несколько ниже и длина нейритов в экспериментальной группе была больше контрольных значений на 20% ($p < 0,001$) и 17% ($p < 0,001$). Следует отметить, что скорость роста нейритов в стандартном CO_2 инкубаторе и в контрольной

камере установки была одинаковой. Этот факт может служить доказательством того, что условия культивирования нейронов в условиях эксперимента соответствуют условиям стандартного инкубатора для культивирования клеток. Анализ жизнеспособности и метаболической активности нейронов не выявил существенных отличий между контрольными и экспериментальными группами. Нейроны обладали нормальной жизнеспособностью и в культуре практически отсутствовали мертвые клетки.

При экспонировании культуры нейронов в КМП, настроенном на параметрический резонанс для ионов калия (К-КМП) наблюдалось замедление скорости

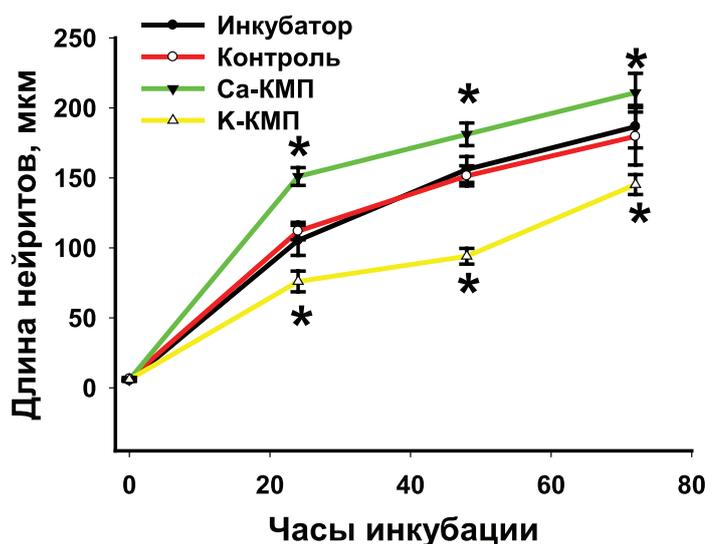


Рис. 4. Динамика роста нейритов культивируемых нейронов гиппокампа крысы в контролях (CO_2 – стандартный инкубатор и контрольная камера установки) и при воздействии комбинированного магнитного поля, настроенного в режиме магнитного параметрического резонанса для ионов кальция (Са-КМП) - $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC} = 29$ Гц и для ионов калия (К-КМП) - $B_{AC}=70$ мкТл, $f_{AC} = 15$ Гц, в обоих случаях $B_{DC}=38$ мкТл и $B_{AC}/B_{DC}=1,84$. * $p < 0,001$

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

роста нейритов (рисунк 4). Размер нейрональных отростков на первые сутки культивирования был в среднем на 30 % меньше, чем в контроле ($p < 0,001$). Замедленный рост нейритов сохранялся в последующие 2 и 3 сутки экспонирования культуры клеток в КМП (на 2-сутки эффект ингибирования составлял 40% ($p < 0,001$), а на 3-е сутки – 21 % ($p < 0,001$)). Анализ жизнеспособности и метаболической активности нейронов не выявил существенных отличий между контрольными и экспериментальными группами.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность ускорения или замедления скорости роста нейритов (аксонов и дендритов) при экспозиции культивируемых нервных клеток в магнитном поле, настроенном в режиме МПР на ионы кальция или калия соответственно. Результаты данных исследований могут быть использованы в разработке новых технологий магнитотерапии для ускорения реиннервации поврежденных тканей, восстановления поврежденных нервных волокон и нервных клеток при различных повреждениях нервной ткани.

Заключение

С помощью разработанной экспериментальной установки на различных биологических объектах удалось получить воспроизводимые результаты и показать биологическую эффективность слабых переменных магнитных полей, настроенных в режиме магнитного параметрического резонанса на определенные мишени в соответствии с теорией В. В. Леднева. Найденные технические решения и результаты проводимых биологических исследований позволят разработать научно-обоснованные технологии направленной магнитотерапии и магнитотерапевтических установок для применения в регенеративной и восстановительной медицине.

Литература

1. Bawin S. M., Adey W. R. Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency // Proc Natl Acad Sci U S A., 1976. Vol. 73(6). P. 1999-2003.
2. Bouwens M., de Kleijn S., Ferwerda G., Cuppen J. J., Savelkoul H. F., Kemenade B. M. Low-frequency electromagnetic fields do not alter responses of inflammatory genes and proteins in human monocytes and immune cell lines // Bioelectromagnetics, 2012. Vol. 33(3). P. 226-37
3. Halgamuge M. N. Critical time delay of the pineal melatonin rhythm in humans due to weak electromagnetic exposure // Indian J Biochem Biophys, 2013. Vol. 50(4). P. 259-65.
4. Kaszuba-Zwońska J., Gremba J., Gałdzińska-Calik

B., Wójcik-Piotrowicz K., Thor P. J. Electromagnetic field induced biological effects in humans // Przegl Lek, 2015. Vol. 72(11). P. 636-41.

5. Markov M. XXIst century magnetotherapy // Electromagnetic biology and medicine, 2015. Vol. 34(3). P. 190-196.
6. Sandyk R. The effects of external picotesla range magnetic fields on the EEG in Parkinson's disease: a follow up study // Int J Neurosci., 1994. Vol. 76(3-4). P. 227-229.
7. Karipidis K. K., Martin L. G. Pilot Study of Residential Power Frequency Magnetic Fields in Melbourne // ARPANSA Technical Report, 2005. No. 142.
8. Эйди У. Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань // ТИИЭР, 1980. Т. 68 (1). С. 140-147.
9. Blackman C. F., Benane S. G., Kinney L. S., Joines W. T., House D. E. Effects of ELF fields on calcium-ion efflux from brain tissue in vitro // Radiation research, 1982. Vol. 92(3). P. 510-520.
10. Liboff A. R. Geomagnetic cyclotron resonance in living cells // Journal of Biological Physics, 1985. Vol. 13(4). P. 99-102.
11. Lednev V. V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems // Bioelectromagnetics, 1991. Vol. 12(2). P. 71-75.
12. Белова Н. А., Ермаков А. М., Знобищева А. В., Сребницкая Л. К., Леднев В. В. Влияние крайне слабых переменных магнитных полей на регенерацию планарий и гравитационную реакцию растений // Биофизика, 2010. Т. 55(4). С. 704-709.
13. Леднев В. В. Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей // Биофизика, 1996. Т. 41(1). С. 224-232.
14. Lednev V. V., Tiras Kh. P., Belova N. A., Ermakova O. N., and Ermakov A. M. Biological effect of extremely weak industrial-frequency magnetic fields // Biophysics, 2005. Vol. 50 (Suppl. 1). P. S157-S162.
15. Ермаков А. М., Леднев В. В. Влияние слабых комбинированных магнитных полей на метаморфоз жуков мучного хрущака *Tenebrio molitor* // Биофизика, 2010. Т. 55(4). С. 715-719
16. Ермаков А. М., Скавуляк А. Н., Ермакова О. Н. Исследование влияния слабых комбинированных магнитных полей на регенерацию, пролиферацию неопластов и экспрессию ран-индуцируемых генов у планарий // Биомедицинский журнал medline.ru, 2015. Т. 16. С. 1171-1183.
17. Ермаков А. М., Знобищева А. В., Ермакова О. Н., Попов А. Л., Юнусова А. К. Сравнительное исследование воздействия низкотемпературной аргоновой плазмы и слабых переменных магнитных полей на рост и экспрессию генов культивируемых стволовых и трансформированных клеток человека // Вестник новых медицинских технологий, 2016. Т. 23 (4). С. 24-32.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 616-073.65: 621.384.3: 621.397

ВОЗМОЖНОСТИ АДАПТАЦИИ МИНИАТЮРНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ КАМЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ К ТРЕБОВАНИЯМ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

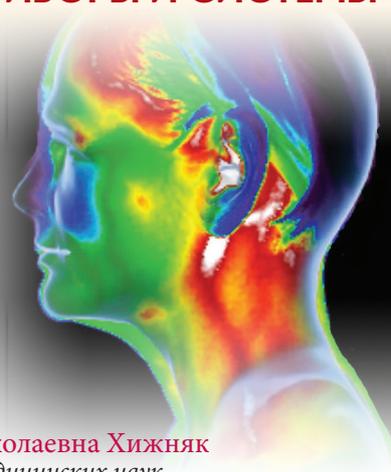
POSSIBILITIES OF ADAPTATION OF MINIATURE INFRARED CAMERAS OF THE NEW GENERATION TO THE REQUIREMENTS OF MEDICAL DIAGNOSTICS

Евгений Павлович Хижняк

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
ФГБУ науки «Институт теоретической и
экспериментальной биофизики» РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(495)632-78-69
E-mail: office@iteb.ru

Евгений Ильич Маевский

доктор медицинских наук, профессор
заместитель директора института –
заведующий лабораторией
Энергетики биологических систем
ФГБУ науки «Институт теоретической и
экспериментальной биофизики» РАН
начальник управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(916)147-11-10
E-mail: eim11@mail.ru



Лариса Николаевна Хижняк

кандидат медицинских наук
научный сотрудник
ФГБУ науки «Институт теоретической и
экспериментальной биофизики» РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(495)632-78-69
E-mail: office@iteb.ru

Генрих Романович Иваницкий

доктор физико-математических наук, профессор
научный руководитель
ФГБУ науки «Институт теоретической и
экспериментальной биофизики» РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(495)632-78-69 доб. 210
E-mail: office@iteb.ru

Сергей Владимирович Смуров

почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального
директора по научной работе –
главный конструктор МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svsv@mail.ru

Аннотация

Работа посвящена оценке возможности адаптации миниатюрных матричных инфракрасных (ИК) камер нового поколения для медицинской диагностики. Приведены результаты детального анализа реальных технических параметров миниатюрных ИК камер разных типов, по результатам которых даются рекомендации о возможности использования конкретных моделей в качестве приемного устройства ИК излучения в медицинских диагностических системах. Особое внимание уделено экспериментальной оценке диагностических возможностей миниатюрных ИК камер по сравнению с дорогостоящими, профессиональными ИК камерами, а также актуальности ранних методических рекомендаций. Показано, что температурная чувствительность и пространственная неравномерность миниатюрных ИК камер не превышают 0,10С, что достаточно для медицинской диагностики. Однако без дополнительных доработок ни одна из камер не обеспечивает необходимой точности температурных измерений. Реальная ошибка измерения абсолютных значений температур может достигать 4-50С в диапазоне от 20 до 400С. Для использования этих камер в медицинских целях необходимо улучшить точность регистрации температур до 0,10С, используя разные методы коррекции результатов температурных измерений. Приводятся результаты пробных диагностических обследований, проведенных с использованием лабораторного макета диагностической ИК системы и разработанного базового пакета программ первичной обработки ИК данных.

Ключевые слова: диагностика, инфракрасная термография, обработка изображений.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Summary

The article is devoted to assessing the possible adaptation of new generation of miniature FPA infrared cameras for medical diagnostics. The results of a detailed analysis of the real technical parameters of various types miniature IR cameras are given. Particular attention is paid to the experimental evaluation of the diagnostic capabilities of miniature IR cameras in comparison with professional IR cameras, as well as the relevance of early methodological recommendations. It is shown that the temperature sensitivity and spatial non-uniformity of miniature IR cameras do not exceed $0,1^{\circ}\text{C}$, which is sufficient for medical diagnostics. However, without additional modifications, none of the chambers provide the necessary accuracy of temperature measurements. The real error in the measurement of absolute temperatures can reach $4-5^{\circ}\text{C}$ in the range from 20 to 40°C . To use these cameras for medical purposes, it is necessary to apply the procedure for correcting the results of temperature measurements in order to improve the accuracy of temperature measurements to $0,1^{\circ}\text{C}$. The results of trial diagnostic examinations carried out using a laboratory prototype of the diagnostic IR system and the basic package of primary data processing are presented.

Keywords: diagnostics, infrared thermography, image processing.

Введение

Пространственное распределение температур на поверхности тела несет важную информацию о локализации патологических процессов, которые могут быть связаны с воспалительными процессами, сосудистыми заболеваниями, локальными нарушениями метаболизма и иннервации биологических тканей, развитием онкологических новообразований [2, 7, 17].

Инфракрасная (ИК) термография является наиболее совершенным методом дистанционной регистрации пространственного распределения температур. Этот метод диагностики абсолютно безопасен для человека, так как в его основе лежит принцип регистрации температурных распределений по собственному тепловому излучению объектов в ИК диапазоне длин волн. Поэтому он может без каких-либо ограничений использоваться в ходе профилактических обследований пациентов с целью раннего выявления патологических процессов [11-14, 20].

Инфракрасные камеры (тепловизоры) применяются в качестве диагностических инструментов в медицинской практике более 40 лет [3-4, 13, 15]. История применения ИК камер (тепловизоров) в медицине претерпела целый ряд противоречивых периодов. С появлением первого поколения ИК камер начался интенсивный период развития медицинского тепловидения, во время которого были выработаны основные методические рекомендации по их применению в медицине [1]. Однако технические параметры ИК камер были еще далеко несовершенны. В результате, отношение к медицинскому тепловидению были скептическими. В ряде западных стран стало превалировать мнение о недостаточной надежности данного метода диагностики. Основные причины недоверия были связаны в тот период с целым рядом причин: низким пространственным разрешением ИК камер, недостаточной чувствительностью, отсутствием обоснованных критериев диагностики, особенно – в отношении рака молочной железы.

С появлением высокочувствительных, матричных ИК систем высокого разрешения возродилась надежда на перспективность их применения в медицинской диагностике [2, 14, 16]. В рамках программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» был проведен цикл работ по выработке научно-обоснованных критериев диагностики воспалительных, сосудистых и онкологических заболеваний [7]. Решен вопрос о соотношении ИК термограмм и анатомических структур, расположенных на определенной глубине от поверхности кожи [9]. Накопленный в ходе клинической апробации опыт позволил сделать вывод о перспективности использования современных матричных ИК систем в медицинской диагностике [6, 8, 10-12].

Однако очень высокая стоимость охлаждаемых матричных ИК камер стала основной причиной, сдерживающей широкое применение метода ИК термографии в медицинской диагностике.

В последнее время появились миниатюрные ИК камеры, стоимость которых сравнима со стоимостью сотовых телефонов. Вычислительные мощности планшетных компьютеров и смартфонов, в комплексе с которыми могут работать ИК камеры указанных типов, вполне достаточны для установки более сложных программ обработки ИК изображений. Это позволяет создать полноценные медицинские диагностические ИК системы, которые могут применяться не только в медицинских учреждениях первичного звена (районных и сельских поликлиниках), но и в полевых условиях и машинах скорой помощи. В перспективе могут быть созданы персональные диагностические ИК системы, при этом для первичного обследования человеку не обязательно посещать поликлинику, зарегистрированные ИК термограммы могут быть переданы для анализа врачу с использованием средств телемедицины [10-12, 16].

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Достаточно часто можно услышать вопрос: «Какая разница между медицинской диагностической системой, основанной на методе ИК термографии, и обычным тепловизором? Может быть, вполне достаточно подключить миниатюрную ИК камеру нового поколения к смартфону».

Для ответа на этот вопрос необходимо дать четкое определение, что подразумевается под медицинской диагностической ИК системой. Если ставится задача просто увидеть, где на поверхности тела человека чуть теплее, а где – холоднее, да еще и раскрасить тепловую картину в разные цвета, то в этом случае такого примитивного решения вполне достаточно. Необходимо отметить, что такой подход к термовизионной диагностике до недавнего времени был широко распространен не только у дилетантов, но и у многих профессионалов, в том числе – на западе. Именно по этой причине метод ИК термографии был вновь дискредитирован, особенно, когда такой примитивный подход применялся при ранней диагностике рака молочной железы. И только в последние годы этот метод был реабилитирован, но уже при совершенно ином подходе к критериям диагностики [17-19].

Прежде всего, надо четко понимать, что ИК камера является всего лишь приемником ИК излучения в определенном спектральном диапазоне длин волн. Для более четкого понимания, уместно провести аналогию с ультразвуковым датчиком в аппарате ультразвуковой диагностики или приемником рентгеновского излучения в медицинском томографе.

Принципиальное отличие медицинской диагностической ИК системы заключается в том, что это не просто система визуализации ИК изображений (что позволяет сделать ИК камера, соединенная с монитором), а это измерительная система, оснащенная набором программных средств обработки ИК изображений [10-11, 14, 18]. Дело в том, что недорогие ИК камеры, основанные на неохлаждаемых матрицах ИК фотоприемников (микроболометрах), разрабатывались для визуализации температурных распределений, в основном – для военного применения. Именно поэтому такие камеры до недавнего времени не применялись в медицинской диагностике, а применялись дорогие охлаждаемые ИК камеры, обладающие измерительными возможностями [6].

При создании медицинской диагностической ИК системы с применением миниатюрных ИК камер необходимо их адаптировать к требованиям медицинской диагностики. Прежде всего, необходимо обеспечить возможность измерения абсолютных значений температур в разных

участках тела человека с достаточно высокой точностью, которую сами по себе миниатюрные ИК камеры обеспечить не могут, поскольку в них отсутствует система термостабилизации матрицы ИК фотоприемников, что порождает дрейф температурной чувствительности в 2-3°C и более. Решить данную задачу за счет какой-либо аппаратной модификации имеющихся в продаже ИК камер практически невозможно. Все процедуры коррекции ИК изображений могут быть выполнены только программным путем.

Сложность температурных измерений осложняется необходимостью вычисления истинных значений температур при неизвестных значениях излучательной способности различных участков тела человека [8, 11].

Для превращения миниатюрной ИК камеры в медицинскую диагностическую систему, необходим аппаратно-программный интерфейс, позволяющий проводить температурные измерения в любой из точек ИК изображения. Кроме того, необходим целый комплекс программных средств, позволяющий рассчитывать гистограммы температурных распределений по произвольно заданным областям тела человека, проводить нелинейную фильтрацию ИК изображений с учетом анатомических особенностей определенных участков тела, особенностей теплопроводности, глубины патологических процессов, влажности кожи.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была проведена экспериментальная оценка реальных технических параметров и диагностических возможностей современных миниатюрных матричных ИК камер разных типов, по результатам которых предстояло сделать вывод о возможности использования конкретной модели в качестве приемного устройства в медицинской диагностической системе. Апробированы миниатюрные ИК камеры четырех типов:

- «*Flir ONE Pro*» (США) с пространственным разрешением 160x120 (позволяет одновременно регистрировать видимое и инфракрасное изображение).

- «*Seek Thermal*» (США) с пространственным разрешением 206x156.

- «*Seek Thermal compact PRO*» с пространственным разрешением 320x240.

- «*Therm-App*» фирмы «*Orgal*» с пространственным разрешением 384x288.

ИК камера «*Seek Thermal compact PRO*» обеспечивает скорость регистрации 15 кадров в секунду, остальные три камеры 9 кадров в секунду.

Все ИК камеры совместимы с планшетными

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

компьютерами и смартфонами на базе операционной системы «Android» версии 4.3 и выше.

Проведены измерения реальной температурной чувствительности каждой ИК камеры (NEdT), равномерность регистрируемого температурного изображения и точность измерения абсолютных значений температур.

Измерения проведены с использованием образца типа «Черное тело», обеспечивающего температурную точность $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $10-100^{\circ}\text{C}$. Все ИК камеры тестировались в диапазоне температур, используемых при медицинской диагностике, от 20 до 40°C .

Измерения показали, что все протестированные ИК камеры обеспечивают чувствительность не хуже $0,08^{\circ}\text{C}$, что вполне достаточно для первичной диагностики. Однако в ходе исследований выяснилось, что реальные величины температурного эквивалента шума (NEdT) и температурной неравномерности по полю ИК изображения зависят от типа используемого смартфона или планшетного компьютера и могут достигать $0,6^{\circ}\text{C}$, что ограничивает перечень устройств обработки данных.

Ни одна из камер не обеспечивает необходимой для медицинской диагностики точности измерения абсолютных значений температур. Реальная ошибка может достигать $4-5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 20 до 40°C .

В ИК камерах типа «*Flir ONE Pro*» и «*Seek Thermal*» отсутствует возможность фокусировки. ИК камера типа «*Flir ONE Pro*» имеет недостаточное пространственное разрешение для медицинской диагностики, поэтому эта камера в дальнейшем не рассматривалась в качестве кандидата для создания медицинских ИК систем. Камера типа «*Seek Thermal*» имеет минимально необходимое пространственное разрешение.

ИК камера типа «*Seek Thermal compact PRO*»

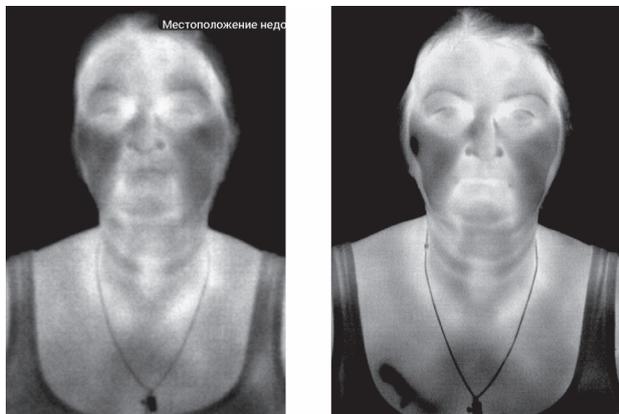


Рис.1. ИК термограммы лица человека, зарегистрированные ИК камерами типа «*Seek Thermal compact PRO*» (слева) и «*Therm-App*» (справа)

обеспечивает возможность фокусировки при достаточном пространственном разрешении. Камера типа «*Therm-App*» фирмы «*Orgal*» является лидером по реальным техническим параметрам среди всех протестированных ИК камер и, безусловно, лучшим кандидатом для медицинских диагностических систем. Однако, стоимость последней камеры в несколько раз выше предыдущей. Обе последние ИК камеры оснащаются базовым пакетом программ, обеспечивающим передачу данных на смартфон или планшетный компьютер, визуализацию температурных изображений на мониторе и регистрацию температурных изображений в памяти смартфона или планшетного компьютера в формате «*jprg*».

На *рисунке 1* приведены примеры ИК термограмм, зарегистрированные ИК камерами типа «*Seek Thermal compact PRO*» и «*Therm-App*» с использованием пакета программ регистрации ИК данных, которыми оснащаются эти камеры.

Следует отметить, что температурный портрет, зарегистрированный ИК камерой типа «*Seek Thermal compact PRO*», существенно уступает по четкости изображения температурному портрету, зарегистрированному ИК камерой типа «*Therm-App*», и такое различие не может быть объяснено разницей в пространственном разрешении двух данных ИК камер. Основная причина, скорее всего, связана с низким качеством оптики объектива ИК камеры типа «*Seek Thermal compact PRO*».

Для оценки реальных технических характеристик и диагностических возможностей двух последних ИК камер был разработан пакет программ, обеспечивающий первичную обработку ИК данных, включая: коррекцию результатов температурных измерений, построение температурных профилей по заданной оператором линии или контуру, расчет разностных значений температур для определенных участков тела.

На *рисунке 2* приведен пример обработки ИК термограммы образца типа «Черное тело», зарегистрированной с использованием ИК камеры типа «*Seek Thermal compact PRO*». Температура образца типа «Черное тело» равна 30°C . Регистрируется только часть поверхности образца типа «Черное тело», следовательно, все точки ИК термограммы должны иметь одинаковую температуру. Коррекция температурных измерений не применялась.

Аналогичные измерения, проведенные с использованием ИК камеры типа «*Therm-App*», показали, что температурная неравномерность по всему полю ИК термограмм не превышает $0,07^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $20-40^{\circ}\text{C}$.

Для оценки реальных диагностических воз-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

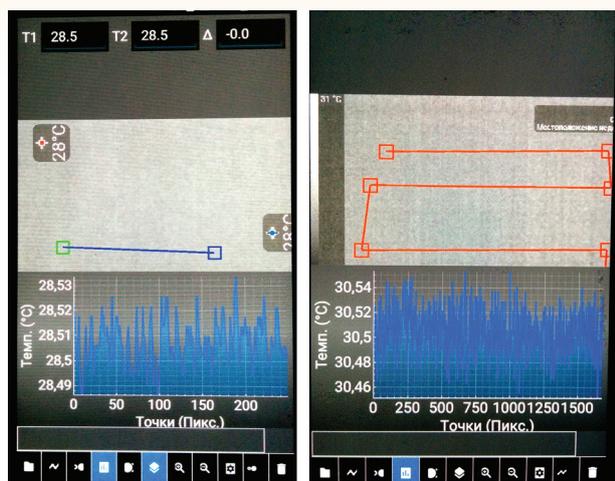


Рис.2. Температурные профили по обозначенным линиям. Сверху на рисунке слева: $T1$ – значение температуры в начальной точке линии, $T2$ – в конечной точке, $\Delta=T2-T1$. Температурная неравномерность по линии не превышает $0,04^{\circ}\text{C}$ (измеренная от пика до пика), а по контуру $0,08^{\circ}\text{C}$

можностей были проведены сравнительные исследования с синхронным использованием двух ИК камер: одной из перечисленных выше миниатюрных ИК камер и профессиональной ИК камеры на спектральный диапазон 8-12 мкм типа «Jade UC», Франция, с матрицей микроболометров размером 384x272 элемента. Температурный эквивалент шума камеры «Jade UC» не превышает $0,07^{\circ}\text{C}$ в режиме прямой регистрации при скорости 50 кадров в секунду. Эта камера на протяжении ряда лет успешно используется в медицинской диагностике. Обработка данных ИК изображений проводилась с помощью программы «ALTAIR».

На рисунке 3 приведены сравнительные термограммы пациентки, страдающей варикозным расширением вен в бедренной области левой ноги.

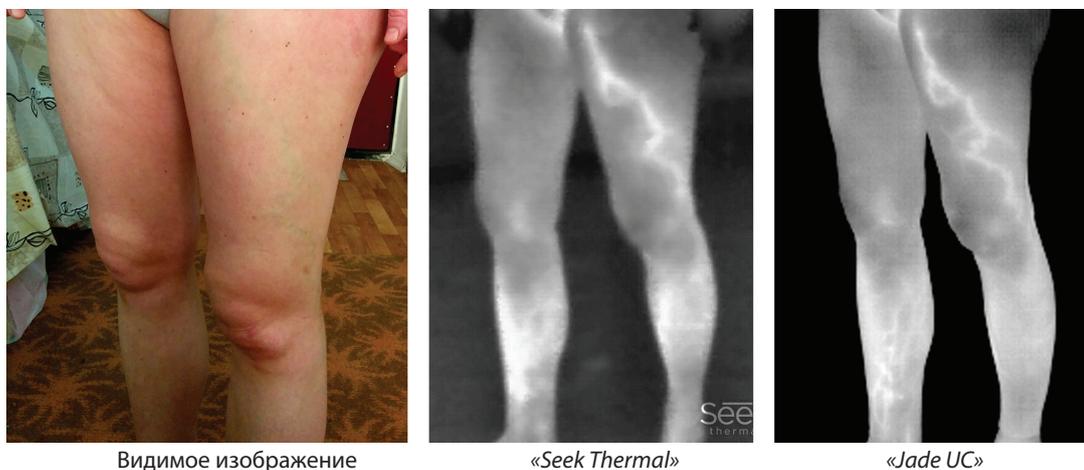


Рис. 3. Видимое изображение и сравнительные термограммы пациентки, страдающей варикозным расширением вен в бедренной области левой ноги

Обе ИК камеры позволяют достаточно четко выявлять пораженный сосуд в бедренной области левой ноги. Однако меньшее пространственное разрешение камеры типа «Seek Thermal» по сравнению с камерой типа «Jade UC» не позволяет выявлять мелкие детали, соответствующие структуре патологических сосудов в области голени правой ноги.

Необходимо отметить, что патологические сосуды такого типа очень трудно обнаружить при визуальном обследовании пациентов. В начальной фазе такая патология развивается без явных проявлений. Именно поэтому важна ранняя диагностика такой патологии. ИК термография позволяет решить эту задачу на ранней фазе развития болезни, когда еще может эффективно применяться терапевтическое лечение, и не доводить развитие заболевания до состояния, требующего хирургического лечения.

На рисунке 4 приведен пример количественного анализа ИК термограмм с использованием разработанного пакета программ.

Температурный профиль, приведенный на рисунке 4, показывает, что температура в области патологических сосудов на $3-4^{\circ}\text{C}$ выше температуры в окружающих областях ноги, что несет важную информацию о стадии заболевания. Приведенный на рисунке 4 температурный профиль рассчитан с использованием процедуры температурной коррекции. На данном профиле приведены абсолютные значения температур с точностью $0,2^{\circ}\text{C}$. Напомним, что без применения температурной коррекции ошибка в абсолютных значениях температур может достигать $4-5^{\circ}\text{C}$, и в таких случаях можно судить только об относительных перепадах температур с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$.

Ранняя диагностика воспалительных заболеваний является одним из наиболее важных на-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

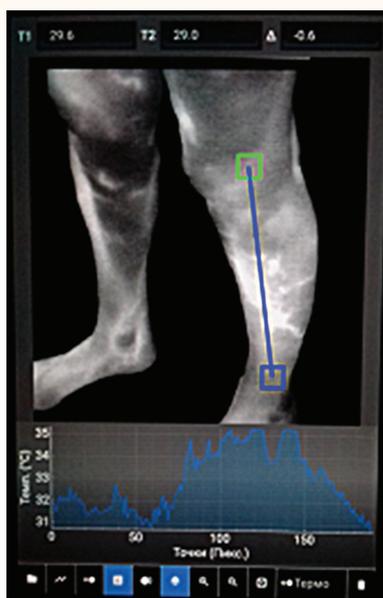


Рис. 4. ИК термограмма пациента, страдающего варикозным расширением вен в области голени левой ноги и температурный профиль по выделенной линии. Термограмма зарегистрирована ИК камерой типа «Therm-App»

правлений медицинской термографии. Особый интерес представляет возможность оперативно выявления больных, страдающих воспалительными респираторными заболеваниями, в аэропорту и других местах большого скопления людей. При такой диагностике необходима точность измерения абсолютных значений температур не хуже 0,1-0,2°C.

На *рисунке 5* приведены примеры температурных портретов лица здорового человека, зарегистрированные камерой типа «Seek Thermal compact PRO». ИК изображения представлены в трех стандартных температурных шкалах, позволяющих оперативно оценить максимальное значение температуры.

Приведенные на *рисунке 5* термограммы зарегистрированы без применения процедуры тем-

пературной коррекции. Температура пациента, измеренная с помощью стандартного ушного медицинского ИК термометра, была равна 36,4°C, и это значение должно соответствовать максимальной температуре в области глаз с точностью до 0,2°C [5]. Однако соответствующее значение температуры в области глаз на приведенных термограммах находится в районе 40°C, то есть ошибка достигает 3,6°C. Аналогичные величины ошибок были получены и при использовании ИК камеры типа «Therm-App». При оперативном выявлении больных, страдающих воспалительными заболеваниями, такая величина ошибки недопустима.

Самый простой способ уменьшения ошибки измерений абсолютных значений температур – корректировка данных на температуру в области глаз [5]. Однако такой способ диктует необходимость дополнительного измерения температуры в области уха с помощью медицинского ИК термометра. При таком методе коррекции отпадает необходимость учета излучательной способности кожи и расстояния между ИК камерой и пациентом.

Второй способ – калибровка ИК камеры на предварительно заданный температурный диапазон. Этот способ диктует необходимость разработки собственного программного обеспечения регистрации ИК данных, поскольку при использовании стандартного программного обеспечения ИК камеры могут произвольно изменять температурный диапазон в зависимости от минимальной и максимальной температуры и гистограммы температурных распределений в кадре. При этом способе уже необходим учет излучательной способности кожи и расстояния между ИК камерой и пациентом.

На *рисунке 6* приведена ИК термограмма лица пациента, страдающего вазомоторным ринитом, и температурный профиль через область глаз.



Рис. 5. Температурные портреты лица здорового человека в трех стандартных температурных шкалах, используемых в медицинской практике

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

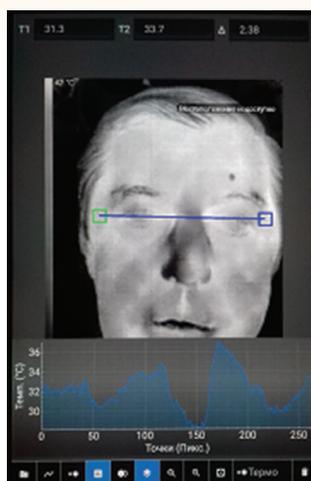


Рис. 6. Термограмма лица пациента, страдающего вазомоторным ринитом, зарегистрированная ИК камерой типа «Seek Thermal compact PRO». Температурный профиль рассчитан с использованием первого способа температурной коррекции

Выделение областей, температура в которых превышает температуру в норме, а так же областей, в которых температура превышает максимальное значение температуры в области глаз, может служить критерием наличия воспалительного заболевания. Такой алгоритм может использоваться при оперативном выявлении больных в аэропорту и других местах большого скопления людей. Пример применения такого алгоритма приведен на *рисунке 7*.

При использовании данного алгоритма необходимо выполнение ряда важных условий: ИК камера должна быть откалибрована; при расчете абсолютных значений температур должны учитываться излучательная способность различных участков тела, расстояние между ИК камерой и человеком, температура окружающей среды и наличие внешних источников ИК излучения. Ни одна из протестированных ИК камер не обеспечивает такой возможности без дополнительного специального программного обеспечения.

Выводы и рекомендации

1. Температурная чувствительность и пространственная неравномерность всех протестированных ИК камер не превышают $0,1^{\circ}\text{C}$, что достаточно для медицинской диагностики.

2. Реальная ошибка при измерении абсолютных значений температур может достигать $4\text{-}5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 20 до 40°C . Для использования протестированных ИК камер в медицинских це-

Температурный профиль, приведенный на *рисунке 6*, необходим врачу для выявления температурной асимметрии, имеющей важное диагностическое значение при анализе ИК термограмм. Несмотря на то, что максимальное значение температуры в области глаз находится в пределах нормы, температурная асимметрия между внутренними областями левого и правого глаза и височными областями достигает 2°C , что свидетельствует о наличии одностороннего воспалительного процесса [5, 8].

лях необходимо улучшить точность до величин порядка $0,1\text{-}0,2^{\circ}\text{C}$. Коррекция результатов температурных измерений может быть достигнута программным путем.

3. При использовании стандартного математического обеспечения все камеры автоматически меняют диапазон измерений в зависимости от разницы между максимальным и минимальным значениями температур. С одной стороны это очень удобно (особенно при использовании камеры в полевых условиях или в машине скорой помощи), так как у оператора отпадает необходимость постоянно заботиться о возможном выходе из диапазона измерений. В тоже время затрудняет возможность анализа и сравнения термограмм. Ручная установка температурного диапазона позволяет улучшить температурную детализацию ИК изображений.

4. При тестировании камер использовался специально разработанный интерактивный интерфейс, обеспечивающий построение температурных профилей по заданным оператором линиям или контурам, расчет разностных значений температур для определенных участков тела, возможность проводить коррекцию результатов температурных измерений. Данный интерфейс обеспечивает минимально необходимую адаптацию ИК камер к требованиям медицинской диагностики.

В настоящее время в стадии разработки находится программное обеспечение, которое должно обеспечить возможность: устанавливать динамический диапазон температурных измерений, рассчитывать гистограммы температурных распределений по заданным областям, задавать параметры температурных шкал, выделять области патологий по относительным изменениям температур в конкретных областях тела, переда-

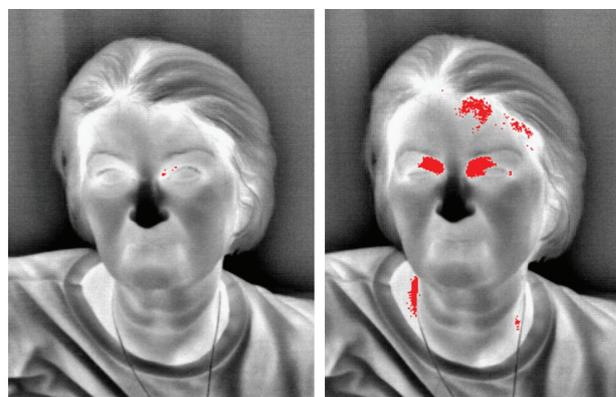


Рис. 7. Выделение области, температура в которой превышает заданное значение. Слева – $0,99\text{ T}(\text{max})$, справа – $0,97\text{ T}(\text{max})$. ИК термограммы зарегистрированы с использованием ИК камеры типа «Therm-App». Приведены термограммы здорового человека

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

вать результаты обследований на удаленные системы обработки ИК изображений для экспертного анализа медицинскими специалистами.

При выборе камеры для диагностических целей важно учитывать, что:

- ИК камера типа «*Seek Thermal*» имеет минимально необходимое пространственное разрешение, но не имеет возможности фокусировки, что существенно ограничивает ее применение в диагностических целях;

- ИК камера типа «*Seek Thermal compact PRO*» обеспечивает значительно лучшую детализацию ИК изображений по сравнению с камерой типа «*Seek Thermal*» за счет лучшего пространственного разрешения, возможности фокусировки, и большей скорости регистрации ИК данных. На сегодня эта камера пока является лучшим вариантом по критерию «цена-качество»;

- камера типа «*Therm-App*» на сегодня является лидером по техническим параметрам среди всех протестированных ИК камер и, безусловно, лучшим кандидатом для медицинских диагностических систем. Однако ее стоимость в несколько раз выше камеры типа «*Seek Thermal compact PRO*».

Для выработки медицинских рекомендаций и оценки перспективных диагностических возможностей необходимо проведение научно-клинических исследований с участием медицинских специалистов с целью определения необходимых модификаций ИК камер и программного обеспечения.

Литература

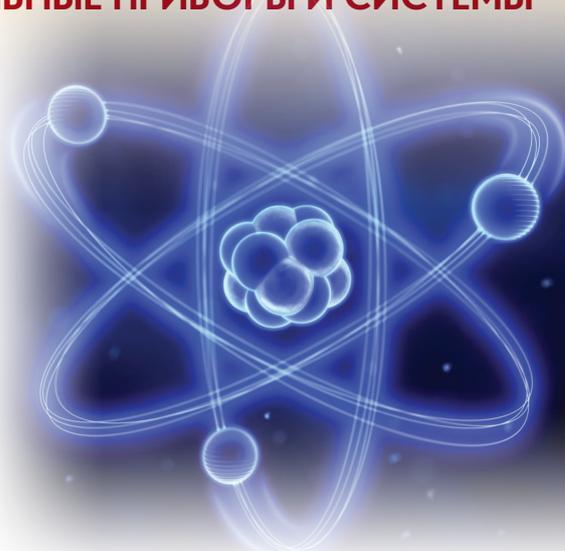
1. Применение тепловидения в многопрофильных больницах и поликлиниках. Методические рекомендации. // Под ред. д.т.н., проф. М.М. Мирошникова. Л., 1982. 84 с.
2. Вайнер Б.Г. Медицинское тепловидение высокого разрешения: новые возможности // Врач. 1999. №2. С.25-27.
3. Выховская А.Г., Сандриков В.А., Дмитриев Н.П. Некоторые аспекты клинического применения термографии // Тепловидение в медицине. Л., 1972. С. 63-67.
4. Зеновка Г.И. Термография в диагностике заболеваний вен нижних конечностей // Хирургия, 1982. № 9. С. 36-39.
5. Иваницкий Г.Р., Хижняк Л.Н., Деев А.А., Крестьева И.Б., Хижняк Е.П. Особенности температурных распределений в области глаз // ДАН, 2004. Т. 398. № 5. С.709-714.
6. Иваницкий Г.Р., Деев А.А., Хижняк Е.П., Хижняк Л.Н. Тепловидение в медицине: сравнительная оценка инфракрасных систем диапазонов длин волн 3-5 и 8-12 мкм для диагностических целей // ДАН, 2006. Т. 407. №2. С.258-262.
7. Иваницкий Г.Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине // Успехи физических наук, 2006. №176. С.1293-1320.
8. Иваницкий Г.Р., Деев А.А., Хижняк Е.П., Хижняк Л.Н. Анализ теплового рельефа на теле человека // Технологии живых систем, 2007. Т.4. №5-6. С.43-50.
9. Иваницкий Г.Р., Деев А.А., Пашовкин Т.Н., Хижняк Е.П., Хижняк Л.Н., Цыганов М.А. Особенности теплового проявления подкожных источников нагрева на поверхности тела человека. // ДАН, 2008. Т.420. №4. С.551-555.
10. Иваницкий Г.Р., Маевский Е.И., Смуров С.В., Хижняк Е.П., Хижняк Л.Н. Повышение диагностической информативности инфракрасных изображений с использованием методов нелинейного контрастирования // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). С.83-89.
11. Маевский Е.И., Смуров С.В., Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П. Настоящее и будущее инфракрасной термографии // Известия Института инженерной физики, 2015. №1(35). С.2-12.
12. Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П., Иваницкий Г.Р. Диагностические возможности матричной инфракрасной термографии. Проблемы и перспективы // Вестник новых медицинских технологий, 2012. №4. С. 170-176.
13. Anbar M. Computerized Thermography. The Emergence of a New Diagnostic Imaging Modality. // Int J. Technology Assessment in Health Care. 1987, 3, pp. 613-621.
14. M.Anbar. Quantitative Dynamic Telethermography in Medical Diagnosis. CRC Press: Boca Raton 1994, pp. 1-180.
15. Borgqvist D., Bornmyr S. New aspects on thermography as a noninvasive diagnostic method for arteriovenous anastomoses in the extremities // VASA, 1986. Vol.15. №3. pp. 241-244.
16. Sanchez B.M., Lesch M., Brammer D., Bove S.E., Thiel M., Kilgore K.S. Use of a portable thermal imaging unit as a rapid, quantitative method of evaluating inflammation and experimental arthritis // Journal of Pharmacological and Toxicological Methods, 2008. №57. pp.169-175.
17. Keyserlink J.R., Yu E., Belliveau N. et al. Functional infrared imaging of the breast // J. IEEE Engin. Med. Biol., 2000. Vol. 19. № 3. pp. 30-41.
18. Krawczyk B., Schaefer G., Wozniak M. A hybrid cost-sensitive ensemble for imbalanced breast thermogram classification. // Artificial Intelligence in Medicine, 2015. №65(3). pp. 219-227.
19. Ring E.F.J., Ammer K. Infrared thermal imaging in medicine // Physiological Measurement (IOP Publishing), 2012. №33. pp. 33-46.
20. Tay M.R., Low Y.L., Zhao X., Cook A.R., Lee V.J. Comparison of Infrared Thermal Detection Systems for mass fever screening in a tropical healthcare setting // Public Health, 2015. №129. pp. 1471-1478.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.039 53.05; 53.043

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ: НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

EFFECTIVE MANAGEMENT OF FLOWS OF THERMAL NEUTRONS: THE DIRECTION AND APPLICATION



Валерий Александрович Варлачев
доктор технических наук
заведующий лабораторией
Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Адрес: 634050, г. Томск,
проспект Ленина, д. 30
Тел.: 8(3822)70-64-06
E-mail: varlachev@tpu.ru

Юрий Васильевич Дробышевский
кандидат химических наук
директор по развитию
ООО «Протиус»
Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,
площадь Шокина, д. 2, строение 4
Тел.: +7 (903)724-08-22
E-mail: drbshevski@mail.ru .

Сергей Николаевич Столбов
генеральный директор
ООО «Протиус»
Адрес: 124460, Москва, г. Зеленоград,
площадь Шокина, д. 2, строение 4
Тел.: +7 (906)042-95-89
E-mail: stolbovsn@mail.ru

Геннадий Германович Волков
доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
ФГБУ Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П. Константинова
Адрес: 188300, Ленинградская обл.,
г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1
Тел.: +7(813)714 60-25
E-mail: ge.volkov@yandex.ru

Виктор Михайлович Дунилин
старший научный сотрудник МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)12-80-04
E-mail: upitd@iifmail.ru

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального
директора по научной работе –
главный конструктор МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: svsv@mail.ru

Аннотация

Проведенные ранее эксперименты показали возможность более эффективного управления потоками тепловых нейтронов. В работе показаны направления практического использования этого эффекта при конструировании ядерных и термоядерных реакторов нового поколения, в создании новых технологий нейтронного легирования полупроводников или в экспериментальной физике, например, для создания управляемых импульсных источников нейтрино.

Ключевые слова: тепловые нейтроны, плотность потока нейтронов, пучки тепловых нейтронов, эллиптические зеркала, способ и устройство для исследования потока тепловых нейтронов, нейтронное легирование, кремний.

Summary

The experiments made earlier have shown possibility of more effective management of thermal neutron fluxes. In work the directions of practical use of this effect when designing nuclear and thermonuclear reactors of new generation are shown, in creation of new technologies of neutron alloying of semiconductors, or in experimental physics, for example, for creation of the managed pulsed sources of neutrino.

Keywords: thermal neutrons, neutron flux density, thermal neutron beams, elliptical mirror, method and apparatus for investigation thermal neutron beams, neutron transmutation, silicon.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



Рис. 1. Фотография селективирующей пластины из графита в первом эксперименте

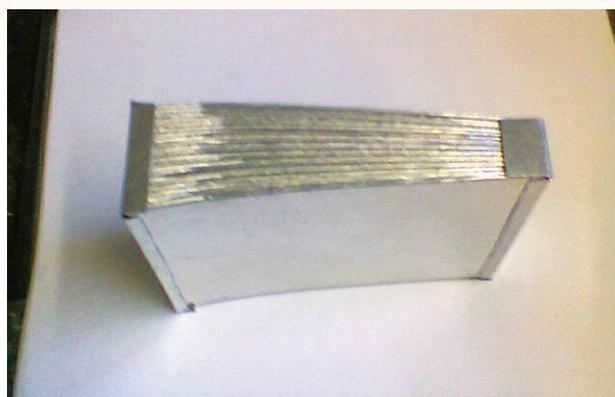


Рис. 2. Фотография пакета селективирующих элементов во втором и третьем эксперименте

Основным недостатком практически всех конструктивных схем атомных реакторов является малая эффективность использования нейтронов из-за большой утечки нейтронов из активной зоны. Задача эффективного управления потоками тепловых нейтронов стоит давно, но, тем не менее, для их увеличения применялось использование простейших отражателей нейтронов или увеличение объема активной зоны, чтобы уменьшить соотношение S/V и увеличить термализацию нейтронов в веществе замедлителя, а для их уменьшения, использовалось поглощение делящимся веществом и веществом СУЗов.

В 1991 году с целью повышения эффективности управления потоками тепловых нейтронов была разработана ЗФС – замедляюще - фокусирующая структура [1]. Данное устройство было запатентовано и стало базой ряда патентов в области ядерных и термоядерных реакторов [2, 3].

Создание устройства для эффективного управления потоками тепловых нейтронов основано на способе селекции нейтронов по направлению в пространстве и базируется на применении эффекта отражения нейтронов от поверхности материалов. Угол полного внешнего отражения нейтронов равен $\varphi_s = 10^\circ$ для поверхности из графита, $\varphi_s = 12^\circ$ для поверхности из бериллия, $\varphi_s = 10,7^\circ$ для поверхности из железа, $\varphi_s = 11,5^\circ$ для поверхности из никеля и $\varphi_s = 9,5^\circ$ для меди, $\varphi_s = 5,0^\circ$ для алюминия [4-6].

Несколько лет назад удалось провести ряд экспериментов на реакторе в Томске [7].

Фотография селективирующей пластины из графита в первом эксперименте показана на рисунке 1, а пакет селективирующих элементов во 2 и 3 эксперименте показан на рисунке 2.

Было установлено, что эффект селективной сепарации нейтронов явно существует и практически значим.

На элементах из графита эффект селекции наблюдался в виде полос с повышенной проводимости зарегистрированных на кремниевых детектирующих пластинах, что было обусловлено потоком повышенной интенсивности тепловых нейтронов сформированным на поверхности профилированных селективирующих элементов из графита.

На небольшом секториальном блоке профилированных селективирующих элементов из алюминия, составляющем 1/45 часть полного цилиндра и имеющего длину 70 мм вдоль цилиндра

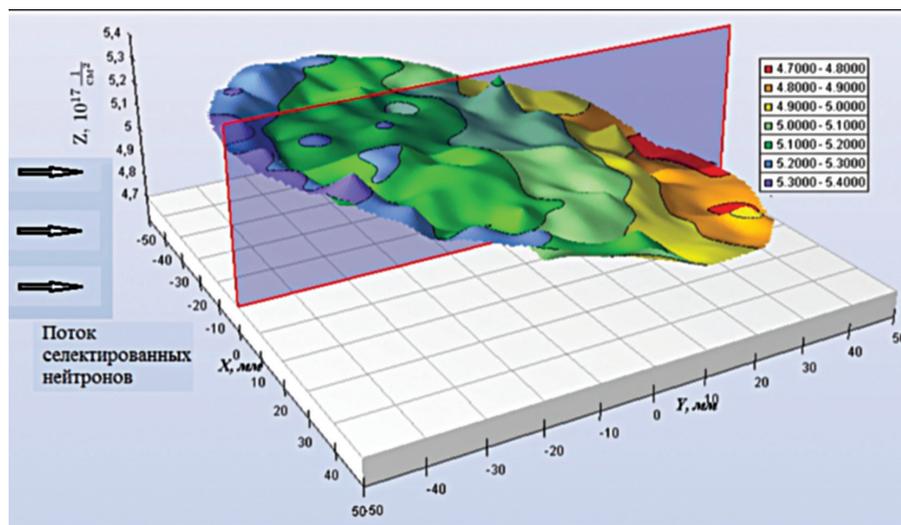


Рис. 3. Изменение интегрального потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на контрольной кремниевой пластине, рост потока до $\Phi = 5,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, при интегральном потоке поля нейтронов в реакторе при $\Phi = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

дрической структуры, интенсивность суммарного потока тепловых нейтронов в выделенной области активной зоны была увеличена вдвое.

На *рисунке 3* представлена карта распределения интегрального потока нейтронов.

Процесс селективной сепарации нейтронов идет на пакете профилированных зеркал из вещества замедлителя с переменной, уменьшающейся кривизной направления их вывода. Сепарация нейтронов в криволинейных каналах селекции показана на *рисунке 4*.

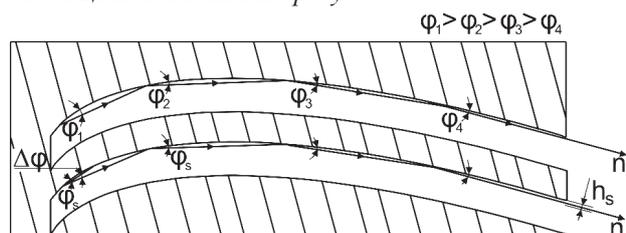


Рис. 4. Селектирование нейтронов в криволинейных каналах селекции: φ_i – угол падения-отражения нейтрона к поверхности при $i-1$ отражении; $\varphi_{2 \leq i} \varphi_1$ – угол к поверхности селектирующего элемента для первичного входа нейтрона n ; $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_s$; h_s – толщина пристеночного слоя селектированного потока нейтронов

Вся поверхность профилированных подобным образом каналов ведет себя как непрерывная поверхность стоков в фазовом (угловом) пространстве диффузного поля нейтронов. Такая совокупность стоков на поверхности пластин интегрирует захваченные нейтроны диффузного поля и выводит их в выделенном кривизной поверхности направлении, при этом концентрируя и увеличивая их фазовую плотность. Селективный захват нейтронов идет вдоль всей ее профилированной поверхности, а вывод (при хорошо полированной поверхности) идет на узкой, $h_s \approx 5$ микрон, полосе потока у торца. Поэтому плотность потока вдоль этой полоски может на несколько порядков превышать плотность потока диффузного поля нейтронов, что и было показано в первом эксперименте.

Если угол поверхностного отражения нейтронов поверхностью равен φ_s , радиус кривизны поверхности R , путь нейтронов между отражениями $L_s \approx 2 R \cdot \sin(\varphi_s) \approx 5$ мм, а расстояние траектории от поверхности канала будет $h_s \approx R (1 - \cos(\varphi_s))$, и коэффициент эффективности захвата нейтронов в ходе селекции K_{sel} может быть представлен как в [7]: $K_{sel} = \Delta\varphi/\varphi_s$ – коэффициент эффективности селекции тепловых нейтронов на поверхности пластин селектирующих элементов:

$$K_{sel} = \frac{2 \cdot R'_x}{\sqrt{1 - y_x}}$$

Для реализации выбирается такая геометрия

селектирующего элемента, чтобы на большей части его поверхности величина K_{sel} была максимальной. Например, у элемента с профилем эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

где $a = 150$ мм и $b = 15$ мм – максимальная эффективность селекции нейтронов;

$K_{sel} = 15$ – лежит на участке длины от 5 до 100 мм. Эффективность селекции K_{sel} на поверхности элемента вдоль его длины показана на *рисунке 5*.

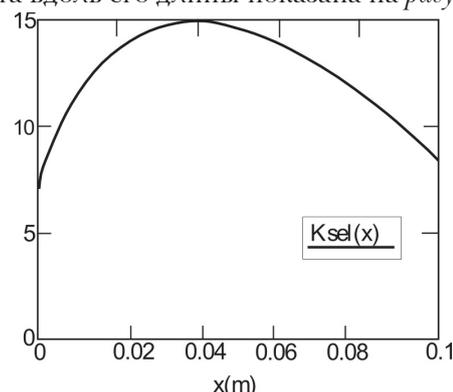


Рис. 5. Эффективность селекции на поверхности элемента вдоль его длины

Селекция должна идти во внешнем диффузном поле тепловых нейтронов или необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$N_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_a} \geq \frac{2 \cdot \pi}{K_{sel} \cdot \varphi_s} \cdot \frac{\pi}{\omega},$$

где σ_s и σ_a – сечения рассеяния и поглощения нейтронов;

N_s – число перерассеяний теплового нейтрона на ядрах вещества до его поглощения, оно должно быть больше количества отражений необходимых для селекции нейтрона поверхностями структуры;

ω – угол расходимости селектированного потока вдоль плоскости селекции.

Для пакета пластин из графита [7]:

$$N_s = 1.3 \cdot 10^3 \geq \frac{2 \cdot \pi}{K_{sel} \cdot \varphi_s \cdot 0.5} \approx 300$$

В результате нейтрон за время жизни многократно перерассеявшись на веществе замедлителя и многократно пересекая поверхности селектирующих пластин, попадет в угловую область захвата нейтрона структурой и уйдет в направлении фокусной области структуры для полезного использования в ней. При размерах устройства селекции – ЗФС больших диффузионной длины нейтронов в нем, фактически все термализованные нейтроны могут быть возвращены в ее фокусную область, где они и были рождены.

То есть в экспериментах показано, существование эффективного инструмента, резко повы-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

шающего культуру обращения с нейтронами и существенно расширяющего возможности конструкторов различных ядерных устройств, включая ядерные реакторы.

Существенной является возможность дальнейшего роста концентрации потока селективных ЗФС нейтронов в их суммарном геометрическом фокусе со всей совокупности ее селективных каналов.

Важно также, что поскольку угол полного отражения нейтронов и их отражение от поверхностей из магнитных материалов зависит от величины внешнего магнитного поля, то при покрытии пластин пленками магнитных материалов и помещении ЗФС в магнитное поле, процессом вывода нейтронов можно управлять в динамике в доли секунды. И тем самым можно оперативно управлять работой реактора с той же динамикой увеличивая его безопасность, или создавая импульсные мощные реакторные устройства.

Направления развития

Появление нового способа и устройства для эффективного управления потоками тепловых нейтронов расширяет и спектр эффективных ядерных технологий и устройств.

Компактные ядерные реакторы на тепловых нейтронах

Достаточно большая длина торможения нейтрона в ходе его термализации и малая вероятность возврата в ту область активной зоны, где он был рожден, привела к тому, что тепловые реакторы имеют достаточно большую активную зону с группой распределенных в ней ТВЭЛ и мощностью в единицы Гигаватт.

Наличие ЗФС с ее способностью с высокой вероятностью вернуть нейтрон после термализации и селекции в ту область реактора, где он был рожден, позволяет создавать компактные одно ТВЭЛные реакторы малой мощности (от единиц киловатт). Возможен при этом самый широкий спектр их применения: от компактных ампульных реакторов энергообеспечения отдельных поселков до транспортных аппаратов включая летательные управляемые и беспилотные аппараты и космические аппараты.

Новая ядерная энергетика

Основная проблема, стоящая перед атомной энергетикой – ее открытый топливный цикл и хищническая схема работы, когда основная часть добываемого урана – фактически 99,5% идет в отходы в виде отвалного, обедненного урана, или в виде отработанного ядерного топлива.

Что в условиях существующей динамики ее роста в мире ведет к тому, что, через 30-40 лет будет уничтожена вся ее собственная сырьевая база и вообще стоит вопрос об обоснованности ее развития в настоящем виде. Это с необходимостью ставит задачу создания реакторов с высокой глубиной выгорания топлива и с внутренним топливным циклом.

Целью является создание нового типа установок атомной энергетики работающих на широком спектре ядерного топлива.

Принцип работы основан на повышении глубины выгорания топлива путем увеличения эффективности возврата тепловых нейтронов в активную зону и формирования внутреннего топливного цикла реактора. Базовым является Патент [8] с предложением ядерного реактора работающего с внутренним топливным циклом, что позволяет резко увеличить глубину выгорания топлива практически до 100% без его внешней переработки. Кроме того, расширяется возможность использовать более широкий спектр исходного топлива, включая обедненный гексафторид урана и отработанное ядерное топливо энергетических реакторов.

Предлагается гетерогенный ядерный реактор с разделением области циркулирования топлива на три различные зоны:

- активную зону с тепловыми нейтронами, находящуюся в фокусной области ЗФС;
- активную зону с быстрыми нейтронами;
- зону выдерживания топливной смеси вне активной зоны.

Наличие ЗФС резко увеличивает эффективность возврата и динамику управления потоками нейтронов, что повышает устойчивость такого гетерогенного реактора [9].

Вообще говоря, уже на этом этапе видна основная причина, по которой данный тип реактора с циркулирующим топливом оказывается более эффективным, чем обычный реактор деления ядер.

Дело в том, что в процессе нахождения топливной смеси в зоне выдерживания топливной смеси вне активной зоны или в активной зоне с быстрыми нейтронами, где сечение деления мало, эффективный период полураспада каждого элемента как бы уменьшается, поскольку часть времени актинидов находится вне реактора.

И в результате, наличие области выдерживания топливной смеси вне активной зоны реактора ведет к тому, что увеличивается их доля, испытывавшая бета и альфа распады. Тем самым выдерживание смеси вне тепловой зоны реактора, из-за бета-распадов в этом составе, прежде всего, четных неделящихся изотопов актинидов, увели-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

чивает параметр деления (Z^2/A) изотопов состава и переводит их в делящиеся изотопы. А в результате состав топливной смеси «облагораживается» и критичность становится положительной.

Стартовый состав выбирается так, чтобы критичность состава, начиная со старта, не падала ниже единицы все время работы реактора. Для этого, например, необходимо, чтобы, по меньшей мере, три четверти стартового состава составлял природный уран.

В долговременном масштабе времени, в результате поглощения быстрых и тепловых нейтронов и последующего деления, а также альфа и бета распадов получаемых ядер, в системе асимптотически формируется топливная смесь, обладающая слабо меняющимся составом, которую можно назвать - «стационарным составом» [10].

Стационарный состав с положительной критичностью топливной смеси образуется при участии изотопов топлива, обладающих малыми сечениями деления на тепловых нейтронах, например, Pu^{240} , Pu^{242} , которые обычно извлекают переработкой.

Покажем структуру стационарного состава, полученную при моделировании с различными соотношениями между тепловой и активной зонами и различными составами.

Выберем воспроизводящий состав из обедненного до 0,2% по U^{235} , урана, при стартовом составе из природного урана и для примера режим при котором: $N_{\text{act}}/N_{\text{act}}=0,1$, $N_{\text{fact}}/N_{\text{act}}=0,9$, $N_{\text{full}}/N_{\text{act}}=10$ или $F_{\text{act}}=0,1$, и $F_f=F_i=10^{15}$ ($1/\text{см}^2\text{сек}$), в результате получим:

	0	1	2	3	4	5	6	7	
Pt =	0	"U"	"Pu"	"Pu"	"Pu"	"Am"	"Cm"	"Pu"	"U"
	1	238	242	239	240	243	244	241	236
	2	98.259	0.648	0.356	0.346	0.173	0.082	0.065	0.031

выход нейтронов из состава: $\eta_t=1,15$ на тепловых и $\eta_f=1,36$ на быстрых нейтронах (рисунк 6).

При этом получают фактически такой же состав, что и при работе с природным ураном. Но это и ясно, поскольку исходные делящиеся

актиниды быстро выгорают и в составе остаются только те актиниды, которые постоянно формируются из U^{238} и постоянно выгорают. Снизилась доля U^{236} рождающегося из U^{235} присутствующего в воспроизводящем веществе не выгоревшего по основному каналу его деления. Он - U^{236} достаточно хорошо поглощает нейтроны и тем самым снижает критичность состава.

Далее рассмотрим работу реактора и формирование стационарного состава из актинидов отработанного топлива. Выберем стартовый состав из природного урана, а воспроизводящий состав из отработанного топлива и режим работы, когда: $N_{\text{act}}/N_{\text{act}}=0,5$, $N_{\text{fact}}/N_{\text{act}}=0,5$ или $F_{\text{act}}=1$. $N_{\text{full}}/N_{\text{act}}=10$. и $F_f=F_i=10^{15}$ ($1/\text{см}^2\text{сек}$).

	0	1	2	3	4	5	6	7	
Pt =	0	"U"	"Pu"	"Cm"	"U"	"Cm"	"Pu"	"Pu"	"Am"
	1	238	242	244	236	246	240	239	243
	2	96.96	1.034	0.442	0.311	0.306	0.284	0.268	0.246

выход нейтронов: $\eta_t=1.034$ на тепловых и $\eta_f=1.44$ на быстрых нейтронах.

Сравнивая сформированный стационарный состав со стационарным составом, полученным из природного урана, можно заметить, что данные составы близки и лишь U^{236} вклинивается в структуру ряда. Но это естественно, поскольку его достаточно много в воспроизводящем составе из отработанного топлива, который включает в себя также:

U^{238}	U^{235}	Pu^{239}	U^{236}	Pu^{240}	Pu^{241}	Np^{237}	Pu^{242}	Pu^{238}	Am^{243}
0.977	0.0083	0.0055	0.0047	0.0022	0.0011	0.00047	0.00035	0.00017	0.00009

В условиях когда: $N_{\text{act}}/N_{\text{act}}=0,1$, $N_{\text{fact}}/N_{\text{act}}=0,9$ или $F_{\text{act}}=0,1$ и $F_f=F_i=10^{15}$ ($1/\text{см}^2\text{сек}$), $N_{\text{full}}/N_{\text{act}}=1$ мы получим следующий состав:

	0	1	2	3	4	5	6	7	
Pt =	0	"U"	"Pu"	"Pu"	"Pu"	"U"	"Cm"	"Am"	"Pu"
	1	238	242	239	240	236	244	243	241
	2	97.739	0.68	0.357	0.326	0.318	0.242	0.17	0.069

А также представим динамику изменения некоторых основных актинидов состава (рисунк 7).

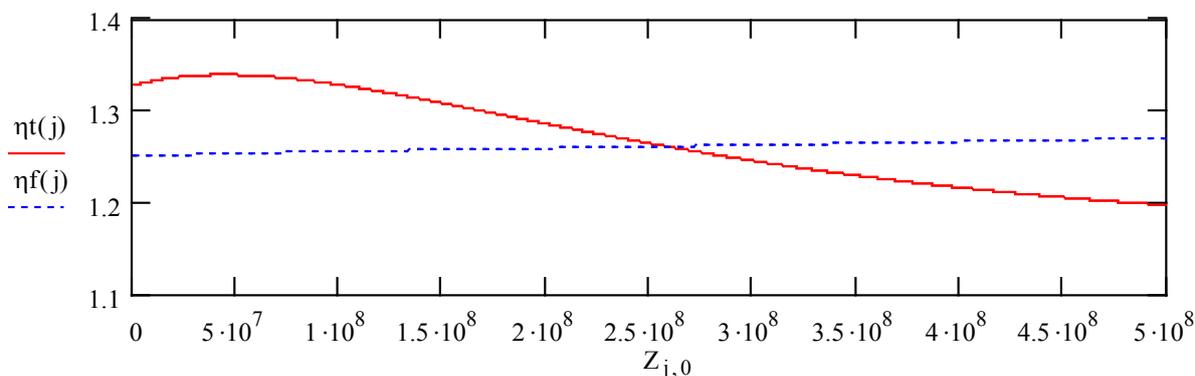


Рис. 6. Динамика изменения критичности на обедненном уране

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

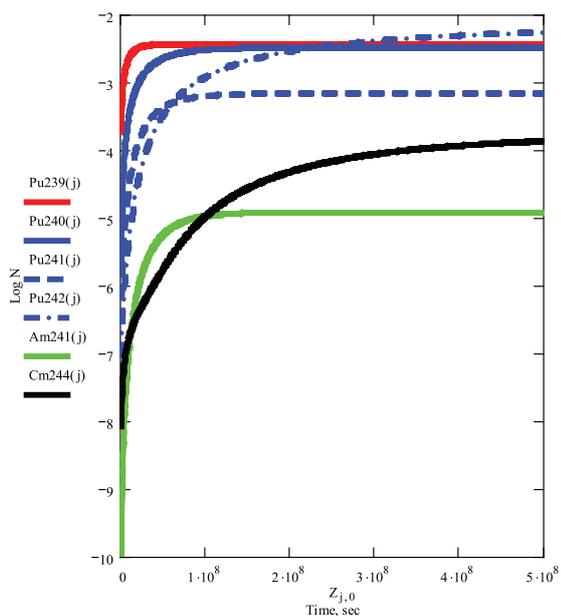


Рис. 7. Изменения некоторых основных актинидов состава

Из динамики кривых видно, что процесс формирования стационарного состава из стартового имеет сложный, нелинейный характер. Но при этом, начиная с некоторого момента, процесс становится достаточно спокойным, а состав стабилизируется.

При этом выход из состава: $\eta_t = 1,16$ тепловых и $\eta_f = 1,375$ быстрых нейтронов (рисунок 8).

Перейдем к процессам формирования стационарного состава на базе тория.

Для начала, сохранив основные параметры моделирования процесса, увеличим влияние области охлаждения. Пусть: $N_{full}/N_{act} = 10$. Тогда для исходного стартового состава из 20% тория и 80% природного урана, а воспроизводящего состава из тория и режима когда: $N_{fuel}/N_{act} = 0,5$, $N_{fuel}/N_{act} = 0,5$, или $F_{act} = 1$. и $F_f = F_t = 10^{15}$ ($I/cm^2сек$).

	0	1	2	3	4	5	6	7	
Pt =	0	"Th"	"U"	"U"	"U"	"Pa"	"U"	"U"	"Np"
	1	232	236	233	234	233	235	238	237
	2	95.778	1.753	1.45	0.622	0.114	0.084	0.06	0.053

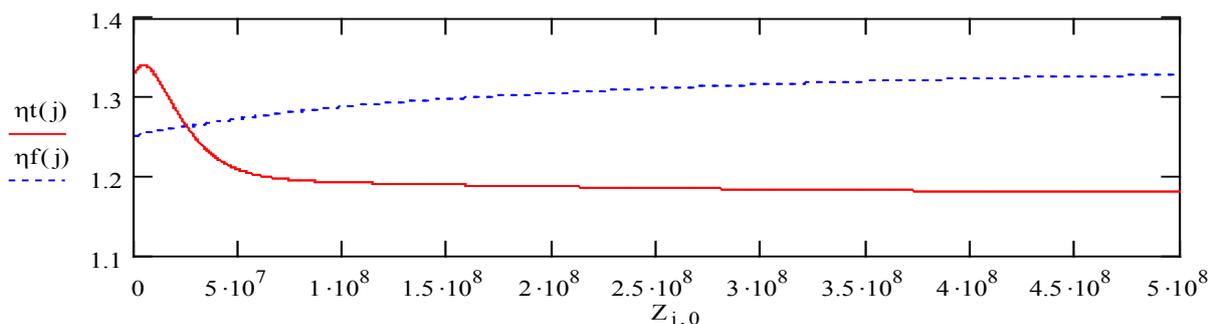


Рис. 8. Изменения критичности состава на отработанном топливе

выход нейтронов из сформированного стационарного состава: $\eta_t = 1,19$ на тепловых и $\eta_f = 1,026$ быстрых нейтронах.

Таким образом, в реакторе с циркулирующим топливом при наличии тепловой, быстрой активных зон и зоны охлаждения топливного состава, при работе на широком спектре воспроизводящих веществ, возможно формирование стационарных составов с положительной их критичностью. Глубина выгорания исходного топлива при этом является максимально полной. При этом для работы реактора нет необходимости химического выделения промежуточных актинидов, таких как U^{233} и Pu^{239} . Тем самым показано, что возможна работа реактора с полностью замкнутым внутренним топливным циклом. Безопасность ядерного реактора обеспечивается и поддержанием критичности состава на минимальном уровне. Режим нераспространения обеспечивается малым обогащением ядерных материалов в процессе и отсутствием их внешней переработки.

Топливной базой такого развития является то, что на легководных реакторах с открытым топливным циклом было наработано огромное количество отходов в виде отработанного ядерного топлива. Сегодня в мире накопилось свыше 260 тысяч тонн ОЯТ. В России порядка 700 000 тонн ОГФУ отечественного происхождения и порядка 125 000 тонн западноевропейского ОГФУ, в США складировано 740 тысяч тонн ОГФУ [11, 12].

Термоядерный реактор

Существует множество направлений в термоядерной энергетике [13, 14].

Наличие способа позволяющего эффективно управлять потоками тепловых нейтронов создает условия осуществления управляемого термоядерного синтеза, когда формирование и нагрев плазмы до температур, необходимых для хода термоядерных реакций, осуществляется за счет внутренних экзотермических ядерных реакций [15].

Существенной является и возможность даль-

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

нейшего роста концентрации потока селективных ЗФС нейтронов в их суммарном геометрическом фокусе со всей совокупности ее селективных каналов.

Базой является то, что в D+D реакциях существует два примерно равноценных канала, в которых рождаются или тритий плюс протон, или гелий-3 плюс нейтрон. И при этом у гелия-3 - ${}^3\text{He}$ крайне высокое сечение реакций взаимодействия с нейтронами, при которых рождается быстрый тритий с выделением 3.27 МэВ энергии (рисунк 9).

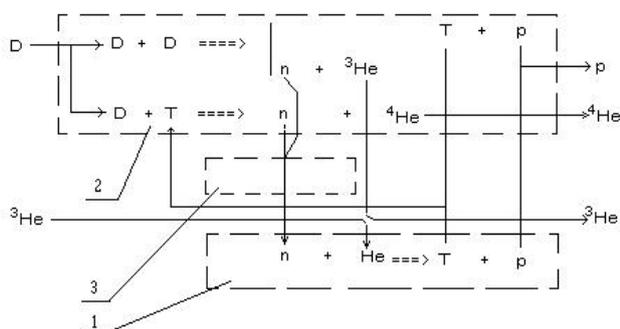


Рис. 9. Схема реакций в термоядерном реакторе с внутренним каталитическим циклом

В описываемом способе выгорающие с нейтронами в фокусной области (области катализа - 1) ядра ${}^3\text{He}$ выжигают с нейтронами, рождая быстрые T и затем их восполняют за счет рождения в основных реакциях синтеза. Ядра T в области 2 удержания плазмы выжигают на D и там же восполняют за счет рождения в термоядерных реакциях дейтерия - D. Одновременно сосуществуют (D+D) цикл в котором, ядра D - дейтерия выжигаются и рождаются ${}^3\text{He}$ и T, а также (D+T) цикл в котором, выжигаются ядра T - трития и рождаются быстрые нейтроны.

Таким образом формируется каталитически замкнутый цикл работы устройства самостабилизированный по T и ${}^3\text{He}$. При этом цикл избыточен по нейтронам. Должен взаимодействовать лишь один из трех рожденных в цикле нейтронов, что снижает требования к добротности устройства термолитации и формирования направленного потока нейтронов. Избыточные нейтроны можно поглощать легкими изотопами водорода, и частично можно замкнуть цикл и по дейтерию.

Прежде всего, при взаимодействии потока тепловых нейтронов с ${}^3\text{He}$ выделяется 0.76МэВ энергии, и рождаются быстрые 190 keV-ные ядра T, которые взаимодействуют с выделением энергии, как с дейтерием, так и с гелием-3 и идет общий разогрев плазмы.

Основные реакции, идущие в термоядерной плазме:

$$(50\%) D + D \rightarrow T (1.01 \text{ МэВ}) + p (3.02 \text{ МэВ}) Q = 4.03 \text{ МэВ}$$

$$(50\%) D + D \rightarrow {}^3\text{He} (0.82 \text{ МэВ}) + n (2.45 \text{ МэВ}) Q = 3.27 \text{ МэВ}$$

$$D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3.50 \text{ МэВ}) + n (14.1 \text{ МэВ}) Q = 17.6 \text{ МэВ}$$

$$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} (3.6 \text{ МэВ}) + p (14.7 \text{ МэВ}) Q = 18.3 \text{ МэВ}$$

$$(51\%) {}^3\text{He} + T \rightarrow {}^4\text{He} + p + n Q = 12.1 \text{ МэВ}$$

$$(43\%) {}^3\text{He} + T \rightarrow {}^4\text{He} (4.8 \text{ МэВ}) + D (9.5 \text{ МэВ}) Q = 14.3 \text{ МэВ}$$

$$(6\%) {}^3\text{He} + T \rightarrow {}^5\text{He} (2.4 \text{ МэВ}) + p (11.9 \text{ МэВ}) Q = 14.3 \text{ МэВ}$$

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p Q = 18.4 \text{ МэВ}$$

$$T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2n Q = 11.3 \text{ МэВ}$$

$${}^3\text{He} + n \rightarrow T (0.19 \text{ МэВ}) + p (0.57 \text{ МэВ}) Q = 0.76 \text{ МэВ} \sigma_T = 5400 \text{ бн}$$

Сечение взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^3\text{He}$ меняется как $1/v$ и в горячей термоядерной плазме температурой $T_{pHe3} \approx 10 \text{ keV}$, его можно оценить как:

$$\sigma_{pHe3} = \sigma_{THe3} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{pHe3}}} = 5400 \cdot \text{barn} \cdot \sqrt{\frac{0.025 \cdot \text{eV}}{10000 \cdot \text{eV}}} = 8.5 \cdot \text{barn} = 8.5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$$

Это сечение взаимодействия и скорость реакции больше, чем сечение и скорость обычных термоядерных реакций даже при термоядерных температурах плазмы.

Дадим графики сечений основных термоядерных реакций (рисунк 10).

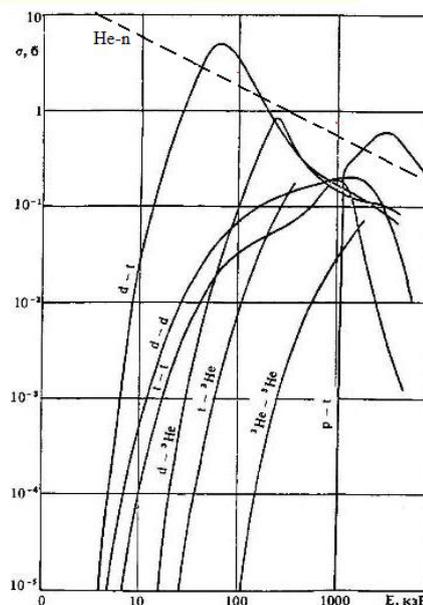


Рис. 10. Сечения основных реакций [5], добавлено сечение nHe^3

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Пусть основой конструкции реактора является протяженная, цилиндрическая замедляющая фокусирующая структура (ЗФС). Пусть плазма находится в продольной магнитной ловушке с внешним магнитным полем. Можно оценить энерговыделение и структуру каталитически обеспеченного состава в плазме в зависимости от температуры (в кэВ) плазмы, при фиксированном магнитном поле с индукцией $B=20\text{ Т}$.

Давление в плазме при зафиксированном магнитном поле с индукцией $B=20\text{ Т}$ составляет:

$$P_{\text{plasm}} = \frac{(B \cdot \beta)^2}{2 \cdot \mu_0} = 35 \text{ атм},$$

где $\beta=0.25$ – отношение давления плазмы к магнитному давлению, а плотность плазмы при этом:

$$n_{\text{plasm}}(T_{\text{plasm}}) = \frac{(B \cdot \beta)^2}{2 \cdot \mu_0 \cdot k \cdot T_{\text{plasm}}} \text{ 1/м}^3.$$

На рисунке 11 в зависимости от температуры плазмы даны:

- энерговыделение от основных реакций в плазме;
- тормозное излучение из плазмы этой температуры;
- энерговыделение от реакций He^3n в фокусной области ЗФС в плазме.

Таким образом каталитически обеспеченный состав возможен для широкого диапазона температуры плазмы.

Энерговыделение в плазме, в зависимости от температуры при фиксированном магнитном поле с индукцией $B = 20\text{ Т}$, будет.

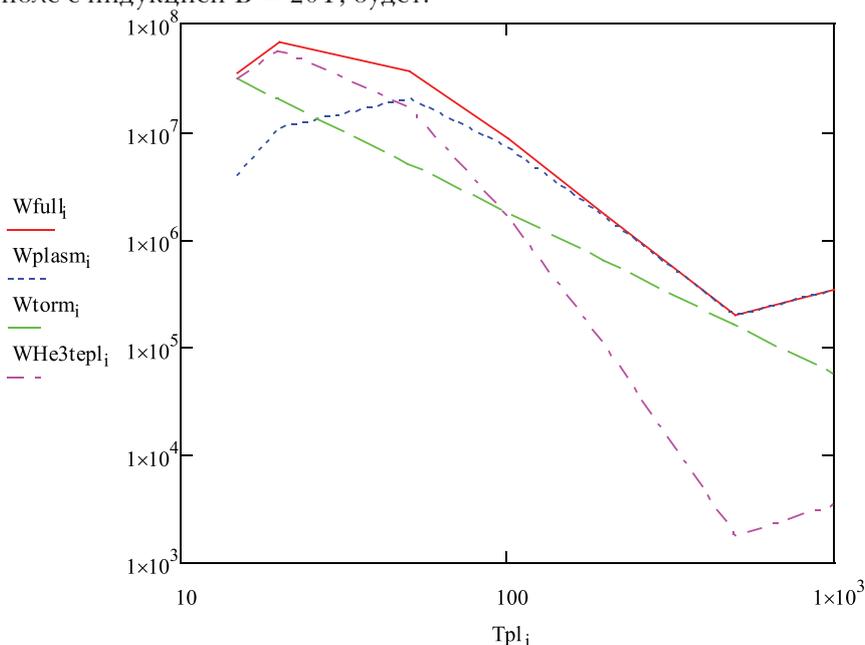


Рис. 11. Зависимость энерговыделения от температуры плазмы (в гладком приближении с учетом He^3He^3 и ТТ реакций) в плазме и в нейтронном фокусе для состава топливной смеси с наработкой гелия-3, при повышенной концентрации дейтерия

При численном моделировании, без учета ограничений гладкого приближения в варианте реактора для температуры плазмы $T_{pl}=15\text{ кэВ}$, стационарный состав будет включать, примерно 70% дейтерия, 30% гелия-3 и около 1% трития (при этом гелий-4 и водород, выводятся из состава). С ростом температуры плазмы стационарный состав меняется, гелий-3 эффективно выгорает, растет концентрация и доминирует тритий.

Возможен реактор управляемого термоядерного синтеза, в котором устройство термолиза и формирования направленного потока нейтронов выполнено так, что фокусная область размещена в приосевой области реактора и имеет форму конусов с общей вершиной, а узел ввода топливной смеси ориентирован внутрь этих конусов.

Сформированные пакетом селективирующих элементов потоки можно направить в выделенную геометрической структуры пакета область и фокусировать там. ЗФС реактора выполнена в виде протяженного, полого цилиндра, а селективирующие пластины ориентированы так, чтобы приосевая фокусная область была кольцевой и имела максимум на некотором радиусе и минимум плотности нейтронов в центре.

При этом, поскольку сечение взаимодействия гелия-3 с нейтронами существенно зависит от температуры и при этом, с уменьшением исходной температуры гелия как газа вводимого в реактор растет сечение взаимодействия и мощность энерговыделения в нем, то топливная смесь, включающая гелий-3, дейтерий и тритий

вводится в виде холодной газовой струи в приосевую область под давлением больше 35 атм, или в виде мишеней.

Двигаясь через конусный сужающийся поток нейтронов, смесь взаимодействует с ними и разогревает плазму в магнитной ловушке, где и идет ее основное выгорание.

Вновь, обратим внимание на то, что в рассматриваемом реакторе, как на стадии нагрева плазмы, так и в процессе выгорания соблюдается положительный энергетический баланс, и нет необходимости в дополнительном источнике энергии, достаточно иметь в реакторе стартовый источник нейтронов. Возможен старт с топливным составом, который содержит избыточное количество He^3 и дейтерия на начальном этапе.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Прежде чем переходить к последующему анализу, зафиксируем положение^[16], что для того чтобы некоторая система была устойчива и в ней существовал стационарный процесс, необходимо, чтобы в ней энерговыделение было равно энергопотерям и при этом не превышало некоторого критического для системы значения.

Поэтому для создания стационарного энергоэффективного термоядерного реактора необходимо наличие эффективной системы сема выделяющейся энергии.

Важно, используемое магнитное поле должно не жестко удерживать горячую термоядерную плазму, а в основном уменьшать ее радиальный дрейф и теплопроводность, до уровня, когда поддерживается температура, а энергия эффективно снимается с плазмы.

В отличие от других термоядерных реакторов, наличие внутреннего прогрева плазмы за счет взаимодействия нейтронов с гелием-3, позволяет реализовать вариант реактора с плазменной областью «омываемой» внешним теплоносителем. Теплоноситель может представлять газовую смесь ${}^3\text{He-D}_2$, или холодную рабочую смесь ${}^3\text{He-D}_2\text{-T}_2$, или чистый газ D_2 , чтобы диффузия его в плазму не обрывала процесс.

Вообще говоря, П.А. Капица [17] фактически уже проверил «омываемый» вариант экспериментально, изучая стабилизацию мощного плазменного СВЧ разряда и создавая вращающийся вихрь вокруг высокотемпературной плазмы. При этом, наблюдался эффект изоляции центральной высокотемпературной области плазмы от внешней, более холодной плазмы двойным электрическим слоем.

Кроме использования ЗФС в экспериментальной физике [18], представляет интерес их применение в технологии нейтронного легирования кремния [19, 20, 21].

Таким образом, появление нового способа эффективного управления нейтронами существенно расширяет возможности и пути развития ядерной энергетики этого века.

Литература

1. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Устройство для формирования направленного потока нейтронов. Патент RU №1821818, 1990 г.
2. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Способ получения энергии в процессе управляемого деления ядер и устройство для его осуществления. Патент RU №2075116.
3. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Способ управляемого термоядерного синтеза и управляемый термоядерный реактор для его осуществления. Патент RU №2056649.

4. Гуревич И.И., Протасов В.П. Нейтронная физика, М.: Энергоатомиздат, 1997. 416 с.
5. Власов Н.А. Нейтроны. М.: Наука, 1971. 551 с.
6. Игнатович В.К. Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006. 335 с.
7. Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В., Некрасов С.А., Петров Г.Н., Прохоров А.К., Столбов С.Н. Экспериментальная регистрация селективной сепарации тепловых нейтронов // SCI-ARTICLE, 2014. №11. С.11-117.
8. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Ядерная энергетика с внутренним топливным циклом и высокой глубиной выгорания топлива // SCI-ARTICLE, 2015. № 18. С.66-78.
9. Dugan E.T., Kahook S.D. Static and dynamic neutronic analysis of a burst-mode, multiple-cavity gas core reactor, rankine cycle space power system, Nuclear Technology, No. 2, La Grande Park, IL, US, 1993.
10. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Исследование долговременной динамики топливной смеси в ядерном реакторе с циркулирующим топливом // http://systemwork.ucoz.ru/_ld/0/12_.pdf
11. Bukharin Oleg. Understanding Russia's Uranium Enrichment Complex. – Science and Global Security, 2004, Volume 12, pp. 193-218.
12. Costs and Risks of Depleted Uranium from Proposed Enrichment Facility. - Science for Democratic Action, volume 13, №2, June 2005.
13. Семенов И. «Энергетика будущего: управляемый термоядерный синтез. Что такое термоядерный реактор ИТЭР и почему так важно его создание?» Материалы лекции, прочитанной 27 ноября 2008 года в ФИАНе.
14. Головин И.Н. Малорадиоактивный управляемый термоядерный синтез (реакторы с D^3He), ИАЭ-4885/8. М., 1989.
15. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Термоядерный реактор с внутренним каталитическим циклом // SCI-ARTICLE, 2014. № 16. С.219-232.
16. Взрывные явления, оценка и последствия / Под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М. Мир, 1986.
17. Капица П.А. Свободный лазерный шнур в высокочастотном поле при высоком давлении // ЖЭТФ, 1969. Т.57. С.1801.
18. Дробышевский Ю.В., Дунилин В.М., Волков Г.Г., Столбов С.Н. Реакторные нейтрино, структура нейтрона и геометрия пространства-времени // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.17-28.
19. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах // Известия вузов. Физика, 1998. №4, С.210-215.
20. Varlachev V.A., Solodovnikov E.S., A Thermal Neutron Detector Based on Single-Crystalline Silicon, Instruments and Experimental Techniques, 2009. Vol.52. №3. P.342-344.
21. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н., Некрасов С.А., Петров Г.Н., Прохоров А.К. Способ и устройство для нейтронного легирования вещества. Патент RU №2514943, 2012 г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 551.586

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО МАНЕКЕНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭВАКУАЦИОННОГО СРЕДСТВА

THE METHOD OF USING THERMAL DUMMY TO ASSESS THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE EVACUATION MEANS

Сергей Владимирович Мартынов
кандидат технических наук, доцент
начальник управления
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Борис Георгиевич Ерёмин
кандидат технических наук, доцент
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Владимир Викторович Никитенко
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93

Андрей Сергеевич Бутранов
старший научный сотрудник
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8 (4967) 72-19-11
E-mail: varvsn-serp@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы методики применения теплового манекена для оценки эвакуационных средств с активной системой электрообогрева в условиях низких температур окружающей среды.

Ключевые слова: тепловой манекен, комфортное состояние, эвакуационное средство, допустимое охлаждение.

Summary

The questions of the method of application of the thermal dummy for the evaluation of evacuation facilities with an active electric heating system at low ambient temperatures are considered.

Keywords: thermal manikin, comfort condition, the evacuation means, the allowable cooling.

Разработка методики применения термоманекена для оценки теплофизических характеристик эвакуационных средств, в том числе с активной системой обогрева, обусловлена необходимостью облегчить выбор эвакуационного средства для его эксплуатации в условиях низких температур окружающей среды, позволяя сравнивать эвакуационные средства различных производителей на основе четко дефинированной, универсальной и применимой единой схемы – например, данные о температуре в эвакуационном средстве в зависимости от регионов и времени года эксплуатации. За основу примем стандарты DIN EN ISO 23537/ EN 13537 предусматривающие проведение стандартных темпе-

ратурных тестов спальных мешков не на живых людях, а на специально сконструированном термическом манекене (thermal manikin) [1, 2], симулирующем «усредненного» человека. Применение данного стандарта позволяет сравнивать температурные характеристики спальных мешков, изготовленных разными производителями, т.к. тестирование проводится стандартным, то есть, не зависящим от производителя, методом.

Однако стандарту DIN EN ISO 23537/ EN 13537 не подлежат:

а) армейские спальные мешки, что объясняется следующими обстоятельствами:

1) армии различных стран предъявляют различные требования к одежде;

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

2) пользователями армейских спальных мешков являются преимущественно молодые и тренированные люди, тепловыделение которых превышает тот уровень тепловыделения, который определен стандартом DIN EN ISO 23537/ EN 13537;

б) спальные мешки, рассчитанные на применение в зонах с экстремальным климатом, в стандарте EN 13537 к этим зонам относятся регионы, в которых температуры не превышают минус 24°C. В этих климатических зонах предполагается:

1) использование особых теплоизолирующих ковриков или даже комбинаций ковриков, а также специальной одежды;

2) не исключен и сон в полной уличной одежде.

Подобные условия в стандартном температурном тесте по DIN EN ISO 23537/ EN 13537 не моделируются.

При определении температуры комфорта необходимыми условиями являются: молния спального мешка застегнута полностью, капюшон находится на голове и правильно затянут, спящий одет в длинное функциональное белье и носки.

Стандарт не учитывает ряд факторов, к которым относятся:

а) манекен, используемый в тестах, симулирует человека с достаточно высоким выделением тепла, то есть человека отдохнувшего, полного сил, а также правильно и регулярно питающегося;

б) в температурном тесте по DIN EN ISO 23537/ EN 13537 не учтено воздействие различных видов изолирующих ковриков и одежды на тепловой баланс пользователя спального мешка – коврик и одежда в тесте стандартизированы;

в) данный тест не учитывает снижение теплоизоляционных свойств спального мешка со временем, и воздействие многодневного использования на термоизолирующий материал;

г) манекены, используемые в температурных тестах спальных мешков, не симулируют потоотделения (исключение составляет манекен SAM, применяемый в тестах, проводимых EMPA, швейцарской организацией тестирования материалов). В температурном тесте по DIN EN ISO 23537/ EN 13537 учитывается фактор потоотделения, однако, в виде упрощенного, рассчитанного в лаборатории, значения;

д) температурный тест по стандарту DIN EN ISO 23537/ EN 13537 производится внутри помещения, и, таким образом, не учитывает различные факторы, не только присутствующие, но также и изменяющиеся в реальных условиях.

Температурные тесты спальных мешков в

соответствии со стандартом EN 13537 проводят специализированные организации. При этом используются следующие термические манекены:

а) термоманекен Charlie, имеющий 15 тепловых зон, разработанный Институтом Хохенштайн, Германия;

б) французским исследовательским центром разработаны 3 термических манекена:

1) Louise (20 тепловых зон, Thelma AS);

2) Martin (30 тепловых зон);

3) SAM – подвижный манекен, способный симулировать не только человека идущего, сидящего, стоящего и спящего, но также и человека потеющего.

Каждый термический манекен оснащен термоэлементами, симулирующими выделения тепла человеческим телом, а также термодатчиками, регистрирующими температуру «кожи». Во время теста манекен располагается в холодильной камере, где влажность и температура воздуха постоянны, а циркуляция воздуха сведена к минимуму. В зависимости от программы проведения теста, манекен располагается в спальном мешке либо в «голом виде», либо одетым в длинное функциональное белье и носки (стандартный тест по DIN EN ISO 23537/ EN 13537 предусматривает наличие белья и носков). В процессе стандартного теста по DIN EN ISO 23537/ EN 13537 манекен, завернутый в спальный мешок, лежит на коврике из сплошного (неперфорированного) открытоячеистого пенополиуретана, имеющем толщину около 4 см; этот коврик, в свою очередь, находится на походной (кемпинговой) кровати.

Термоманекен разогревается термоэлементами до стандартной температуры (плюс 34°C), после чего в течение примерно 30 минут производится измерение тепловой энергии, уходящей на поддержание постоянной температуры различных «частей тела» манекена.

Теплоспротивление спального мешка рассчитывается на основе объема тела манекена и разницы в температуре окружающей среды и температуры на поверхности манекена [1, 3, 5, 6].

Доказано, что значительная часть тепла, теряемого пострадавшим, уходит в направлении подстилки (по разным источникам, вплоть до 50 % от общего объема теплопотерь пострадавшим, в зависимости от положения его тела), то есть, в том направлении, где наполнитель эвакуационного средства сдавлен (сплюснен) больше всего.

Тепловой манекен представляет полный человекообразный манекен, имеющий размер и форму тела человека, а также зональное распределение температур, подобное распределению температур человеческого тела.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Поверхность термоманекена представляет собой несколько индивидуально управляемых нагреваемых зон. Он пригоден для создания имитации тепловой нагрузки человека в спокойном состоянии, происходит имитация тепла произведенного за счет метаболизма, простейшее метаболическое тепло, которое вырабатывается организмом в состоянии покоя.

На нагреваемые зоны подается низковольтное напряжение с частотой, позволяющей поддерживать постоянную или изменяющуюся температуру поверхности манекена. Также возможно поддерживать постоянной электроснабжение поверхности манекена. Внешний вид теплового манекена представлен в соответствии с *рисунком 1*.

Тепловой манекен, на котором тестируется эвакуационное средство, занимает такой же объем, как и обычный типовой взрослый человек, который лежит на спине. Манекен имеет рост от 150 до 200 см и площадь поверхности (тела) от 1,5 до 2 м².

В качестве нагревательного элемента поверхности теплового манекена применяется электропроводящая ткань, состоящая из элементов, как по основе, так и по утку из нити бикарболон-2М, полиамидной нити и вплетенными в них токопроводящими шинами из мишурных нитей.

Энергопотребление при установившихся



а) лицевая сторона манекена б) тыльная сторона манекена
Рис. 1. Внешний вид теплового манекена



Рис. 2. Подача электропитания на термоманекен

температурных условиях является показателем потери тепла за счет конвекции, излучения и кондукции. Работа системы обогрева теплового манекена осуществляется от внешнего источника питания типа UT3030PS, позволяющего контролировать напряжение питания от 0 до 30 В, и тока питания от 0 до 30 А.

Внешний вид оборудования представлен в соответствии с *рисунком 2*. Предельная точность силового оборудования составляет $\pm 2\%$ к средним значениям за период испытаний.

Размещение датчиков замера температуры на внутренней поверхности эвакуационного средства с использованием теплового манекена представлено в соответствии с *рисунком 3*.

Для измерения и регистрации температуры на внутренней поверхности эвакуационного средства применяются комплексы измерительные Термохрон Ревизор TCR-G. Как минимум один датчик расположен на каждой контрольной точке. Датчики плотно прилегают к поверхности эвакуационного средства. Точность измерений датчика имеет погрешность $\pm 1,0^\circ\text{C}$ [7].

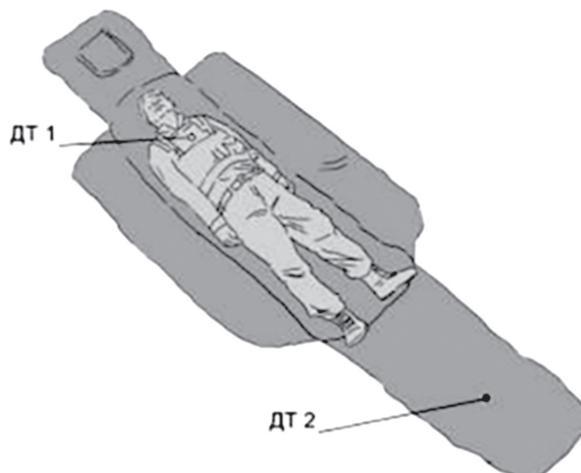


Рис. 3. Места размещения температурных датчиков

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Температурные датчики фиксируются на внутренней поверхности эвакуационного средства с помощью адгезивного материала (типа скотч, пластырь и т.п.).

Пульт управления обогревом теплового манекена и приборы для контроля температуры на поверхности теплового манекена представлены в соответствии с *рисунком 4*.



Рис. 4. Пульт управления обогревом теплового манекена

Тепловой манекен одевается во всепогодный комплект полевого обмундирования, стоящий на снабжении в Вооруженных силах России (в соответствии с *рисунком 5*).

На тепловой манекен надевают комплект ВКПО в следующей последовательности:

- белье нательное длинное;



а) манекен одет в базовый комплект ВКПО



б) манекен в эвакуационном средстве



Рис. 6. Термоманекен готов к проведению испытаний

- белье нательное флисовое;
- куртка флисовая;
- костюм демисезонный;
- костюм утепленный;
- ботинки;
- перчатки;
- шапка.

После завершения экипировки теплового манекена, последний одетый в комплект ВКПО, уложенный в эвакуационное средство и прогретый до температуры $(34 \pm 3)^\circ\text{C}$ должен находиться в эвакуационном средстве в горизонтальном положении (имитатор пострадавшего в положении «лежа», низкий уровень активности), помещается в климатическую камеру, с заданной температурой испытаний в соответствии с *рисунком 6*.

Сложность исследуемых явлений предопределяет необходимость натурного (модельного) эксперимента при исследовании системы активного обогрева эвакуационного средства для эвакуации пострадавшего военнослужащего.

Для оценки эффективности эвакуационных средств с активной системой электрообогрева для эвакуации пострадавшего применение теплового манекена, предусматривающее проведение стандартных температурных тестов эвакуационных средств не на испытателях, а на специально сконструированном тепловом манекене симулирующем «усредненного» человека (25 лет, 1,73 м роста, поверхность тела 1,83 м², метаболическое выделение тепла 46 Вт/м², тепловая мощность до 82,8 Вт.), который находится в состоянии теплового баланса в положении «лежа», низкий уровень активности внутри эвакуацион-

Рис. 5. Внешний вид теплового манекена перед испытаниями

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ного средства, что позволяет производить оценку эвакуационного средства с активной системой электрообогрева стандартным, то есть, не зависящим от состояния испытуемого методом, в том числе и в критически сложных температурных условиях, когда поведение живого человека непредсказуемо, при этом риск замерзания и причинения вреда здоровью велик, а применение теплового манекена позволяет проводить испытания при критически сложных температурных условиях без вреда для испытуемых [2, 8, 10].

Целью разработанной методики с применением теплового манекена для оценки теплофизических характеристик эвакуационных средств с активной системой электрообогрева является определение границы, при которой еще обеспечена защита пострадавшего от замерзания, исключая гипотермию (охлаждение тела пострадавшего), которая может нанести вред здоровью.

На теплоизоляцию средств эвакуации оказывают влияние теплофизические (тепловое сопротивление, теплопроводность, теплоемкость) и структурные (пористость, средняя плотность, толщина) показатели свойств материалов, применяемых в эвакуационном средстве пострадавшего. Задачей исследования является разработка теплового манекена для определения физиологического воздействия, оказываемого системой активного обогрева эвакуационного средства на пострадавшего военнослужащего при эвакуации в условиях низких температур окружающей среды. Исследование необходимо для обоснованных рекомендаций теоретических подходов к разработке проектирования и моделирования теплоизоляционных компонентов эвакуационных средств с активной системой электрообогрева.

Исследования проводятся на человекообразном манекене, имеющем зональное распределение температур, подобное распределению температур человеческого тела. Тепловой манекен может быть оборудован необходимым количеством датчиков, которые фиксируют изменение температуры в различных областях эвакуационного средства, а также частей теплового манекена.

Эксперимент заключается в следующем: тепловой манекен укладывается в эвакуационное средство, прогревается до температуры $(34 \pm 3)^\circ\text{C}$, тепловой манекен должен находиться в эвакуационном средстве в горизонтальном положении (имитатор пострадавшего в положении «лежа», низкий уровень активности), далее эвакуационное средство с работающим тепловым манекеном помещается в климатическую камеру, с заданной температурой испытаний, актив-

ная система электрообогрева эвакуационного средства находится в работоспособном состоянии. Режим работы активной системы электрообогрева эвакуационного средства устанавливается в зависимости от моделирования условий окружающей среды в момент эвакуации пострадавшего. Исходя из измеренных значений температуры внутри эвакуационного средства, экспериментально определяется так называемое «температурное назначение» эвакуационного средства. Под термоизоляционными свойствами эвакуационного средства понимается задержание конструкцией эвакуационного средства сухой потери тепла его пользователем. Потеря тепла происходит за счет передачи тепла путем теплопроводности, конвекции и излучения. Термоизоляционная характеристика эвакуационного средства с активной системой электрообогрева - разница между температурами на внутренних поверхностях эвакуационного средства и окружающего воздуха; измеряется на температурной модели (тепловом манекене). Стандарт термоизоляции, основанный на такой модели, определяет качественную характеристику способности эвакуационного средства удерживать тепло, включает способность наполнителя эвакуационного средства удерживать собственный объем, объем воздуха внутри эвакуационного средства, подложку (коврик) под эвакуационным средством и влияние одежды, одетой на военнослужащего при его эвакуации.

Во время испытаний тепловой манекен полностью одет в штатную одежду базового комплекта ВКПО, который может комплектоваться разными слоями в зависимости от условий нахождения военнослужащего в том или ином климатическом районе. На лицо манекена одета балаклава.

Во время испытаний имеется в виду, что субъект тестирования (пострадавший) находится в положении «лежа», низкий уровень активности, и изменять позу не может, его положение ограничивает эвакуационное средство. Имеется в виду оптимальная затяжка откидных частей, правильное расположение тела пострадавшего и тому подобное. Исследования проводятся с тепловым манекеном, который лежит на твердой искусственной поверхности (носилки). Нижняя часть носилок должна иметь контакт с воздухом. Носилки стоят на твердой поверхности, изготовленной из деревянной доски размерами 55×185 см толщиной 12 мм. Деревянный настил, обеспечивает свободное движение воздуха под ним.

Исследования проводятся в климатической камере, где погрешность температуры воздуха составляет $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Температура испытаний

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

устанавливается на значении, которое гарантирует температурную разницу между тепловым манекеном и воздухом окружающей среды на уровне 15 °С или более. Разница между температурой воздуха и температурой излучения стенок камеры должна быть менее 2 °С. Скорость движения воздуха в камере не должна превышать 0,5 м/с. Относительная влажность воздуха должна находиться в пределах от 40 до 80%.

Перед испытаниями эвакуационное средство адаптируется к условиям (температуре) окружающей среды; адаптация должна длиться не менее 12 часов.

Эффективное температурное сопротивление и эффективное испарительное сопротивление эвакуационного средства зависит от термоизоляционных свойств.

Во время пребывания в эвакуационном средстве, пострадавший дышит наружу, поэтому разогретый легкими воздух выносит в атмосферу дополнительное тепло. При проведении испытаний эвакуационного средства считается, что такой теплообмен не происходит.

Тепловая усталость проявляется в уменьшении температуры тела из-за длительного пребывания в холодных условиях. Физиологическая модель в исследовании использует температурно-сбалансированное состояние. Имеется в виду, что тепловая усталость равна нулю [9, 10].

Результатами проведенных исследований яв-

ляются значения температуры на внутренних поверхностях эвакуационного средства с активной системой электрообогрева в условиях пониженных температур представленные в соответствии с рисунками 7, 8.

Выводы

Расширение возможностей эксплуатации средств эвакуации пострадавшего путем введения в данный комплект активной системы электрообогрева является одним из возможных резервов повышения эффективности эвакуации пострадавшего и обеспечения показателей комфортности при применении в различных климатических зонах.

Учет влияния всех слоев и параметров в эвакуационных средствах – задача сложная, но применение активной системы электрообогрева по принципу единства и согласованности слоев и активной системы электрообогрева обеспечивает создание комфортных условий при эвакуации пострадавшего в различных климатических районах России.

Применение теплового манекена для исследования оптимальной теплоизоляции эвакуационного средства с учетом применения активной системы электрообогрева имеет практическую значимость в возможности ее использования:

- как комплекса рекомендаций по формированию рациональной комплектации эвакуаци-

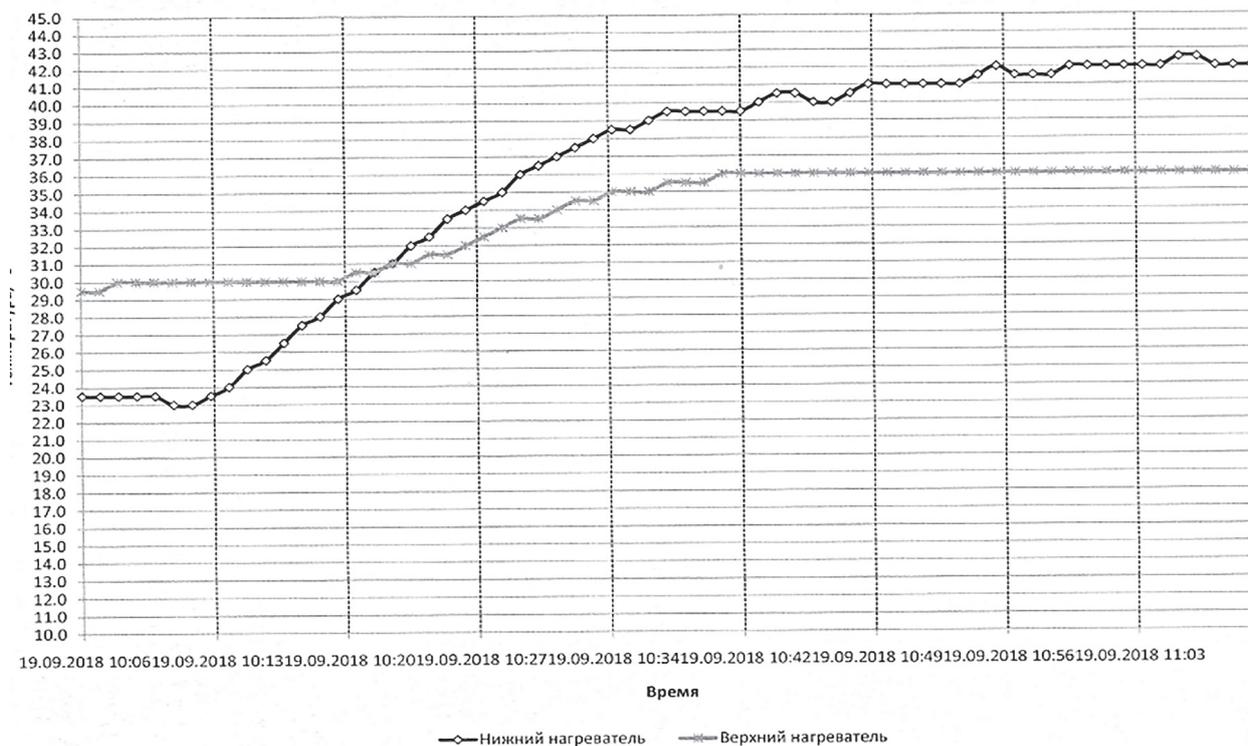


Рис. 7. Результаты замера температуры на внутренних поверхностях при температуре окружающей среды минус 20 °С

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

онных средств для защиты от переохлаждения пострадавшего при эвакуации в особых климатических районах;

● разработанная методика применения теплового манекена для оценки теплофизических характеристик эвакуационного средства с автономной системой электрообогрева позволяет устанавливать оптимальные режимы обогрева в зависимости от тяжести полученных травм пострадавшего и температуры окружающей среды в различных климатических районах.

Для оценки эффективности эвакуационных средств с активной системой электрообогрева для эвакуации пострадавшего применение теплового манекена, предусматривающее проведение стандартных температурных тестов эвакуационных средств не на испытателях, а на специально сконструированном тепловом манекене симулирующем «усредненного» человека, который находится в состоянии теплового баланса в положении «лежа», низкий уровень активности внутри эвакуационного средства, что позволяет производить оценку эвакуационного средства с активной системой электрообогрева стандартным, то есть, не зависящим от состояния испытателя методом, в том числе и в критически сложных температурных условиях, когда поведение живого человека непредсказуемо, при этом риск заморзания и причинения вреда здоровью велик.

Литература

1. ГОСТ Р 12.4.236-2011 г. «Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от пониженных температур». Технические требования.
2. Стандарт DIN EN ISO 23537 (бывший EN 13537) [Электронный ресурс]: <http://eurotourist.club/site.php?http://www.kombrig.net/snar-sbags.htm#checkTlimit> (дата обращения 22.08.2018).
3. Афанасьева Р.Ф., Бурмистрова О.В. Физиолого-гигиенические требования к одежде для защиты от холода работающих на открытой территории Северных регионов // Медицина труда и промышленная экология, 1996. №6. С.10-15.
4. Афанасьева Р.Ф., Бурмистрова О.В. Охлаждающая среда и ее влияние на организм // В кн.: Профессиональный риск для здоровья работников / Под. ред. Н.Ф. Измерова, Э.И. Денисова. М.: Травант, 2003. С.142-149.
5. Афанасьева Р.Ф., Бурмистрова О.В. К обоснованию физиолого-гигиенических требований к показателям теплозащитных свойств зимних головных уборов // Медицина труда и промышленная экология, 1995. №7. С.4-9.
- ГОСТ Р 12.4.185-99 Средства индивидуальной защиты от пониженных температур. Методы определения теплоизоляции комплекта. М.: Стандартинформ, 2000.
7. Щедрин А.К. Методы био- и термометрии и способы изготовления термо- и теплометрических датчиков. С.Пб.: ВМА им. С.М. Кирова, научно-исследовательский центр, 2012. 82 с.
8. Клинические аспекты полярной медицины / Под ред. В.П. Казначеева. М., 1986.
9. Кошчев В.С. Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека от холода. М.: Медицина, 1981. 288 с.
10. ГОСТ ISO 15831-2013 Одежда. Физиологическое воздействие. Метод измерения теплоизоляции на термоманекене. М.: Стандартинформ, 2014.

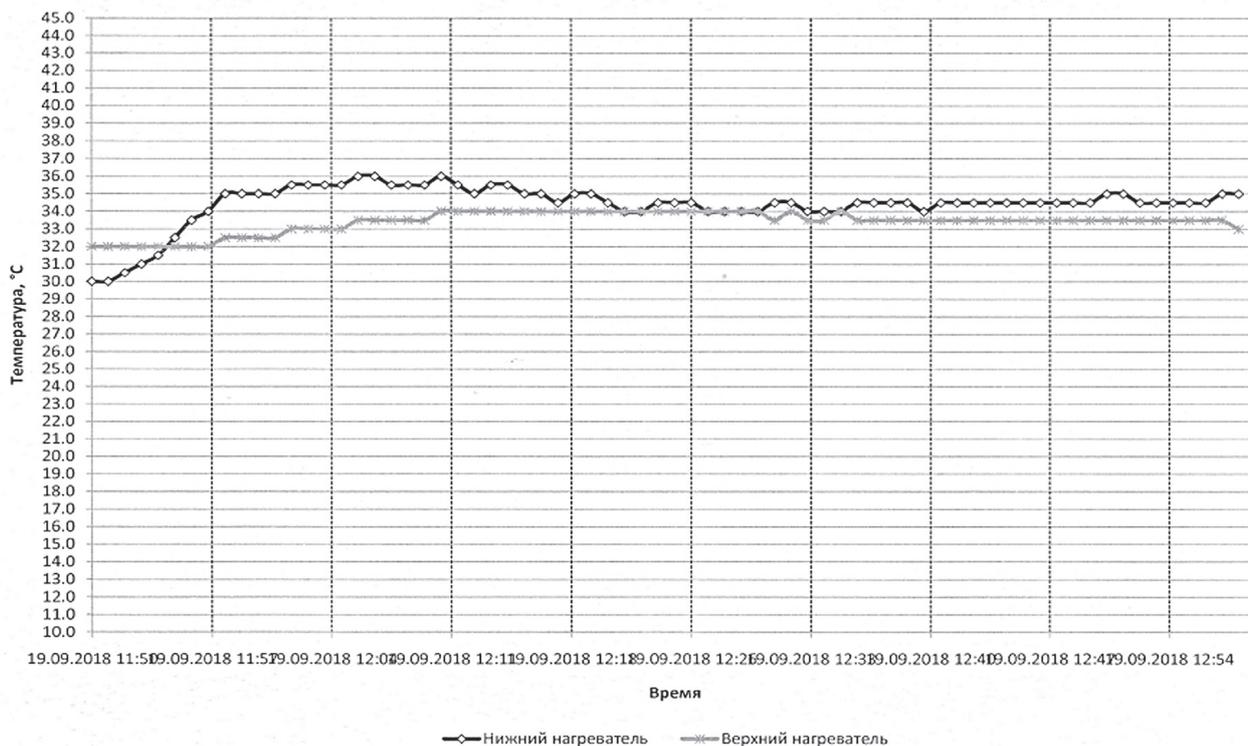


Рис. 8. Результаты замера температуры на внутренних поверхностях при температуре окружающей среды минус 50°C

УДК 621.394

КАСКАДНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ ЭКВИДИСТАНТНЫМИ НЕДВОИЧНЫМИ И ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВОИЧНЫМИ КОДАМИ

CASCADING DATA ENCRYPTION EQUIDISTANT ORTHOGONAL NONBINARY AND BINARY CODES

Владимир Владимирович Зеленецкий
*почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: 8(905)548-48-54
E-mail: Zelenevsky.Vladimir@gmail.com*

Юрий Владимирович Зеленецкий
*доктор технических наук, доцент
научный сотрудник
ВА РВСН им. Петра Великого
Адрес: 143900, Московская обл.,
г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8
Тел.: 8(903)721-12-61
E-mail: sys1434@mail.ru*

Анатолий Владимирович Зеленецкий
*кандидат технических наук
заместитель начальника отдела
АО «Фирма НТЦ «КАМИ»
Адрес: 119361, Москва, ул. Большая
Очаковская, д. 47а, стр. 1
Тел.: 8(926)150-83-76*

Евгений Валерьевич Шмырин
*кандидат технических наук
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: shmyrinev@mail.ru*

Артем Сергеевич Дурнов
*научный сотрудник
войсковая часть 33965
Адрес: 117602, Москва,
Мичуринский проспект, д. 70
Тел.: 8(985)385-78-74
E-mail: tema070@mail.ru*

Вячеслав Анатольевич Рыженков
*кандидат технических наук
начальник Управления заказов
специальных средств
Министерство обороны РФ
Адрес: 119160, Москва,
Хорошёвское шоссе, д. 76б*

Аннотация

В статье предложена новая структурная схема формирования каскадного кода, которая, в отличие от известных, содержит внутренний кодер с параллельной передачей ортогональных кодовых последовательностей, внутренний декодер с корреляционным декодированием ортогональных кодовых последовательностей (декодирование по максимуму правдоподобия), внешний кодек с эквидистантными недвоичными кодами.

Ключевые слова: каскадное кодирование данных, ортогональные последовательности Уолша-Адамара, коэффициент взаимной корреляции, помехоустойчивость, вероятность ошибки декодирования символа, вероятность битовой ошибки.

Summary

The article proposes a new structure scheme of cascade code generation, which, unlike the known ones, contains an internal encoder with parallel transmission of orthogonal code sequences, an internal decoder with correlation decoding of orthogonal code sequences (maximum likelihood decoding), an external codec with equidistant non-binary codes.

Keywords: cascading data encryption, orthogonal sequences, Walsh-Hadamard transform, coefficient of mutual correlation, noise immunity, error probability of decoding symbol, the probability of bit error.

Известно [1], что эффективным способом борьбы с пакетами ошибок в каналах передачи является каскадное кодирование данных. При этом в качестве внешнего кода (кода первой степени) в основном используются недвоичные коды Рида-Соломона, а в качестве внутреннего кода (кода второй степени) используются помехоустойчивые (избыточные) двоичные коды (блочные или сверточные). Так как внешний код обладает достаточной избыточностью (именно она определяет длину исправляемого пакета ошибок), и каждый недвоичный символ внешнего кода передается избыточной двоичной последовательностью, то общая избыточность каскадного кода велика, и требуются каналы передачи с достаточной полосой пропускания, которой может и не быть, или увеличивается время передачи каскадного кода (энергия сигнала) при фиксированной полосе пропускания канала передачи.

Цель работы. Уменьшить избыточность каскадного кода и сохранить требуемые показатели помехоустойчивости (вероятность битовой ошибки в принятых данных и длину пакета исправляемых двоичных символов).

Известны системы передачи данных [2], которые используют параллельную передачу данных ортогональными двоичными кодами для кодового уплотнения данных и формирования безизбыточного группового сигнала. Также известны системы передачи данных с каскадным кодированием, которые используют эквидистантные недвоичные коды (длина кода N равна минимальному кодовому расстоянию D_{min}) для борьбы с пакетами ошибок при оптимальном декодировании [3,4]. При этом значительно сокращается время декодирования по сравнению с известными алгоритмами Рида-Соломона.

Применим ортогональное кодирование недвоичных символов эквидистантного помехоустойчивого кода с параметрами $(N, K, D_{min}=N)$ для формирования каскадного кода (рисунк 1),

где K – число недвоичных информационных символов.

На передающей стороне входные данные параллельным кодом поступают на вход недвоичного кодера эквидистантного кода (НКЭК), на выходе которого под действием тактовых импульсов (ТИ) формируется недвоичная кодовая комбинация [3]. Каждый недвоичный символ НКЭК последовательно возбуждает один из входов шифратора (CD), на выходе которого формируется k -разрядный ($k = \log_2 Q$) параллельный двоичный код, где Q – основание недвоичного кода.

Символы параллельного двоичного кода с выхода CD поступают на первые входы канальных кодеров (КК), на вторые входы которых поступают двоичные ортогональные кодовые последовательности Уолша-Адамара $Wal_i(t)$, имеющие длину n , минимальное кодовое расстояние $d_{min} = n/2$, число последовательностей $M = n$ [1]. Построение таких последовательностей представлено на рисунке 2.

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} -Wal_1(t); & n = 2 \\ -Wal_2(t); & M = 2 \end{matrix}$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & H_2 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} -Wal_1(t); & N=4 \\ -Wal_2(t); \\ -Wal_3(t); \\ -Wal_4(t); & M=4 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$H_8 = \begin{bmatrix} H_4 & H_4 \\ H_4 & H_4 \end{bmatrix}, n = M = 8 \quad ; \dots$$

$$H_{64} = \begin{bmatrix} H_{32} & H_{32} \\ H_{32} & H_{32} \end{bmatrix}, n = M = 64$$

Рис. 2. Построение последовательностей Уолша-Адамара

Канальные кодеры представляют собой известные сумматоры по модулю два, на выходе которых формируется инверсная последовательность $Wal_i(t)$ при поступлении единичного символа, или последовательность $Wal_i(t)$ при поступлении нулевого символа.

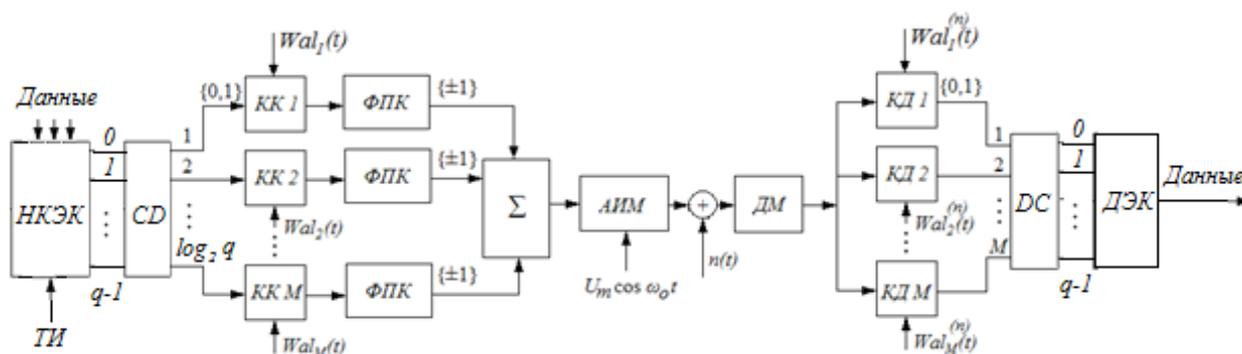


Рис. 1. Структурная схема кодирования данных с эквидистантным недвоичным и ортогональным двоичным кодами

Двоичные символы {1,0} с выходов КК поступают на формирователи полярного кода (ФПК) в виде символов {+1,-1}. Далее в сумматоре (Σ) формируется многоуровневый групповой сигнал.

Пример формирования группового сигнала для $n=8$ показан в таблице 1.

Таблица 1
Формирование группового сигнала

Входной код (выход CD)	Сигналы на выходах ФПК							
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
0	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1
0	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
0	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
0	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
0	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
0	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
Сигнал на выходе сумматора	+6	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2

Групповой сигнал поступает на модулятор (М), который переносит низкочастотный сигнал в область радиочастот. В качестве модулятора могут использоваться амплитудные, частотные или фазовые модуляторы.

В радиолинии на передаваемый сигнал действуют различные виды помех $n(t)$.

В радиоприемнике осуществляется демодуляция (ДМ) принятого группового сигнала и корреляционное канальное декодирование в декодерах (КД). Структурная схема корреляционного канального декодера представлена на рисунке 3.

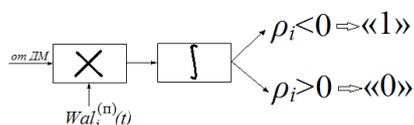


Рис. 3. Структурная схема КД

Принятый групповой сигнал с возможными искажениями перемножается на известные приемной стороне полярные ортогональные двоичные последовательности $Wal_i^{(n)}(t)$ с последующим вычислением коэффициента взаимной корреляции ρ_i . Если $\rho_i < 0$, то принимается решение в пользу единичного символа, если $\rho_i > 0$, то выносится решение в пользу нулевого символа, если $\rho_i = 0$, то осуществляется стирание символа.

Для примера, представленного в таблице 1, результаты декодирования будут следующими:

- в первом канале декодирования
+6 -2 -2 2 -2 -2 -2 -2 - групповой сигнал;

x

$$\frac{+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1}{+6 -2 -2 -2 -2 -2 -2 -2} \text{ - последовательность } Wal_1^{(n)}(t); \quad \rho_1 = -8, \text{ что соответствует «1»}$$

и это правильное решение;

- во втором канале декодирования

+6 -2 -2 2 -2 -2 -2 -2 - групповой сигнал;

x

$$\frac{+1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 -1}{+6 -2 -2 +2 -2 +2 -2 +2} \text{ - последовательность } Wal_2^{(n)}(t); \quad \rho_2 = +8, \text{ что соответствует «0»}$$

и это правильное решение;

- в третьем и последующем каналах декодирования получим

$$\rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = \rho_6 = \rho_7 = \rho_8 = +8,$$

что соответствует нулевому символу и это правильное решение.

Пусть в результате воздействия помех на выходе демодулятора получен искаженный групповой сигнал вида {+4;0;-2;-2;-1;-2;-2;0}, т.е. искажены четыре разряда многоуровневого сигнала. В этом случае результаты декодирования будут следующими:

- в первом канале декодирования

+4 0 -2 -2 -1 -2 -2 0 - искаженный групповой сигнал;

x

$$\frac{+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1}{+4 0 -2 -2 -1 -2 -2 0} \text{ - последовательность } Wal_1^{(n)}(t); \quad \rho_1 = -5, \text{ что соответствует «1»}$$

и это правильное решение;

- во втором канале декодирования

+4 0 -2 -2 -1 -2 -2 0 - искаженный групповой сигнал;

x

$$\frac{+1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 -1}{+4 0 -2 +2 -1 +2 -2 0} \text{ - последовательность } Wal_1^{(n)}(t); \quad \rho_1 = +3, \text{ что соответствует «0»}$$

и это правильное решение;

- соответственно для других каналов получим $\rho_3 = +7, \rho_4 = +9, \rho_5 = +4, \rho_6 = +5, \rho_7 = 9, \rho_8 = 1$, что соответствует «0» и это правильные решения, которые свидетельствуют о высокой эффективности такого декодирования.

В известной научной литературе [1,2] отсутствуют аналитические выражения, определяющие вероятность ошибочного декодирования кодовой комбинации внутреннего ортогонального кода. Поэтому авторами проведено имитационное моделирование канала передачи с ортогональным кодовым уплотнением данных и амплитудно-импульсной модуляцией сигнала (худший вариант по помехоустойчивости

при воздействии аддитивного белого гауссовского шума), в результате которого впервые получена аппроксимационная зависимость вероятности ошибочного декодирования кодовой комбинации ортогонального кода на выходе дешифратора ДС (рисунки 1) $P_M=f(h_0^2, M=n=8)$ в виде

$$P_M \cong 1,556 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,014 \cdot h_0^2} - 8,574 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-2,249 \cdot h_0^2}; \quad (1)$$

где h_0^2 – отношение сигнал/шум, дБ.

Построение внешнего недвоичного ($Q=256$) эквидистантного кода представлено в работе [3], где также имеются выражения для оценки вероятности ошибочного декодирования (оптимальное декодирование) $P_{ош}=f(P_M, N)$ кодов различной длины N .

Вероятность символьной ошибки P_E недвоичного ($Q=256$) эквидистантного кода на выходе декодера эквидистантного кода (ДЭК) при $N \leq 12$ определяется выражением [4]

$$P_E = \frac{1}{2} \sum_{i=N-1}^1 i C_n^i P_M^i (1-P_M)^{M-i}, \quad (2)$$

а вероятность битовой ошибки в принятых данных равна

$$P_b = \frac{1}{2} P_E. \quad (3)$$

В таблице 2 представлены оценки вероятностей P_M и соответствующие им значения h_0^2 для ортогонального внутреннего кода с длиной $n=8$.

Таблица 2
Значения P_M при $n=M=8$

h_0^2 , дБ	-2	-1,5	-1,0	-0,5	0
P_M	10^{-2}	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}

Анализ таблицы 2 показывает, что даже при использовании амплитудно-импульсной модуляции ортогональное кодирование данных позволяет работать при $h_0^2 \leq 0$ дБ.

Теперь рассмотрим вклад внешних недвоичных ($Q=256$) эквидистантных кодов в помехоустойчивость канала передачи данных. Для этого зафиксируем требование по вероятности $P_b = \text{const}$ и для различных значений N найдем

Таблица 3

Оценки допустимых вероятностей P_M

Параметры кодов $\{N, K=1\}$ $Q=256$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-3}$	$P_b=3,5 \cdot 10^{-4}$	$P_b=2,12 \cdot 10^{-5}$	$P_b=7,05 \cdot 10^{-7}$	$P_b=1,25 \cdot 10^{-8}$
$N=10, T_{п}=9$	0,425	0,364	0,27	0,178	0,11
$N=11, T_{п}=10$	0,46	0,4	0,3	0,21	0,14
$N=12, T_{п}=11$	0,49	0,43	0,34	0,24	0,17

допустимые вероятности ошибки P_M . Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 3, показывает, что если стоит задача обеспечить максимальную допустимую вероятность ошибочного приема кодовой комбинации внутреннего ортогонального кода (максимальную помехозащищенность передачи), то следует применять каскадные коды с внешним эквидистантным недвоичным кодом. В этом случае при $P_b \leq 10^{-4}$ допустимая вероятность $P_M \leq 0,27$ для кода с $N=10$ и вероятность $P_M \leq 0,34$ для кода с $N=12$, длина пакета исправляемых ошибок составляет $T_{п} > 70$ двоичных символов. Платой за это является расширение требуемой полосы пропускания канала передачи.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд., испр. Пер. с англ. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Кузнецов В.С., Кузнецов В.В. Нерешенные проблемы в области передачи информации и связи. М.: Горячая линия-Телеком, 2016. 60 с.
3. Зеленевский Ю.В., Шмырин Е.В. Синтез недвоичных корректирующих кодов преобразованиями двоичных последовательностей Рид-Маллера // Известия Института инженерной физики, 2013. №2 (28). С. 36-39.
4. Зеленевский В.В., Зеленевский Ю.В., Шмырин Е.В., Вальваков А.М., Савельев К.В. Имитационное моделирование оптимальных недвоичных декодеров // Известия Института инженерной физики, 2014. №2 (32). С.33-38.

УДК 621.396

МЕТОД ПРИОРИТЕТНОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНОГО КАНАЛЬНОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ НЕМАРКОВСКИХ ПРИОРИТЕТНЫХ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ

THE METHOD OF PRIORITY DISPATCHING OF ORBITAL CHANNEL RESOURCE ON THE BASIS OF NON-MARKOV PRIORITY QUEUING SYSTEMS



Евгений Николаевич Косяков

кандидат технических наук, доцент
профессор кафедры сетей и систем
связи космических комплексов
Военно-космическая академия
им. А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13
Тел.: +7(911)913-16-47
E-mail: e-kosyakov@yandex.com

Геннадий Андреевич Митряев

адъюнкт
Военно-космическая академия
им. А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, Санкт-Петербург,
ул. Ждановская, д. 13

Аннотация

В работе на основе модели системы обслуживания с приоритетами решается задача оперативного упорядочения очередей (диспетчеризации) сообщений на входе высокоорбитального спутника-ретранслятора, абонентами которого являются низкоорбитальные космические аппараты (НКА) и прочие летательные аппараты (ЛА). Отличительной особенностью обслуживаемых абонентов является не только разнородность формируемых потоков сообщений, но и ограниченность времени пребывания в зоне обслуживания спутника-ретранслятора (СР) в зависимости от баллистической траектории НКА. Поэтому приоритет в обслуживании того или иного абонента определяется не только видом передаваемой информации, но и остаточным временем радиоконтакта со СР. В работе предлагается метод формирования приоритетов в обслуживании абонентам различной срочности на основе минимизации вероятности несвоевременной передачи сообщений. Для оценивания указанных вероятностей для разных приоритетов применяется методика аппроксимации функций распределения задержки сообщений по начальным моментам на основе многочленов Лаггера.

Ключевые слова: диспетчеризация, спутник-ретранслятор, система массового обслуживания с приоритетом.

Summary

The work on the basis of the service system model with priorities solves the problem of operational ordering of message queues at the input of a high-orbit relay satellite, whose subscribers are low-orbit spacecraft and other aircraft. A distinctive feature of the serviced subscribers is not only the heterogeneity of the generated message flows, but also the limited time spent in the service area of the relay satellite, depending on the ballistic trajectory of the low-orbit spacecraft. Therefore, the priority in the service of a subscriber is determined not only by the type of information transmitted, but also by the residual time of radio contact with the satellite repeater. The paper proposes a method of forming priorities in service to subscribers of different urgency on the basis of minimizing the probability of untimely transmission of messages. For estimation of these probabilities for different priorities, the methodology used for approximation of distribution functions of the delay of the messages for initial points on the basis of Laguerre polynomials.

Keywords: dispatching, priority queuing system, relay satellite.

Для обеспечения непрерывного информационного взаимодействия центров управления с НКА и прочими ЛА на различных участках их баллистических траекторий необходимым элементом системы информационного обмена (СИО) становятся высокоорбитальные СР (рисунк 1). При этом качество выполнения своих функций СИО во многом определяется своевременностью предоставления каналов связи абонентам (НКА), которые перемещаются в зоне обслуживания СР с высокой скоростью [1]. Пересечение множества разнородных информационных потоков на входе СИО ставит нетривиальную задачу приоритетной диспетчеризации орбитального канального ресурса (ОКР) среди множества абонентов, различающихся как видом передаваемой информации, так и параметрами баллистических траекторий, что вносит дополнительные временные ограничения. В работе решается задача разработки метода приоритетной диспетчеризации ограниченного ОКР СИО с учетом перечисленных особенностей.

Различные варианты условий функционирования СИО, чередование пиковых нагрузок в одних радионаправлениях с простоями в других приводит к необходимости приоритетной диспетчеризации орбитального канального ресурса СИО между направлениями и потребителями. Кроме того, высокая подвижность целого ряда потребителей, (таких как НКА и ЛА) (рисунк 1) в ограниченных зонах радиовидимости требует решения целого ряда задач формирования очередности задействования орбитального ресурса с учетом как баллистических траекторий потребителей, ограничивающих время радиоконтакта, так и специфики передаваемой информации, предъявляющей свои требования к допустимой задержке [2].

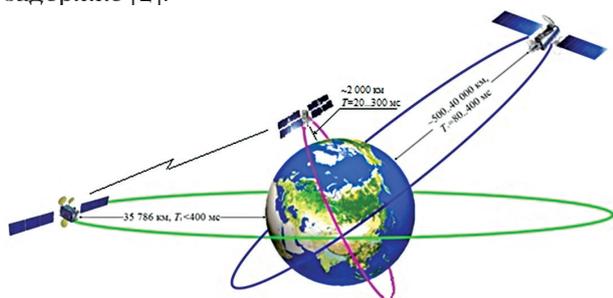


Рис. 1. Схема взаимодействия НКА с высокоорбитальным СР при разделении ОКР

Вопросы перераспределения и резервирования ресурсов сетей информационного обмена рассматривались в работах Косякова Е.Н. [3,6], Новикова Е.А. [1,8], Зиннурова С.Х. [7], Цветкова К.Ю., Родионова А.В., Акмолова А.Ф. [2], Топоркова И.С., Ковальского А.А. [7].

В результате имитационного моделирования выявлено, что вариабельность передаваемого трафика и различие длительности пребывания абонентов (НКА) в зоне радиовидимости существенно влияет на качество обслуживания абонентов СИО, что проявляется в уменьшении доли доступных каналов и увеличении времени ожидания пакетов в буфере потребителей.

Обслуживание абонентов СИО характеризуется следующими особенностями:

- выделение радиоресурса происходит под пиковые значения интенсивности информационного потока, при этом не учитываются статистические характеристики трафика, что, в конечном счете, выражается в недоиспользовании радиоресурса при его дефиците;
- существующие способы не позволяют учесть влияние информационного конфликта потоков на сетевом и транспортном уровнях, что приводит к значительному снижению пропускной способности и уменьшению числа организуемых направлений связи [3].

Следовательно, возникает противоречие, заключающееся в невозможности обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов СИО при передаче мультисервисного трафика в условиях ограниченного ОКР. Основная сложность заключается в необходимости удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых к качеству обслуживания разнородного трафика (данные, речь, видео- и т.п.), при ограниченных ресурсах. Решение такого рода задачи связано, по существу, с разработкой особой программы-диспетчера, реализующей в реальном масштабе времени процедуру разрешения конфликтов между разнородными абонентами, конкурирующими за общие ресурсы СИО. Подобные задачи диспетчеризации неоднородных потоков возникают и в других сетевых структурах: в АСУ реального времени при наличии нескольких распределенных объектов управления; в автоматизированных системах сбора и обработки информации и т.д. Их общей особенностью является использование в качестве математических моделей приоритетных систем массового обслуживания (СМО). При этом задача синтеза алгоритма диспетчеризации сводится к разработке некоторого правила (обычно эвристического) назначения приоритетов поступающим заявкам по тому или иному признаку (или их совокупности). В работе предлагается метод построения алгоритмов приоритетной диспетчеризации, который обеспечивает разбиение входящих потоков сообщений на приоритетные классы с учетом остаточного времени радиоконтакта путем минимизации вероятности несвоевременного обслуживания.

Схематичное представление модели поступления пакета с высшим приоритетом на вход канала обслуживания СР приведено на *рисунке 2*.

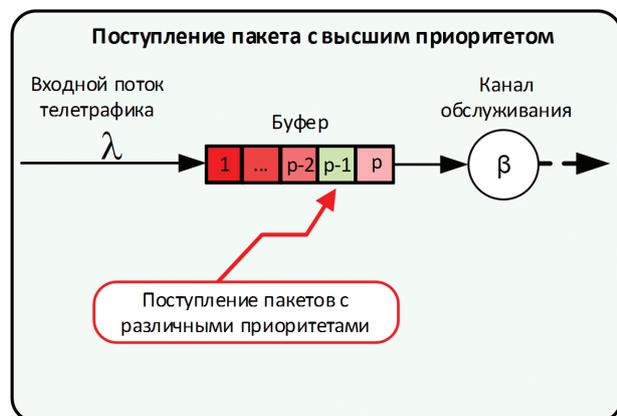


Рис. 2. Модель поступления пакета с высшим приоритетом на вход канала обслуживания СР

В качестве модели входного потока сообщений полагается простейший поток с интенсивностью λ , а длительность обслуживания (передачи) сообщения полагается величиной случайной с законом распределения $B(t)$ и средним значением:

$$\bar{b} = \bar{L}_c / C_k \quad (1)$$

где \bar{L}_c – средняя длина сообщения;
 C_k – пропускная способность канала.

Среди дисциплин обслуживания, использующих внешние приоритеты для поступающих сообщений, обслуживание в порядке приоритета является наиболее общим и наиболее естественным. Система с таким обслуживанием известна также под названием СМО со строгими, или фиксированными, приоритетами. В этой СМО сообщения устанавливаются в очереди в соответствии с их приоритетами и строго разделяются на этой основе на соответствующие классы. Таким образом, сообщение, имеющее приоритет p , присоединяется к требованиям своего класса и становится за всеми требованиями из класса p (и выше) перед всеми требованиями из класса $p-1$ (и ниже). Значение приоритета требования в этом случае остается постоянным во времени [4].

Сущность предлагаемого подхода для разрешения противоречия, заключающегося в невозможности обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов СИО при передаче мультисервисного трафика в условиях ограниченного ОКР, заключается в следующем. Как правило, поступающие на вход СИО заявки на передачу сообщений различаются по нескольким признакам $x_i \in X_i$, $i = \overline{1, M}$, где M – число различаемых признаков, а X_i – множества возможных

значений i -го признака. В качестве различаемых признаков могут быть выбраны тип сообщения, его срочность (выраженная в виде величины допустимой задержки), его объем, число допустимых транзитов, время пребывания НКА в зоне радиовидимости и т.д.

По каждому в отдельности из них нетрудно установить порядок предпочтения при выборе на обслуживание и постановке в очереди ОКР. Так, например, упорядочение по времени пребывания в очереди приводит к обычной дисциплине FIFO. Дополнительное упорядочение по типу пакетов (данные, речь и т.п.) приводит к известным приоритетным дисциплинам, используемым в наземных телекоммуникациях. Задача упорядочения существенно усложняется, когда необходимо учитывать несколько признаков, например, при разрешении конфликта, какой пакет «обслужить» в первую очередь: «срочный», но менее «важный», либо «важный», но менее «срочный»? Задача упорядочения по нескольким признакам решается следующим образом. Разобьем множество значений каждого признака X_i на несколько (k_i) непересекающихся классов X_{ij}

$$(\forall j = \overline{1, k_i - 1}: UX_{ij} = X_i)$$

и будем полагать значения i -го признака в пределах j -го класса неразличимыми, а соответствующие пакеты эквивалентными по i -му признаку. Для краткости эти классы эквивалентности назовем i -классами. Операция разбиения на классы по i -му признаку осуществляется путем выделения на множестве X_i некоторых граничных значений (порогов)

$$x_{ij}^*, j = \overline{1, k_i - 1},$$

разделяющих X_i на смежные классы X_{ij} . Отметим, что выбор порогов x_{ij}^* и управление ими является важным средством оптимизации и адаптации алгоритма диспетчеризации к изменению внешних условий.

Далее, находя пересечение i -классов по всем признакам, можно разбить все множество поступающих в СИО пакетов на непересекающиеся классы пакетов, эквивалентных по всем различаемым признакам (ε -классы). Очевидно, что число таких классов составляет:

$$N = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m.$$

Для определения алгоритма диспетчеризации необходимо найти оптимальный в соответствии с выбранным критерием порядок на множестве ε -классов (и, следовательно, отношение приоритета между соответствующими пакетами), а также определить оптимальные значения порогов x_{ij}^* , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, k_i - 1}$.

Данная задача решается стандартными методами дискретно-непрерывной оптимизации. Если отношение порядка по каждому признаку (внутри класса X_i) известно, то результирующее отношение на множестве ε -классов может быть найдено в виде лексикографического порядка, что существенно снижает трудоемкость задачи дискретной оптимизации [5].

Основной моделью для расчета показателей эффективности приоритетных дисциплин обслуживания является немарковская СМО вида $M_r/G_r/1$. Однако для данного класса моделей расчет основных вероятностно-временных характеристик таких, как функции (плотности) распределения вероятностей (ФРВ) времени ожидания заявок различных приоритетов, вызывает существенные затруднения в связи с необратимостью преобразований Лапласа-Стилтьеса (ПЛС) указанных распределений. Для получения этих характеристик в явном виде используется метод аппроксимации искомых плотностей распределений $f(t)$ по начальным моментам \bar{f}^i .

Наиболее удобной представляется аппроксимация на основе многочленов Лагерра, ортогональных с весом e^{-x} на вещественной полуоси $(0, \infty)$. Выбирая весовую функцию вида $e^{-\mu t}$, где μ – некоторый положительный коэффициент, можно представить плотность $f(t)$ в виде следующего ряда:

$$f(t) = e^{-\mu t} \sum_{n=0}^{\infty} a_n L_n(\mu t), t > 0, \quad (1)$$

где a_n – коэффициенты разложения вида:

$$a_n = \mu \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \frac{(-\mu)^i}{i!} \bar{f}^i;$$

$L_n(\mu t)$ – многочлены Лаггера:

$$L_n(\mu t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \frac{(-\mu t)^i}{i!}$$

Ограничив число членов ряда (1), после несложных преобразований аппроксимируемую плотность можно представить в виде взвешенной суммы распределений Эрланга:

$$f(t) \approx \sum_{n=0}^N g_n \frac{\mu(\mu t)^n}{n!} e^{-\mu t},$$

где

$$g_n = \frac{(-1)^m}{\mu} \sum_{i=0}^N \binom{i}{n} a_i \quad (2)$$

Достоинством предлагаемого метода аппроксимации [4,5] является простота определения параметров и удобное аналитическое представление аппроксимирующего выражения. Точность аппроксимации ограничивается лишь числом (N) известных начальных моментов. Практическая проверка данного метода показала его хорошую «работоспособность» для распределений с коэффициентами вариации в пределах интервала $(0,5, 1,5)$ и при

$$\mu = \left[\bar{f}^2 - (\bar{f}^1)^2 \right] / \bar{f}^1.$$

За пределами указанного интервала достижение высокой точности аппроксимации требует заметного увеличения числа учитываемых начальных моментов.

Начальные моменты распределений времени ожидания заявок k -го приоритета ($k = \overline{1, r}$), далее называемых k -заявками, могут быть найдены путем разложения правой и левой частей известных [4] выражений для ПЛС соответствующих распределений в степенные ряды вида:

$$\omega_k(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dW_k(t) = \int_0^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-st)^n}{n!} dW_k(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-s)^n}{n!} \bar{\omega}_k^n$$

где $\bar{\omega}_k^n$ – n -й начальный момент распределения $W_k(t)$, заданного своим ПЛС $w_k(s)$.

После алгебраических преобразований, приравняв члены с одинаковыми степенями s , можно получить общее рекуррентное выражение для некоторого n -го начального момента. Для систем обслуживания с относительным приоритетом это выражение имеет вид:

$$\bar{\omega}_k^n = (1 - a_k \bar{h}_k)^{-1} \left[\frac{p_0 \sum_{i=1}^{k-1} a_i \bar{\pi}_{k-i}^{n+1}}{n+1} + \frac{\sum_{i=k+1}^r a_i \bar{\pi}_{k-i}^{n+1}}{n+1} + a_k \sum_{j=1}^n \binom{n}{j} \frac{\bar{h}_k^{j+1}}{j+1} \bar{\omega}_k^{n-j} \right], \quad (3)$$

где a_i – интенсивность потока заявок k -го приоритета (k -заявок);

p_0 – вероятность того, что обслуживающий прибор окажется свободным для k -заявки в момент ее поступления;

$\bar{\pi}_{ki}^n$ – моменты распределения периода занятости системы заявками приоритета k и старше при условии, что этот период начался с обслуживания i -заявки;

\bar{h}_k^j – моменты распределения интервала времени, начинающегося с момента поступления на обслуживание k -заявки и заканчивающегося моментом освобождения системы от этой заявки и всех заявок старшего приоритета.

Для иллюстрации методики рассмотрим процесс диспетчеризации потока сообщений, который поступает на вход ретранслятора от некоторого числа НКА, различающихся остаточным временем пребывания (\hat{z}) в зоне радиовидимости ретранслятора [7]. Предположим, что поток сообщений является простейшим с интенсивностью λ . Тогда в качестве модели может быть использована система массового обслуживания (СМО) вида $M/G/1$ для которой заданы интенсивность входного потока сообщений λ и функция распределения времени обслуживания сообщений $B(t)$. Резерв времени, определяющий максимально допустимую задержку для каждого сообщения, представляет собой время пребывания источника сообщения

в зоне радиовидимости ретранслятора и является величиной случайной \hat{z} с некоторым распределением $D_z(t)$.

Для учета различий во времени допустимой задержки будем различать во входном потоке два класса сообщений: «срочные» – те, у которых резерв времени меньше некоторой величины τ_0 и «несрочные» – остальные [8]. Всем «срочным» сообщениям предоставляется отн осительный приоритет в обслуживании. Таким образом, исходная модель трансформируется в СМО с относительным приоритетом и двумя входными потоками: высшего приоритета с интенсивностью $\lambda D_z(\tau)$ и низшего приоритета с интенсивностью $\lambda [1 - D_z(\tau)]$. Качество обслуживания в исходной и приоритетной моделях оценивается величиной вероятности несвоевременной передачи сообщений:

$$\bar{P}_3 = \int_0^{\infty} [1 - V(t)] dD_z(t)$$

$$\bar{P}'_3 = D_z(\tau_0) \int_0^{\tau_0} [1 - V_1(t)] dD_z(t) + \bar{D}_z(\tau_0) \int_{\tau_0}^{\infty} [1 - V_2(t)] dD_z(t)$$

где $V(t)$ – функция распределения времени пребывания в исходной бесприоритетной модели;

$V_1(t)$ – функция распределения времени пребывания сообщений старшего приоритета в приоритетной модели;

$V_2(t)$ – функция распределения времени пребывания сообщений низшего приоритета.

Очевидно, что при прочих равных условиях величина \bar{P}'_3 является функцией параметра τ_0 , определяющего пороговое значение при разбиении входного потока на «срочные» и «несрочные» сообщения. Управление этим параметром и является средством адаптации к изменяющимся условиям функционирования СИО. Результаты моделирования представлены на рисунке 3. Анализ зависимостей показывает, что при передаче разнородного трафика от 8 НКА при допущении равномерного распределения длительности пребывания НКА в зоне радиовидимости геостационарного ретранслятора и с учетом снижения объема ОКР (К) на 10-30% использование приоритетного ранжирования потоков от НКА позволяет на 15-25% сократить потери при передаче сообщений за счет несвоевременной доставки, а также уменьшить задержки пакетов в буфере НКА (Т) на 40-80 мс. Таким образом, несмотря на существенную деградацию канально-

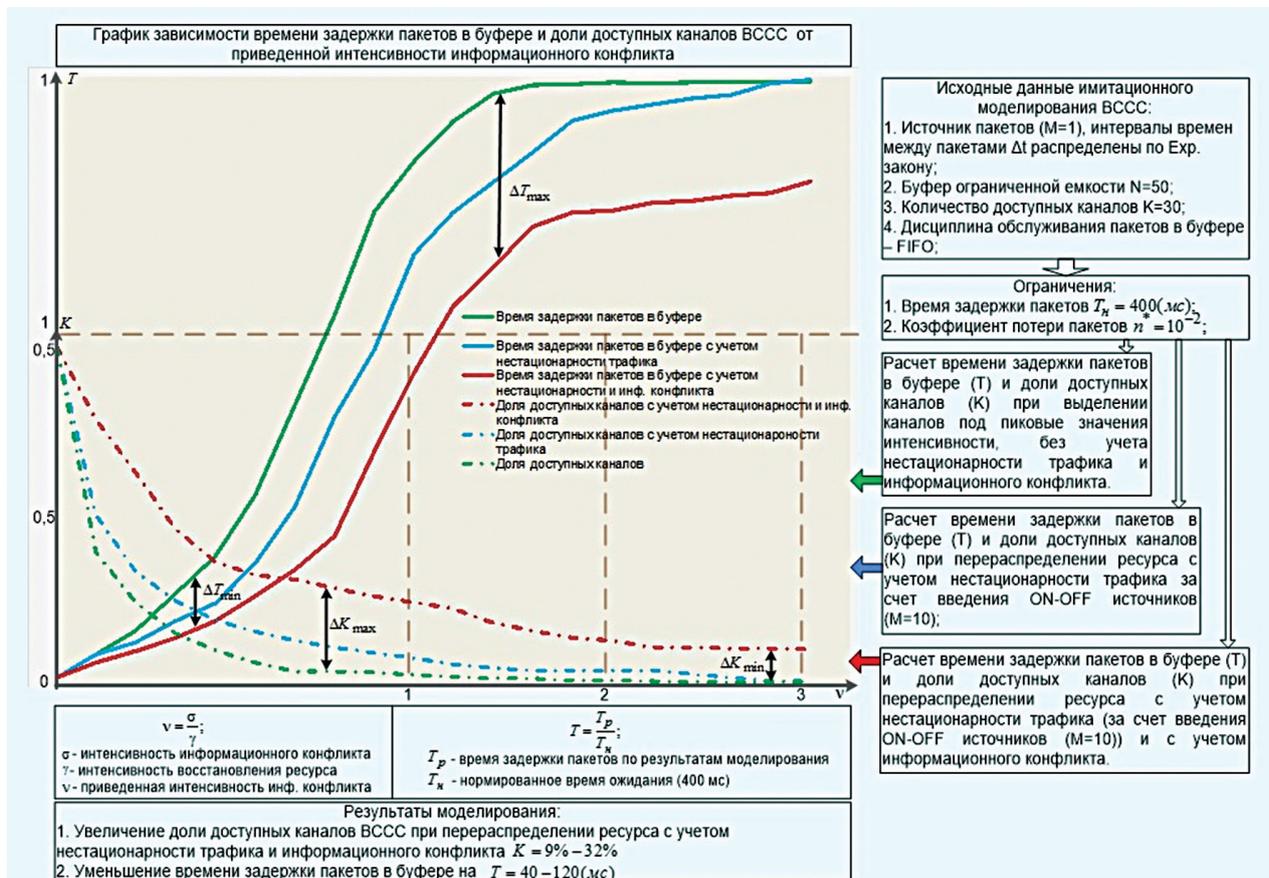


Рис. 3. Влияние уровня сокращения объема ОКР на среднюю задержку сообщений при использовании приоритетной диспетчеризации в сравнении с обслуживанием в порядке поступления

го ресурса СИО, применение даже двухуровневого ранжирования потока сообщений на «срочные» и «несрочные» позволяет в значительной мере компенсировать последствия деструктивных воздействий.

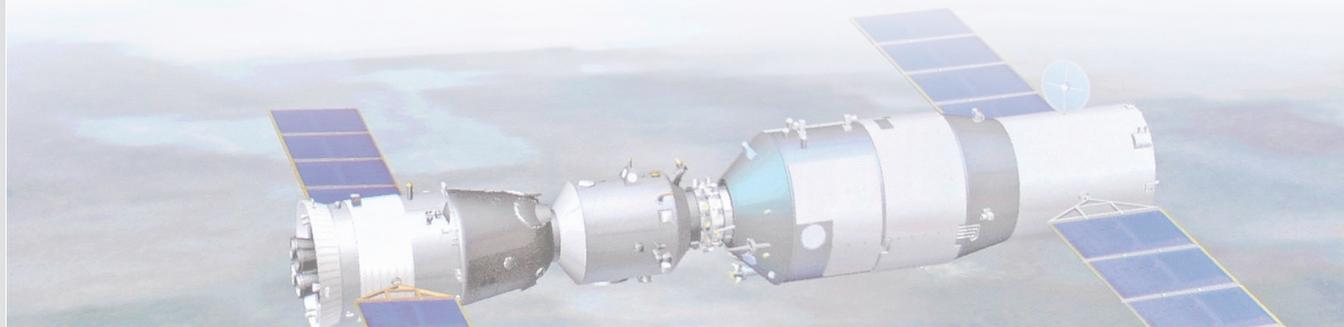
Очевидно, что разбиение входных сообщений лишь на два класса является простейшим способом учета неоднородности входного потока. Этот подход легко может быть распространен и для более детального учета неоднородности сообщений как по данному признаку, так и по целому ряду признаков. Это обстоятельство позволяет, в свою очередь, строить адаптивные процедуры диспетчеризации [6], которые путем управления порогами x_{ij}^* настраиваются на изменение параметров входных потоков информации и условий функционирования центра коммутации. Следует подчеркнуть, что изменение значений x_{ij}^* обеспечивает плавное перераспределение интенсивностей приоритетных потоков, соответствующих смежным классам эквивалентности, и, что особенно важно, меняет само правило назначения приоритетов отдельным категориям заявок (пакетов), значения признаков которых лежат в интервалах изменения значений порогов.

Заключение

Предложенный метод формирования приоритетных дисциплин обслуживания неоднородных потоков сообщений в СИО позволяет автоматизировать процесс диспетчеризации ОКР с учетом вида передаваемой информации и баллистических параметров траектории источников (НКА). Эффект от применения приоритетных дисциплин (снижение задержек и уровня потерь) становится заметным уже при двумерном ранжировании потоков по признаку остаточного времени радиоконтакта с ретранслятором. Поэтому применение «многомерной» приоритетной диспетчеризации ОКР с учетом дополнительных параметров передаваемой информации (сообщений) и ее источников (НКА) позволит в существенной мере повысить устойчивость функционирования СИО в условиях воздействия деструктивных факторов.

Литература

1. Новиков Е.А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы, 2014. № 2(69). С. 79-86.
2. Цветков К.Ю., Родионов А.В., Акмолов А.Ф. Динамическое перераспределение пропускной способности коммутируемого спутникового моноканала при использовании протоколов множественного доступа // Информационно-управляющие системы, 2006. № 5. С. 47-50.
3. Косяков Е.Н., Квасов М.Н., Митряев Г.А. Модель обслуживания телетрафика в ненадежном спутниковом канале с учетом задержки подключения резерва // В сборнике: Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники III Всероссийская научно-практическая конференция. Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского. Санкт-Петербург, 2016. С. 358-360.
4. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. Пер. с англ./ Под ред. Б.С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. 144 с.
5. Конвей Р.В., Максвелл В.А., Миллер Л.В. Теория расписаний. Пер. с англ./ Под ред. И.Е. Морозовой М.: Наука, 1975. 360 с.
6. Косяков Е.Н. Присяжнюк С.П. Адаптивная диспетчеризация потоков информации в системах управления распределенными объектами // Труды II Всесоюзн. совещания по проблеме «Комплексирование бортовых систем и новая информационная технология». Л., 1990.
7. Топорков И.С., Ковальский А.А., Зиннуров С.Х. Модель и алгоритм управления процессом резервирования ресурса сети спутниковой связи при обслуживании разнородного нестационарного трафика // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С. 37-47.
8. Новиков Е.А., Зиннуров С.Х. Модель гибкого обслуживания трафика сложной структуры и алгоритм оперативного резервирования дополнительных каналов в земных станциях спутниковой связи // Системы управления, связи и безопасности, 2017. № 1. С. 98-115.



УДК 621.371.32

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СКРЫТНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНОЙ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КРАТНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО- РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА *

EVALUATION OF THE ENERGY SECRECY OF A LOW-FREQUENCY SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM WITH AN ARBITRARY MULTIPLICITY OF SPATIAL DIVERSITY

Александр Федорович Чипига

кандидат технических наук, профессор
заведующий кафедрой информационной
безопасности автоматизированных систем
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет»
Адрес: 355029, г. Ставрополь,
пр-т. Кулакова, д. 2, корп. 9
Тел.: +7(962)400-76-63
E-mail: chipiga.alexander@gmail.com

Вячеслав Анатольевич Шевченко

кандидат технических наук
контрактный военнотехнический ВС РФ
Главное управление развития информационных
и телекоммуникационных технологий
Министерство обороны РФ
Адрес: 119160, Москва, Фрунзенская наб., д. 22/2
Тел.: +7(916)138-87-96
E-mail: shevv67@mail.ru



Владимир Петрович Пашинцев

заслуженный работник высшей школы РФ
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры информационной
безопасности автоматизированных систем
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет»
ведущий научный сотрудник МОУ «ИИФ»
Адрес: 355029, г. Ставрополь, пр-т.
Кулакова, д. 2, корп. 9
Тел.: +7(918)741-33-16
E-mail: pashintsev@mail.ru

Дмитрий Владимирович Костюк

аспирант кафедры информационной
безопасности автоматизированных систем
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский
федеральный университет»
Адрес: 355029, г. Ставрополь, пр-т. Кулакова, д. 2, корп. 9
Тел.: +7(988)866-19-11
E-mail: dkostiuk@ncfu.ru

Аннотация

Разработана имитационная модель низкочастотной системы спутниковой связи в среде Simulink Ver. 8.2 (MATLAB). Проведено имитационное моделирование приема сигналов при выборе несущих частот в диапазоне $f_0 \approx 30$ МГц–1 ГГц и применении одиночного ($n=1$) и разнесенного приема сигналов на несколько ($n=2, 4, 8$) антенн. На этой основе получены зависимости коэффициента энергетической скрытности от выбора несущей частоты. Анализ этих зависимостей показывает, что в диапазоне пониженных частот ($f_0 \approx 30$ МГц–100 МГц) можно увеличить коэффициент энергетической скрытности с $\gamma_{э(2)} \approx 24$ дБ при использовании двоянного приема до $\gamma_{э(8)} \approx 42$ дБ – при использовании приема на 8 антенн.

Ключевые слова: имитационное моделирование, низкочастотные спутниковые системы связи, замирания сигналов, параметр Райса, коэффициент энергетической скрытности, пространственный разнесенный прием.

Summary

The article presents the development of an imitation model of a low-frequency satellite communication system in the Simulink Ver. 8.2 (MATLAB) and the imitation modeling of SCS in selection of carrier frequencies in the range $f_0 \approx 30$ MHz–1 GHz and using of receive techniques on single ($n=1$) and several ($n=2, 4, 8$) antennas with spatial diversity. Based on this, the functions of the energy secrecy coefficient of carrier frequency were obtained. Analysis of these functions demonstrates that in range of reduced carrier frequencies ($f_0 \approx 30$ MHz–100 MHz) it is possible to increase the energy secrecy coefficient from $\gamma_{э(2)} \approx 24$ dB by using the spatial diversity reception on 2 antennas to $\gamma_{э(8)} \approx 42$ dB by using the spatial diversity reception on 8 antennas.

Keywords: imitation modeling, low-frequency satellite communication systems, signals fading, Rice parameter, coefficient of energy secrecy, spatial diversity reception method.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках выполнения проекта № 18 07 01020.

Известен [1, 2] способ обеспечения высокого коэффициента энергетической скрытности (γ , $\approx 22-34$ дБ) систем спутниковой связи (ССС) при близком размещении приемника радиоперехвата от наземного приемника СССР за счет применения пониженной несущей частоты ($f_0 \approx 30-100$ МГц) и разнесенного приема сигналов на несколько ($n = 2-4$) антенн. Однако столь высокие коэффициенты энергетической скрытности (ЭСк) достигаются только на несущей частоте $f_0 \approx 30$ МГц при условии возникновения наиболее глубоких (релеевских) замираний принимаемых сигналов (когда параметр Райса $\gamma^2 = 0$) и обеспечения некоррелированности замираний (когда коэффициент корреляции $R = 0$) на выходах разнесенных антенн. На более высоких частотах $f_0 > 30$ МГц, когда глубина замираний уменьшается ($\gamma^2 > 0$) и возрастает их пространственная корреляция ($R > 0$), коэффициент ЭСк снижается ($\gamma < 22-34$ дБ).

В работах [3, 4] для случая применения в низкочастотных СССР сдвоенного ($n = 2$) приема сигналов получена аналитическая зависимость

$$\gamma_{s(2)} = \psi(P_{\text{ош доп}}, \gamma^2, R, n = 2)$$

коэффициента ЭСк от допустимой вероятности ошибочного приема сигналов ($P_{\text{ош доп}}$), параметра райсовских замираний (Райса) принимаемого сигнала ($0 \leq \gamma^2 < \infty$) и коэффициента корреляции замираний ($0 \leq R \leq 1$) на выходах разнесенных антенн. Кроме того, установлены зависимости от выбора несущей частоты параметра Райса $\gamma^2 = \psi(f_0)$ и коэффициента корреляции замираний $R = \psi(f_0)$ в трансферном (спутниковом) канале связи. Благодаря этим зависимостям определена зависимость

$$\gamma_{s(2)} = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n = 2)$$

коэффициента ЭСк от выбора несущей частоты f_0 при заданной $P_{\text{ош доп}}$ и разнесенном приеме сигналов на $n = 2$ антенны.

Очевидно, что применение пространственно-разнесенного приема на большее ($n > 2$) число антенн позволит существенно повысить коэффициент ЭСк ($\gamma_{s(n)}$). Однако при кратности разнесения больше двух ($n > 2$) получить аналитическую зависимость

$$\gamma_{s(n)} = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n > 2)$$

не представляется возможным ввиду следующих причин.

Коэффициент ЭСк $\gamma_{s(n)}$ при близком размещении приемника радиоперехвата от наземного приемника СССР определяется как отношение

$$\gamma_{s(n)} = h^2_{\text{доп(1)}} / h^2_{\text{доп(n)}}$$

допустимого отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника радиоперехвата $h^2_{\text{доп(1)}}$, использующего одну ($n = 1$) антенну, к допустимому отношению С/Ш на входе приемника СССР $h^2_{\text{доп(n)}}$,

использующего разнесенный прием на n антенн. При любом числе приемных антенн $n \geq 1$ допустимое отношение С/Ш $h^2_{\text{доп(n)}}$ определяется с помощью зависимости

$$P_{\text{ош}} = \psi(h^2, n),$$

как отношение С/Ш на входе приемника $h^2 = h^2_{\text{доп(n)}}$, при котором вероятность ошибки равна допустимому значению $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош доп}}$ (для СССР обычно $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$). Для определения допустимого отношения С/Ш на входе приемника низкочастотной СССР, использующего разнесенный прием на n антенн ($h^2_{\text{доп(n)}}$), необходимо оценить помехоустойчивость этой СССР, которая определяется зависимостью

$$P_{\text{ош(2)}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ от отношения С/Ш на входе приемника h^2 , параметра Райса γ^2 и коэффициента пространственной корреляции замираний R в n разнесенных антеннах.

Однако известные аналитические зависимости

$$P_{\text{ош(n)}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

ограничиваются случаями применения одиночного ($n = 1$) и сдвоенного ($n = 2$) приема. Аналитических зависимостей

$$P_{\text{ош(n)}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

для случая более высокой кратности разнесения ($n > 2$) не существует. Отсюда следует вывод, что целесообразно воспользоваться возможностями имитационного моделирования для построения зависимостей

$$P_{\text{ош(n)}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n),$$

на основе которых можно получить искомые зависимости

$$\gamma_{s(n)} = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n > 2).$$

Цель статьи заключается в разработке имитационной модели низкочастотной СССР для получения зависимостей

$$P_{\text{ош(n)}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n \geq 1)$$

вероятности ошибочного приема сигналов с райсовскими ($0 \leq \gamma^2 < \infty$) коррелированными ($0 \leq R \leq 1$) замираниями при произвольном числе ($n \geq 1$) приемных антенн и расчете на их основе зависимости

$$\gamma_{s(n)} = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n > 2)$$

коэффициента энергетической скрытности СССР от выбора несущей частоты f_0 при кратности разнесения антенн больше двух ($n > 2$).

Энергетический выигрыш при пространственно-разнесенном приеме зависит от схемы сложения ветвей разнесения. Наиболее эффективной и достаточно простой в реализации является схема когерентного сложения ветвей с некогерентной обработкой результирующего сигнала [5]. Имитационная модель низкочастотной СССР с разнесенным приемом сигналов на произвольное ($n \geq 2$) число разнесенных ан-

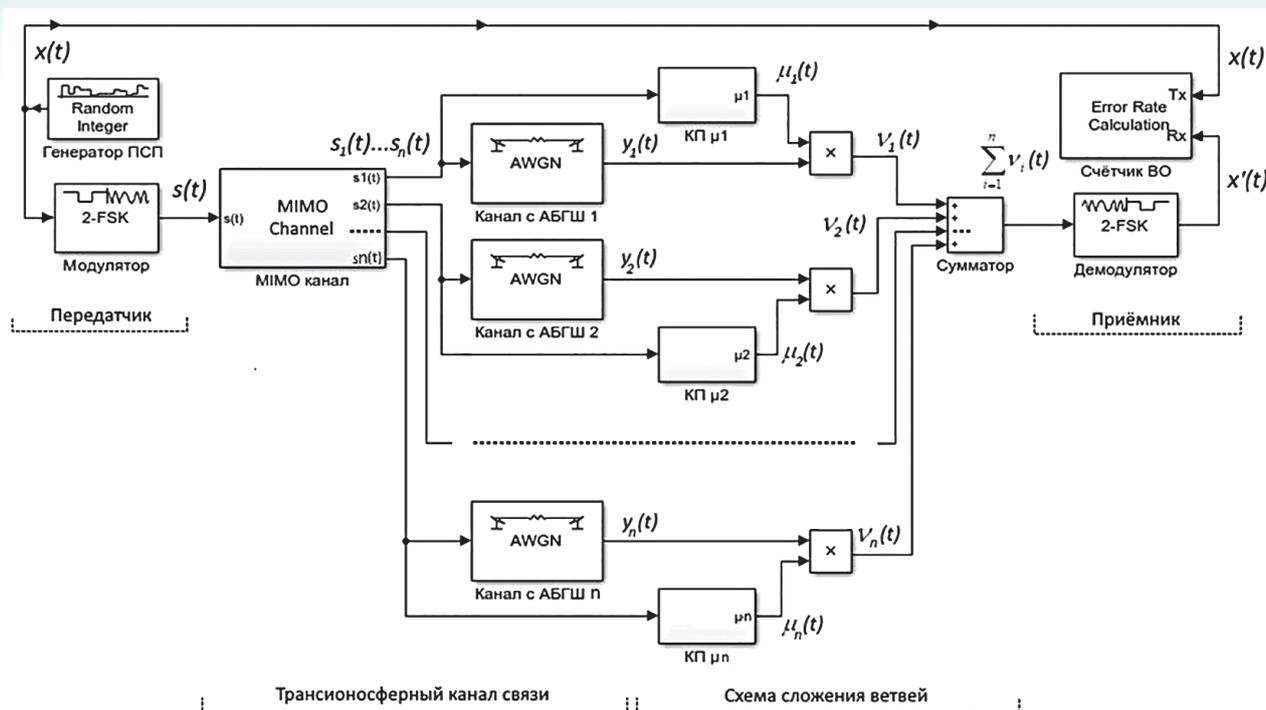


Рис. 1. Имитационная модель низкочастотной ССС с разнесенным приемом на произвольное ($n \geq 2$) число антенн, когерентным сложением ветвей и некогерентной обработкой результирующего сигнала

тени, когерентной схемой сложения ветвей разнесения и некогерентной обработкой результирующего сигнала может быть реализована в среде Simulink Ver. 8.2 (MATLAB), как показано на *рисунке 1* [6].

Имитационная модель низкочастотной ССС (*рисунком 1*) состоит из передатчика, трансионосферного канала связи, схемы сложения ветвей и приемника со счетчиком вероятности ошибки (ВО). В передатчике генератор псевдослучайной последовательности (блок Random Integer) формирует исходную последовательность информационных символов $x(t)$ с объемом алфавита (основанием кода) $M = 2$, который в модуляторе (блок 2-FSK) преобразуется ортогональный двоичный частотно-манипулированный сигнал $s(t)$. Далее сигнал $s(t)$ проходит через трансионосферный канал связи, в котором подсистемой MIMO Канал (блоки MIMO Channel, Select Columns) моделируются райсовские замирания ($0 \leq \gamma^2 < \infty$) и происходит разделение на n канальных сигналов $s_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) с коэффициентом корреляции замираний R , который может изменяться в пределах $0 \leq R \leq 1$. Блоки AWGN в добавляю к сигналам $s_i(t)$ с замираниями аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ) $\xi_i(t)$, спектральная плотность мощности N_{0i} которого может регулироваться.

После этого колебания

$$y_i(t) = s_i(t) + \xi_i(t)$$

поступают на схему когерентного сложения ветвей. Она требует априорных сведений о комплексных коэффициентах передачи $\mu_i(t)$ в каждой ветви. В данной схеме происходит «взвешивание» (умножение) принимаемых колебаний $y_i(t)$ пропорционально ожидаемой амплитуде сигналов $s_i(t)$, которая учитывается коэффициентом передачи (КП)

$$\mu_i(t) = s_i(t) / s(t).$$

Далее сформированные на выходах умножителей сигналы

$$v_i(t) = y_i(t) \cdot \mu_i(t)$$

подаются в сумматор и полученный результат $\sum v_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) поступает на вход демодулятора (блок 2-FSK).

Демодулятор производит некогерентное детектирование суммы сигналов

$$\sum v_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

и на выходе формирует последовательность информационных символов $x'(t)$. Счетчик вероятности ошибки (блок Error Rate Calculation) подсчитывает количество ошибочно переданных символов на основе сравнения принятого $x'(t)$ и переданного $x(t)$ потока данных и выдает значение вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$. Кривые зависимости

$$P_{\text{ош}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

строятся с помощью встроенного в MATLAB приложения BER Error Rate Analysis Tool.

По графикам зависимостей

$$P_{\text{ош}} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n \geq 1)$$

можно найти допустимые (для обеспечения $P_{\text{ош}} = P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$) отношения С/Ш на входе приемника при одиночном ($n = 1$) приеме $h_{\text{доп}(1)}^2$ и при разнесенном приеме $h_{\text{доп}(n)}^2$ сигналов на произвольное число ($n \geq 2$) антенн. Эти отношения С/Ш являются основой для получения коэффициента энергетической скрытности

$$\gamma_s = h_{\text{доп}(1)}^2 / h_{\text{доп}(n)}^2,$$

Однако для получения искомой зависимости

$$\gamma_s = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n > 2)$$

коэффициента ЭСк ССС от выбора несущей частоты (f_0) при кратности разнесения антенн $n > 2$ необходимо учесть известные [7 - 9] частотные зависимости параметра Райса $\gamma^2 = \psi(f_0)$ и коэффициента пространственной корреляции замираний $R = \psi(f_0)$ в транссионферном канале связи (КС).

Известно [7], что параметр райсовских замираний, характеризующий отношение мощности регулярной P_p составляющей принимаемого сигнала к мощности флуктуационной $P_{\text{фл}}$ составляющей, в транссионферном КС зависит только от среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуаций фазового фронта волны σ_φ на выходе неоднородной ионосферы:

$$\gamma^2 = P_p / P_{\text{фл}} = [\exp(\sigma_\varphi^2) - 1]^{-1}. \quad (1)$$

Величина σ_φ определяется согласно выражению

$$\sigma_\varphi = \sqrt{2(80,8\pi/c)\sqrt{l_s z_s} \sec \alpha (\sigma_{\Delta N} / f_0)}, \quad [\text{рад}], \quad (2)$$

где 80,8 – коэффициент, имеющий размерность $[\text{м}^3/\text{с}^2]$;

$l_s \approx 390$ м – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей;
 $z_s = 5 \cdot 10^5$ м – эквивалентная толщина однородного ионосферного слоя с электронной концентрацией, равной ее среднему значению на высоте h_m максимальной ионизации ионосферы $N(h_m) = N_m$;

f_0 – несущая частота в [Гц];

α – зенитный угол.

Поскольку в среднеширотной ионосфере типовыми являются значения максимальной средней ЭК $N_m \approx 6 \cdot 10^{11}$ эл/м³ и интенсивности мелкомасштабных ионосферных неоднородностей

$$\beta = \sigma_{\Delta N} / N_m \approx 3 \cdot 10^{-3},$$

то СКО флуктуаций ЭК $\sigma_{\Delta N}$ в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы на высоте максимальной ионизации ионосферы примерно равно $\sigma_{\Delta N} \equiv \sigma_{\Delta N}(h_m) = \beta N_m \approx 2 \cdot 10^9$ эл/м³.

Коэффициент пространственной корреляции замираний в антеннах, разнесенных на расстояние $\Delta \rho_a$, также определяется СКО флуктуаций фазового фронта волны σ на выходе ионосферы $[R = \exp[-(\Delta \rho_a / \Delta \rho_k)^2] = \exp[-(\Delta \rho_a \sigma_\varphi / l_s)^2]]$, (3)

где $\Delta \rho_k = l_s / \sigma_\varphi$ – интервал пространственной корреляции замираний.

Будем считать, что приемные антенны (от $n = 2$ до $n = 8$) размещены на одной прямой с постоянным интервалом разноса $\Delta \rho_a = \text{const}$. Величину последнего выберем типовой для коротковолновых систем связи с пространственно-разнесенным приемом сигналов [8]: $\Delta \rho_a = 300$ м. Очевидно, что корреляция замираний сигналов на выходах 1-й и 2-й (соседних) антенн $R_{12}(\Delta \rho_a)$ будет наибольшей, на выходах 1-й и 3-й антенн она уменьшается

$$R_{13}(2\Delta \rho_a) < R_{12}(\Delta \rho_a),$$

на выходах 1-й и 4-й антенн будет еще меньше

$$R_{14}(3\Delta \rho_a) < R_{13}(2\Delta \rho_a),$$

и так далее до выходов крайних (1-й и n -й) приемных антенн:

$$R_{1n}((n-1)\Delta \rho_a) < R_{1(n-1)}((n-2)\Delta \rho_a) < \dots < R_{12}(\Delta \rho_a).$$

В соответствии с типовыми параметрами среднеширотной ионосферы $\sigma_{\Delta N} \approx 2 \cdot 10^9$ эл/м³; $l_s \approx 390$ м; $z_s = 5 \cdot 10^5$ м и аналитическими выражениями (1 - 3) при транссионферном распространении радиоволн с несущими частотами $f_0 = 30$ -1000 МГц и зенитном угле $\alpha = 65^\circ$ в таблице 1 приведены значения СКО флуктуаций фазового

Таблица 1
Зависимость параметров замираний ССС от выбора несущей частоты

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f0, МГц	30	50	80	100	150	200	300	500	1000
σφ, рад	1,71	1,03	0,64	0,51	0,34	0,26	0,17	0,1	0,05
γ2	0,056	0,53	1,96	3,3	8,02	14,64	33,56	94,1	378
Δρк, м	227	379	607	758	1138	1517	2276	3793	7586
R12(Δρa)	0,18	0,53	0,78	0,85	0,93	0,96	0,98	0,99	0,998
R13(2Δρa)	0	0,08	0,38	0,535	0,76	0,85	0,93	0,98	0,99
R14(3Δρa)	0	0,003	0,11	0,25	0,54	0,7	0,85	0,95	0,98
R15(4Δρa)	0	0	0,02	0,08	0,33	0,54	0,76	0,9	0,975
R16(5Δρa)	0	0	0	0,02	0,18	0,38	0,65	0,86	0,961
R17(6Δρa)	0	0	0	0	0,08	0,24	0,54	0,8	0,945
R18(7Δρa)	0	0	0	0	0,03	0,15	0,43	0,74	0,926

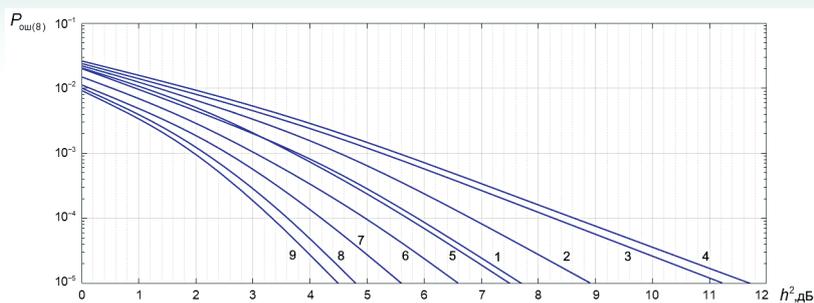


Рис. 2. Графики зависимости $P_{ош(8)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n = 8)$ для оценки помехоустойчивости ССС при различных значениях несущих частот f_0 :
1) 30 МГц; 2) 50 МГц; 3) 80 МГц; 4) 100 МГц; 5) 150 МГц; 6) 200 МГц; 7) 300 МГц; 8) 500 МГц; 9) 1000 МГц

фронта волны σ_ψ на выходе неоднородной ионосферы, параметра Райса γ^2 , интервала пространственной корреляции замираний $\Delta\rho_k$ и коэффициента корреляции замираний R_{Jn} на выходах $n = 1, \dots, 8$ приемных антенн при $\Delta\rho_a = 300$ м.

Анализ полученных в таблице 1 значений параметра Райса $\gamma^2 = \psi(f_0)$ и коэффициента корреляции замираний $R = \psi(f_0)$ в трансionoсферном КС показывает, что с уменьшением несущей частоты в ССС с традиционных значений $f_0 = 1$ ГГц до наименьших $f_0 = 30$ МГц параметр Райса уменьшается с $\gamma^2 = P_p/P_{фл} \approx 380$ (т.е. замириания практически отсутствуют) до $\gamma^2 = P_p/P_{фл} \approx 0,05$ (регулярная составляющая замираний практически отсутствует, т.е. замириания почти релейские), коэффициент пространственной корреляции замираний снижается с $R \approx 1$ (почти полная корреляция) до $R \approx 0$ (декорреляция).

С использованием имитационной модели (рисунок 1) и данных таблицы 1 (γ^2, n, R_{Jn}) проведено имитационное моделирование работы низкочастотной ССС с передачей сигналов по

трансionoсферным КС со статистически однородными коррелированными ($0 \leq R \leq 1$) райсовскими ($0 \leq \gamma^2 < \infty$) замирианиями и применением одиночного ($n = 1$) и разнесенного приема сигналов на $n = 2, 4, 8$ антенн и получены кривые зависимостей

$$P_{ош(n)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n \geq 1).$$

В качестве примера на рисунке 2 представлены графики зависимости

$$P_{ош(8)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n = 8)$$

для оценки помехоустойчивости

ССС при использовании разнесенного приема сигналов на $n = 8$ антенн. Эти графики построены при различных несущих частотах $f_0 = 30-1000$ МГц в соответствии с данными таблицы 1.

Анализ рисунка 2 показывает, что при $f_0 = 30$ МГц значение допустимого для обеспечения $P_{ош} = P_{ош доп} = 10^{-5}$ отношения С/Ш составляет $h^2_{доп(8)} = 7,7$ дБ. По мере увеличения несущей частоты кривые помехоустойчивости сначала сдвигаются вправо до максимального значения $h^2_{доп(8)max} = 11,7$ дБ при $f_0 = 100$ МГц, а затем сдвигаются влево до минимального значения $h^2_{доп(8)min} = 4,5$ дБ при несущей частоте $f_0 = 1000$ МГц. Эти изменения обусловлены тем, что согласно таблице 1 на частоте $f_0 = 30$ МГц замириания принимаемых сигналов в ССС имеют почти релейский характер ($\gamma^2 = P_p/P_{фл} \approx 0,056$) и слабо коррелированы ($R_{12} \approx 0,18$). На частоте $f_0 = 100$ МГц замириания принимаемых сигналов будут иметь меньшую глубину (они имеют райсовский характер с параметром $\gamma^2 = P_p/P_{фл} \approx 3,3$) и сильно коррелированы ($R_{12} \approx 0,85$). На частоте $f_0 = 1000$ МГц замириания принимаемых сигналов практически отсутствуют ($\gamma^2 = P_p/P_{фл} \approx 378$) и полностью коррелированы ($R_{12} \approx 0,998$).

По этим кривым найдем зависимость (см. рисунок 3) допустимого отношения С/Ш $h^2_{доп(8)}$ на входе приемника ССС с применением $n = 8$ разнесенных антенн от параметра Райса γ^2 и выбора несущей частоты f_0 . Аналогичным образом на рисунке 4 построены функциональные зависимости $h^2_{доп(n)} = \psi(f_0)$ для случаев приема сигналов на $n = 1$ антенну и разнесенного приема на $n = 2$ и $n = 4$ антенны.

Значения допустимых от-

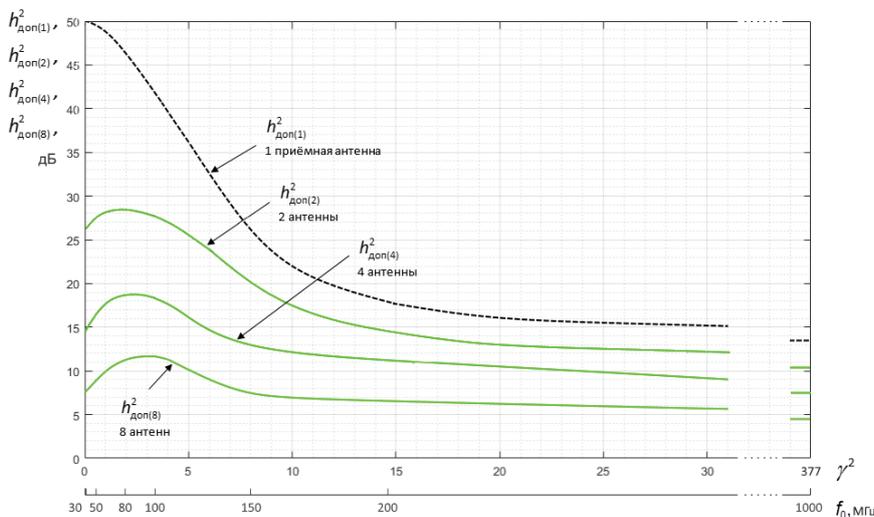


Рис. 3. Графики зависимостей допустимых отношений сигнал/шум $h^2_{доп(n)}$ на входе приемника ССС при приеме на $n = 1$ антенну и разнесенном приеме на $n = 2, 4, 8$ антенн от выбора несущей частоты f_0

Таблица 2
Зависимости допустимых отношений С/Ш от выбора несущей частоты ССС

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_0 , МГц	30	50	80	100	150	200	300	500	1000
γ^2	0,056	0,53	1,96	3,3	8	14,6	33,6	94,1	378
h2доп(1), дБ	49,99	49,5	46,2	42	26	18	15	13,9	13,5
h2доп(2), дБ	26,2	27,5	28,4	27,7	21	14,7	11,9	10,8	10,4
h2доп(4), дБ	14,5	16,5	18,8	18,3	13	11,2	8,7	7,9	7,5
h2доп(8), дБ	7,7	8,9	11,2	11,7	7,5	6,6	5,6	4,8	4,5
$\gamma_{\Sigma}(2)$, дБ	23,8	22	17,8	14,3	5	3,3	3,05	3,07	3,08
$\gamma_{\Sigma}(4)$, дБ	35,5	33	27,4	23,7	13	6,8	6,3	5,97	5,98
$\gamma_{\Sigma}(8)$, дБ	42,3	40,6	35	30,3	18,5	11,4	9,4	9,1	9

ношений С/Ш $h_{доп(n)}^2$ от выбора несущей частоты (f_0) в ССС и параметра райсовских замираний (γ^2) принимаемых сигналов приведены в *таблице 2*.

Анализ *рисунка 3* и данных *таблиц 1 и 2* показывает, что диапазоне пониженных до $f_0 = 80-100$ МГц несущих частот ССС наблюдается максимизация допустимых отношений С/Ш на входе приемника $h_{доп(n)}^2$ при использовании разнесенного приема на $n = 2, 4, 8$ антенн. Она обусловлена тем, что в этом диапазоне наблюдаются достаточно глубокие замирания принимаемых сигналов ($\gamma^2 \approx 2-3$) при относительно невысокой их пространственной корреляции ($R_{12} \approx 0,8$). По мере повышения несущей частоты ССС до традиционных значений $f_0 = 1000$ МГц наблюдается уменьшение допустимых отношений С/Ш на входе приемника до $h_{доп(n)}^2 \approx 10-4$ дБ при $n = 2-8$ по причине практического отсутствия замираний ($\gamma^2 \approx 378$) и их корреляции ($R_{12} \approx 1$) в разнесенных антеннах. Это соответствует известному [5] выводу, что выигрыш от разнесенного приема растет с увеличением глубины замираний принимаемых сигналов и снижением их пространственной корреляции, а также выводу о нецелесообразности применения пространственно-разнесенного приема в каналах связи без замираний.

Напомним, что коэффициент ЭСк $\gamma_{\Sigma(n)}$ при близком размещении приемника радиоперехвата от наземного приемника ССС определяется как отношение допустимого отношения С/Ш на входе приемника радиоперехвата $h_{доп(1)}^2$, использующего одну ($n = 1$) антенну, и отношения С/Ш $h_{доп(n)}^2$ на входе приемника ССС, использующего раз-

несенный прием на n антенн. Таким образом, полученные выше (*рисунок 3, таблица 1*) зависимости

$$P_{ош(n)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

позволяют рассчитать (*таблица 2*) коэффициент ЭСк $\gamma_{\Sigma(n)}$, выраженный в децибелах, как разность допустимых. По результатам *таблицы 2* на *рисунке 4* построены графики зависимостей коэффициента ЭСк $\gamma_{\Sigma(n)} \approx \psi(f_0, \gamma^2)$ в ССС при приеме сигналов на $n = 2, 4, 8$ антенн, от параметра Райса γ^2 и от выбора несущей частоты f_0 .

Анализ приведенных в *таблице 2* и на *рисунке 4* зависимостей $\gamma_{\Sigma(n)} \approx \psi(f_0, \gamma^2)$ показывает, что на традиционной для ССС несущей частоте $f_0 = 1000$ МГц при использовании $n = 2, 4, 8$ приемных антенн величина коэффициента ЭСк составляет $\gamma_{\Sigma(2)} \approx 3$ дБ, $\gamma_{\Sigma(4)} \approx 6$ дБ и $\gamma_{\Sigma(8)} \approx 9$ дБ соответственно. Так как корреляция замираний на несущей частоте $f_0 = 1$ ГГц составляет почти $R \approx 1$, такие значения коэффициентов ЭСк $\gamma_{\Sigma(n)}$ обусловлены просто увеличением суммарной площади приемных антенн в 2, 4 и 8 раз. Понижение несущей частоты ССС до $f_0 = 30-1000$ МГц, обуславливающее увеличение глубины замираний принимаемых сигналов до $\gamma^2 \approx 0,05-3,3$, и

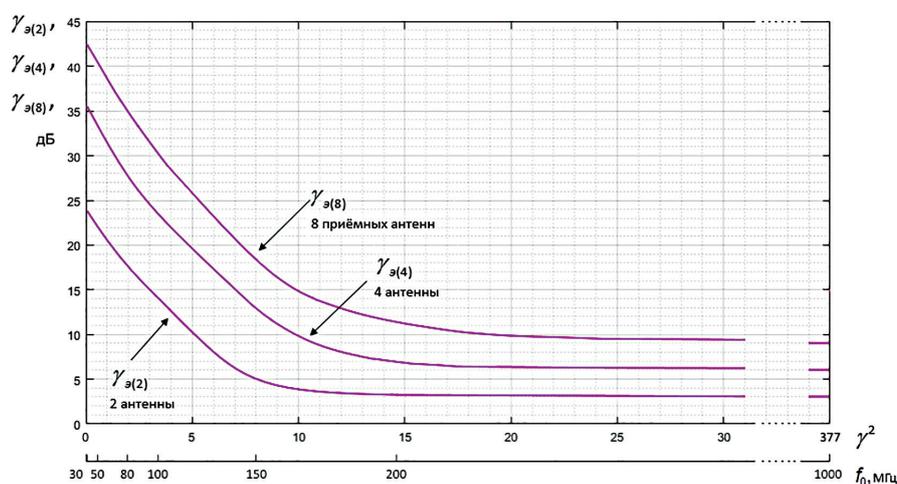


Рис. 4. Зависимости коэффициента энергетической скрытности ССС от выбора несущей частоты f_0 при разнесенном приеме сигналов на $n = 2, 4, 8$ антенн

применение разнесенного приема сигналов на $n = 2$ антенны обеспечивает повышение коэффициента ЭСк до $\gamma_{s(2)} \approx 24$ дБ. Разнесенный прием на $n = 4$ антенны обеспечивает коэффициент ЭСк в пределах $\gamma_{s(4)} \approx 35 \dots 24$ дБ, а прием на $n = 8$ антенн – $\gamma_{s(8)} \approx 42$ –30 дБ. Очевидно, что дальнейшее увеличение числа разнесенных антенн ($n > 8$) в ССС нецелесообразно, поскольку максимальный выигрыш в энергетической скрытности при переходе от сдвоенного приема к счетверенному составляет

$$\gamma_{s(4)} - \gamma_{s(2)} \approx 35 - 24 = 11 \text{ дБ},$$

а при переходе от счетверенного приема к восьмиприантенному он уменьшается до

$$\gamma_{s(8)} - \gamma_{s(4)} \approx 42 - 35 = 7 \text{ дБ}.$$

Выводы

Разработана имитационная модель низкочастотной ССС (рисунки 1) с пространственным разнесенным приемом сигналов с общими замираниями райсовского типа, которая реализована в среде графического моделирования Simulink Ver. 8.2 (MATLAB).

Данная имитационная модель позволяет получать графики зависимостей

$$P_{\text{ош}(n)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

вероятности ошибочного приема сигналов с райсовскими ($0 \leq \gamma^2 < \infty$) коррелированными ($0 \leq R \leq 1$) замираниями при произвольном числе ($n \geq 1$) приемных антенн. В качестве примера на рисунке 2 представлен график зависимости

$$P_{\text{ош}(8)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n = 8)$$

при использовании $n = 8$ приемных антенн.

На основе зависимостей

$$P_{\text{ош}(n)} = \psi(h^2, \gamma^2, R, n)$$

и выражений (1 - 3) на рисунке 4 приведены искомые зависимости

$$\gamma_s = \psi(f_0, P_{\text{ош доп}}, n)$$

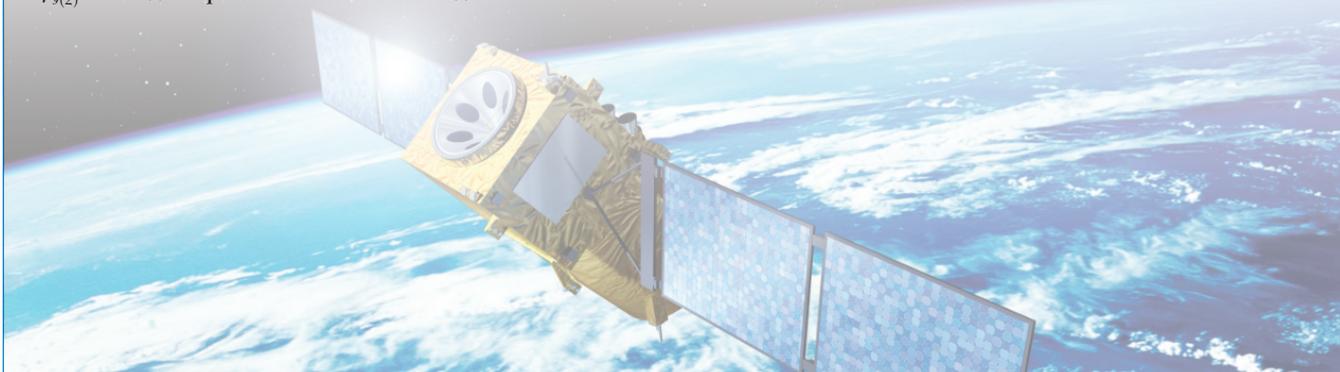
коэффициента энергетической скрытности ССС от выбора несущей частоты f_0 при разнесенном приеме сигналов на $n = 2, 4, 8$ антенн.

Анализ этих графиков указывает на возможность увеличения коэффициента энергетической скрытности в низкочастотных ССС с $\gamma_{s(2)} \approx 24$ дБ при использовании сдвоенного $n = 2$

приема сигналов до $\gamma_{s(4)} \approx 35$ дБ при счетверенном приеме и до $\gamma_{s(8)} \approx 42$ дБ – при использовании приема на 8 антенн.

Литература

1. Чипига А.Ф., Сенокосова А.В. Защита информации в системах космической связи за счет изменения условий распространения радиоволн // Космические исследования, 2007. Т.45. №1. С.59-66.
2. Чипига А.Ф., Сенокосова А.В. Способ обеспечения энергетической скрытности систем спутниковой связи // Космические исследования, 2009. Т.47. №5. С.428-433.
3. Цимбал В.А., Пашинцев В.П., Чипига А.Ф. Аналитическая зависимость энергетической скрытности спутниковой связи от выбора несущей частоты радиоволн // Труды 18 Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 17-19 апреля 2012 г. С.2113-2120.
4. Chipiga, A.F., Pashintsev, V.P., Tsybmal, V.A., Shimanov, S.N. Procedure for calculating the dependence of the energy concealment factor on carrier frequency selection for low-frequency satellite communications system // Automatic Control and Computer Sciences, 2016, №50(6), С.408-414.
5. Андронов И.С., Финк Л.М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. М.: Сов. радио, 1971. 408 с.
- Цифровая связь: Методические указания к выполнению лабораторных работ/ О.В. Малинкина, А.Б. Натальин, А.Б. Сергиенко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 44 с.
7. Маслов О.Н., Пашинцев В.П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи. Самара: ПГАТИ, 2006. 357 с.
8. Пашинцев В.П., Коваль С.А., Сенокосова А.В., Порсев А.В. Пространственная корреляционная функция коротковолнового канала связи // Известия Института инженерной физики, 2009. № 2(12). С.81-84.
9. Пашинцев В.П., Солчатов М.Э., Гахов Р.П., Еремин А.М. Модель пространственно-временного канала космической связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2003. № 5. С.63-69.



МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ СКОРОСТЕЙ В ДКМВ КАНАЛАХ СОСТАВНОГО ВИРТУАЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДОСТАВКЕ МНОГОПАКЕТНЫХ СООБЩЕНИЙ НА СЕАНСЕ СВЯЗИ *

THE METHOD OF OPTIMIZING SPEEDS IN THE HF CHANNELS OF THE COMPOSITE VIRTUAL CONNECTION DURING THE DELIVERY OF MULTI-PACKET MESSAGES DURING A COMMUNICATION SESSION

Владимир Анатольевич Цимбал

заслуженный деятель науки РФ
доктор технических наук, профессор
ведущий научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(985) 141-79-09
E-mail: tsimbalva@mail.ru

Василий Евгеньевич Тоискин

кандидат технических наук
старший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(985) 161-12-62
E-mail: vetoiskin@mail.ru

Максим Артурович Лягин

преподаватель
филиал ВА РВСН им. Петра
Великого (г. Серпухов)
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Бригадная, д. 17
Тел.: +7(4967) 79-02-27
E-mail: varvsn-serp@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается методика оптимизации скорости доставки многопакетных сообщений на сеансе связи в проклученном декаметровом радиоканале передачи данных, позволяющая получить такие минимально достаточные скорости, которые обеспечат доставку фиксированного объема информации до получателя с требуемой вероятностью за время, не превышающего заданное.

Ключевые слова: декаметровая радиосеть, виртуальное соединение, парциальный тракт передачи данных, канал передачи данных, вероятностно-временные характеристики, минимально достаточная скорость передачи информации.

Summary

In article the technique of optimisation of speed of delivery of multipackage messages on a communication session in compound connection short-wave the data transmission radio channel is considered, allowing to receive such is minimum sufficient speeds which will provide delivery of the fixed volume of the information to the addressee with demanded probability in time, not exceeding the set.

Keywords: short-wave radio network, virtual connection, part a data transmission path, data link, likelihood-time characteristics, minimum sufficient speed of information transfer.

Рассматривается сеть магистральных декаметровых (ДКМВ) каналов, используемая для доставки массивов целевой информации абонентами специального назначения (АСН) на большие расстояния (несколько тысяч километров) с учетом заданных вероятностно-вре-

менных характеристик (ВВХ). При этом ВВХ представляют собой требуемую вероятность доставки сообщений (массивов целевой информации) $P_{дос}^{треб}$ за время, не превышающее допустимое $T_{дос}^{доп}$ [1]. Доставляемый массив имеет объем I бит, который разделяется на u равных пакетов

* Исследования проводятся в рамках выполнения стипендиальных исследований Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики на 2018-2020 гг., № СП-4737.2018.3 «Оптимизация канального ресурса радиосетей мультисервисной сети декаметровой радиосвязи с проклучением каналов, обеспечивающей заданную оперативность информационного обмена».

размером L_n бит и представляет собой вследствие этого многопакетное сообщение (МПС). Проведенный анализ показал [2,3], что доставку МПС между АСН целесообразно осуществлять на основе виртуальных соединений, проключаемых в сети ДКМВ радиосвязи. При этом могут быть использованы виртуальные соединения, построенные как на основе одного парциального тракта передачи данных (ПТПД), так и на основе совокупности таких ПТПД каждый из которых включает в себя выносной ретранслятор сигналов (ВРС), нужный для улучшения качества ДКМВ связи [1]. Отметим, что каждый ПТПД состоит из прямого канала передачи данных (КПД), предназначенного для доставки полезной информации в виде пакетов, и обратного КПД, предназначенного для доставки квитанций на переданные пакеты. Известно [4], что на доставку целевых сообщений (МПС) между АСН накладываются жесткие ограничения по ВВХ. Следовательно, в ДКМВ радиосети требуется организовать составные виртуальные соединения таким образом, чтобы выполнялись указанные ограничения.

Применение совокупности ПТПД с ВРС для организации виртуального соединения оправдано в случае, когда либо расстояние между абонентами менее 300 километров, что приводит к низкому коэффициенту исправного действия (КИД) ДКМВ канала, либо когда трасса прямого распространения ДКМВ радиоволн подвержена деструктивным воздействиям, например, таким как ионосферное оружие типа «НААРР» или поражающие факторы ядерных взрывов, что приводит к замираниям сигналов сложного вида и, как результат, к существенной межсимвольной интерференции, что резко снижает реальную скорость передачи информации [8].

Также известно, что для ДКМВ радиосети хорошо применим протокол типа Х.25 [2], при использовании которого указанные ВВХ обеспечиваются канальным и физическим уровнями [3]. При этом показателем эффективности физического уровня принято считать коэффициент исправного действия канала (КИД) [5], обеспечивающий значение вероятности ошибки на элементарный символ в диапазоне не более допустимой величины. Для ДКМВ канала КИД, как правило, должен быть не менее 0,85-0,95, при этом допустимая вероятность ошибки на элементарный символ равна $5 \cdot 10^{-2}$ [5].

Выполнение требований по ВВХ доставки МПС в таких условиях протокол виртуального соединения в ДКМВ радиосети реализует за счет обратной связи: на переданный пакет всегда ожидается приход квитанции. При не-

доведении пакета реализуется его повтор через тайм-аут. Необходимо отметить, что увеличение количества повторов (g) при ограничении на время доставки целевого сообщения требует увеличения минимально достаточной скорости передачи в прямом и обратном каналах ПТПД.

Именно поэтому актуальной является задача нахождения минимально достаточных (оптимальных) скоростей передачи в ДКМВ каналах составного виртуального соединения при доставке МПС на сеансе связи. Такое составное виртуальное соединение состоит из совокупности ПТПД, проключенных на базе приемо-передающих комплексов (ППК) радиосвязи, размещенных на ВРС. Так как в каждом ПТПД прямой и обратный КПД на сеансе связи имеют свои вероятности ошибки на элементарный символ, то скорости передачи в каналах ПТПД, обеспечивающие общие ВВХ доставки МПС, будут разные. Нахождение распределения минимально достаточных скоростей в КПД одного ПТПД описано в [6]. Задача нахождения распределения минимально достаточных скоростей в КПД совокупности ПТПД ставится и решается впервые.

Следует отметить, что для обеспечения требуемой скорости передачи данных в отдельном ПТПД может потребоваться использование нескольких ППК для параллельной передачи МПС в прямом КПД [8].

Задача минимизации скоростных параметров в составном виртуальном соединении заключается в нахождении минимально достаточных скоростей прямого и обратного КПД каждого отдельного ПТПД, задействованного в виртуальном соединении. Формально данная задача ставится так.

Найти:

$$\{V^*_1, V^*_2 \dots V^*_i \dots V^*_n\} = \arg \min_{\{V_1, V_2 \dots V_i \dots V_n\}} (V_1 + V_2 + \dots V_i + \dots V_n) \quad (1)$$

При ограничениях на ВВХ доставки МПС:

$$P_{\text{доп}}(t \leq T_{\text{доп}}^{\text{доп}}) \geq P_{\text{доп}}^{\text{треб}};$$

$$V_1 = \overline{V_1}_{\min}, \overline{V_1}_{\max}; \quad V_2 = \overline{V_2}_{\min}, \overline{V_2}_{\max} \quad (2)$$

$$V_i = \overline{V_i}_{\min}, \overline{V_i}_{\max}; \quad V_n = \overline{V_n}_{\min}, \overline{V_n}_{\max}$$

где $V_i = V_{\text{КПД } i \text{ (пр)}} + V_{\text{КПД } i \text{ (обр)}}$ – скорость передачи информации в каждом i -м канале отдельного ПТПД, состоящего из прямого КПД ($V_{\text{КПД } i \text{ (пр)}}$) и обратного КПД ($V_{\text{КПД } i \text{ (обр)}}$).

Нахождение оптимальных (минимальных) скоростей прямого и обратного КПД можно получить на основе результатов применения математической модели доставки МПС с последующей формулировкой и решением задачи нелинейного программирования. Данная задача имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (V_1, \dots, V_i, \dots, V_n) \rightarrow \min \\ \frac{C_1^{(np)} + C_1^{(обр)}}{V_{КПД(np)} + V_{КПД(обр)}} + \dots + \frac{C_i^{(np)} + C_i^{(обр)}}{V_{КПД(np)} + V_{КПД(обр)}} + \dots + \frac{C_n^{(np)} + C_n^{(обр)}}{V_{КПД(np)} + V_{КПД(обр)}} \leq T_{дое}^{доп} \end{array} \right. \quad (3)$$

где $C_i^{(np)} = K_i^{(np)} \cdot L_k$ – объем передаваемых бит в совокупности кадров в прямом КПД каждого i -го отдельного ПТПД;

$C_i^{(обр)} = K_i^{(обр)} \cdot L_k$ – объем передаваемых бит в совокупности кадров в обратном КПД каждого i -го отдельного ПТПД;

$K_i^{(np)}, K_i^{(обр)}$ – количество шагов процесса доставки МПС до достижения требуемой вероятности $P_{дое}^{проб}$;

$T_{дое}^{доп}$ – допустимое время доставки МПС.

Данная задача решается методом неопределенных множителей Лагранжа, и результат решения данной задачи имеет вид:

$$V_i = \frac{C_i (\sqrt{C_1^{(np)}} + \sqrt{C_1^{(обр)}} + \dots + \sqrt{C_i^{(np)}} + \sqrt{C_i^{(обр)}} + \dots + \sqrt{C_n^{(np)}} + \sqrt{C_n^{(обр)}})}{T_{дое}^{доп}} \quad (4)$$

где V_i – скорость в прямом (обратном) КПД каждого ПТПД;

C_i – объем передаваемых бит в каждом i -ом отдельном ПТПД.

Решение данной задачи оптимизации скорости передачи информации в каждом отдельном ПТПД позволяет получить минимально достаточные скорости в виртуальном соединении между АССН при соблюдении требований по вероятности и времени доведения.

Рассмотрим пример решения задачи (1) при таких исходных данных.

Пусть виртуальное соединение между АСН-отправителем (АСН1) и АСН-получателем (АСН2) состоит из четырех ПТПД, в каждом из которых прямые и обратные каналы передачи данных (КПД) характеризуются своей вероятностью ошибки на элементарный символ p_o . Такое виртуальное соединение представлено на рисунке 1.

Согласно задаче (1) необходимо найти такие минимальные скорости передачи МПС в каждом ПТПД виртуального соединения, которые обеспечили бы выполнение заданных требований по ВВХ доставки МПС [7]. Отметим, что математические модели процесса информационного обмена МПС в отдельном ПТПД, на основе

которых находятся величины C_i , изложены в [2].

Для примера зададимся такими требованиями по ВВХ к доставке целевых сообщений: $P_{дое}^{проб} = 0,9$, $T_{дое}^{доп} \leq 20$ с. При этом, объем передаваемого МПС равен $I = 1000$ бит, количество пакетов в нем $u = 4$, размер одного пакета $L_n = 250$ бит, размер квитанции $L_{kv} = 24$ бита, количество пакетов в процедуре «скользящее окно» $u_{sk} = 4$, ограничение на физическую скорость в КПД ПТПД $V_{физ} = 1200$ бит/с. Кроме того, для обеспечения заявленной физической скорости $V_{физ}$ в первом и четвертом ПТПД применяется один ППК, а во втором и третьем ПТПД – два ППК, работающих параллельно.

Нахождение искомых скоростей будем производить для пяти вариантов помеховой обстановки в каждом ПТПД виртуального соединения (таблица 1).

Таблица 1
Варианты помеховой обстановки в ПТПД

№ варианта	№ПТПД			
	1	2	3	4
1	3*10-2	3*10-2	3*10-2	5*10-2
2	3*10-2	5*10-2	3*10-2	3*10-2
3	2*10-3	2*10-3	2*10-2	2*10-3
4	5*10-6	5*10-6	5*10-6	5*10-5
5	4*10-3	7*10-3	4*10-3	4*10-3

Учитывая, что по прямому КПД каждого ПТПД виртуального соединения будут доводиться информационные пакеты МПС и, соответственно, передаваться основной объем информации, то возможно превышение допустимой физической скорости $V_{физ}$ в каналах ДКМВ радиосети. Следовательно, требуется оптимизировать только скорость в прямом КПД V_i каждого ПТПД виртуального соединения.

Тогда рассмотрим результаты расчетов минимально достаточных скоростей только V_i при различных вариантах помеховой обстановки. Данные расчеты представлены в таблице 2 и в виде диаграммы зависимости минимально достаточной скорости V_i в каждом ПТПД виртуального соединения от помеховой обстановки (рисунок 2).

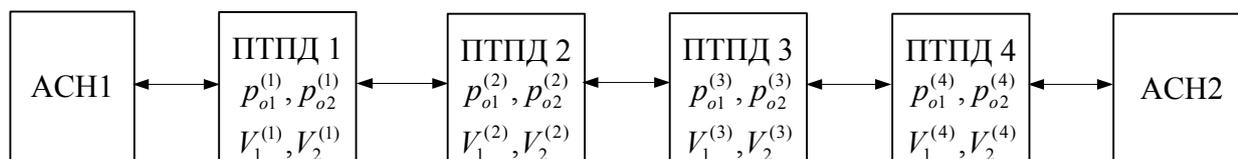


Рис. 1. Составное виртуальное соединение в ДКМВ радиосети, проключенное между двумя АСН

Таблица 2
Результаты расчетов V_1 в ПТПД, бит/с

№ варианта помеховой обстановки	№ПТПД			
	1	2	3	4
1	901	901	901	1452
2	702	1994	702	702
3	930	930	1437	930
4	329	329	329	659
5	519	734	519	519

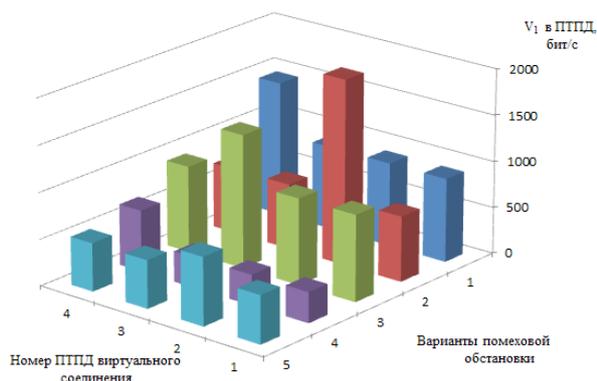


Рис. 2. Диаграмма зависимости минимально достаточной скорости V_1 в каждом ПТПД виртуального соединения от помеховой обстановки

Из полученных результатов следует, что имеется превышение значения допустимой физической $V_1^{(i)} \leq V_{\text{физ}}$ скорости при 1-м варианте помеховой обстановки в ПТПД №4, во 2-м – ПТПД №2, в 3-м – ПТПД №3. Последнее требует дополнительных ППК на ВРС, входящих в виртуальное соединение для выполнения требований по времени к доставке МПС. Требуемое количество ППК для каждого ПТПД представлено в таблице 3.

Таблица 3
Требуемое количество ППК для каждого ПТПД

№ варианта помеховой обстановки	№ПТПД			
	1	2	3	4
1	1	2	3	2
2	1	4	3	1
3	1	2	4	2
4	1	2	2	1
5	1	2	2	1

Однако исследования показали, что для некоторых вариантов помеховой обстановки в каналах ДКМВ радиосети возможно применить процедуру коррекции скоростей, которая заключается в следующем.

1. При превышении максимального значения

физической скорости в прямом КПД какого-либо ПТПД виртуального соединения $V_1^{(i)} > V_{\text{физ}}$ скорость такого прямого КПД приравнивается к физической $V_1^{(i)} = V_{\text{физ}}$.

2. Затем рассчитывается общее время доставки МПС $T_{\text{дov}}^{\text{доп}}$, но уже без учета времени на доставку МПС в корректируемом КПД

$$T_{\text{дov}}^{\text{доп}} = T_{\text{дov}}^{\text{доп}} - (T_{\text{np}}^{(i)} + T_{\text{обр}}^{(i)}). \quad (5)$$

В свою очередь, значения времен доставки пакетов по прямому КПД $T_{\text{np}}^{(i)}$ и квитанций по обратному каналу $T_{\text{обр}}^{(i)}$ находятся так:

$$T_{\text{np}}^{(i)} = \frac{C_1^{(i)}}{V_{\text{физ}}}, T_{\text{обр}}^{(i)} = \frac{C_2^{(i)}}{V_{\text{обр}}^{(i)}} \quad (6)$$

3. Затем производится коррекция минимально достаточных скоростей в оставшихся ПТПД по формуле (4) с учетом времени $T_{\text{дov}}^{\text{доп}}$.

Результаты применения данной процедуры коррекции скоростей применительно к результатам предыдущих расчетов показаны в таблице 4. Графически полученные результаты представлены на рисунке 3 в виде диаграммы зависимости скорректированных скоростей прямых КПД каждого ПТПД виртуального соединения от помеховой обстановки.

Таблица 4
Значения скоростей ПТПД после коррекции, бит/с

№ варианта	№ПТПД			
	1	2	3	4
1	1152	1152	1152	1200
2	1492	1200	1492	1492
3	1100	1100	1200	1100
4	329	329	329	659
5	519	734	519	519

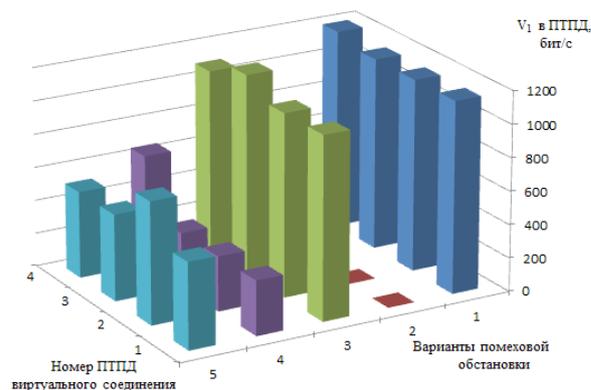


Рис. 3. Диаграмма зависимости скорректированных скоростей в каждом ПТПД виртуального соединения от помеховой обстановки

Из таблицы 4 следует, что для варианта помеховой обстановки №2 коррекция скоростей неэффективна, для вариантов помеховой обста-

новки №4 и №5 коррекция скоростей не требуется, а для вариантов помеховой обстановки №1 и №3 коррекция скоростей успешна.

Таким образом, сформирован научно-методический аппарат нахождения минимально достаточных скоростей передачи на сеансе связи в каналах виртуального соединения ДКМВ радиосети, обеспечивающих заданную своевременность информационного обмена МПС при скоростных ограничениях и различной помеховой обстановке в каналах. Основу такого научно-методического аппарата составляет алгоритм, представленный на рисунке 4.

Обобщением данного алгоритма является методика нахождения оптимальных сеансовых параметров виртуального соединения между АСН-отправителем и АСН-получателем, основными этапами которой являются:

Ввод исходных данных (требования заказчика (объем передаваемой информации I ; требуемая вероятность доведения $P_{\text{дов}}^{\text{треб}}$; допустимое время доведения $T_{\text{дов}}^{\text{доп}}$) и параметры виртуального соединения (количество ПТПД (w); максимальное количество повторов (g_{max}) каждого пакета МПС при его доставке по виртуальному соединению; максимальная физическая скорость ($V_{\text{физ}}$) в каждом ПТПД виртуального соедине-

ния; длина пакетов (L_n) на которые разбивается весь объем передаваемой информации; вероятность ошибки на элементарный символ p_o на сеансе связи в прямом и обратном КПД каждого ПТПД виртуального соединения)).

Этап 1 методики: нахождение числа передаваемых пакетов (u) единого для всех ПТПД виртуального соединения.

Этап 2 методики: нахождение вероятности доведения МПС ($P_{\text{дов}}$) по ПТПД с наибольшей вероятностью ошибки на элементарный символ по математической модели, принятие решения либо о применении процедуры «скользящего окна» (в случае хорошего качества прямого и обратного КПД), либо об увеличении количества повторов (g) каждого пакета МПС (в случае плохого качества прямого и обратного КПД). Вычисление значений $C_1^{(i)}, C_2^{(i)}$ по выбранной для этого ПТПД математической модели доставки МПС.

Этап 3 методики: нахождение вероятности доведения МПС ($P_{\text{дов}}$) для остальных ПТПД виртуального соединения по математической модели, принятие решения либо о применении процедуры «скользящего окна» (в случае хорошего качества прямого и обратного КПД), либо об увеличении количества повторов (g) каждого пакета

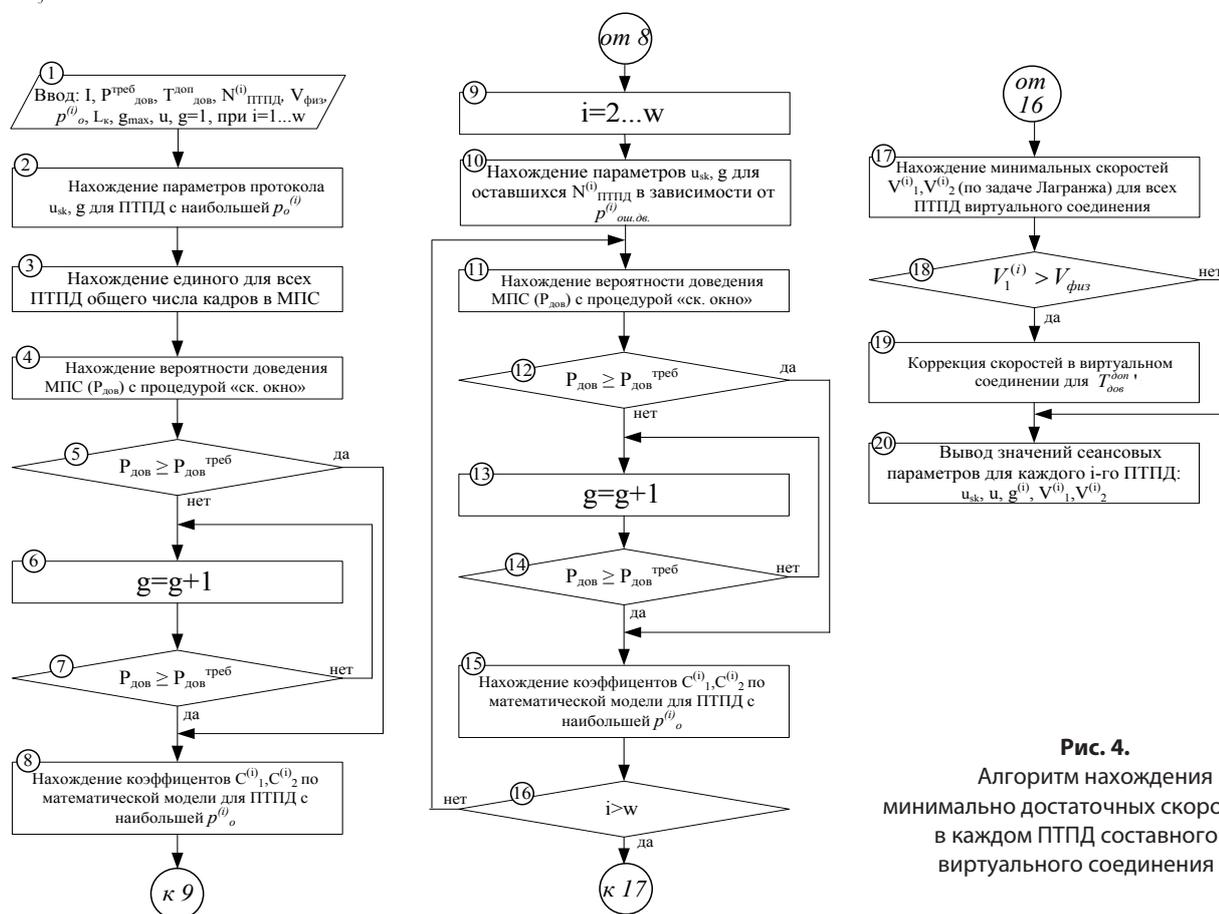


Рис. 4.
Алгоритм нахождения минимально достаточных скоростей в каждом ПТПД составного виртуального соединения

МПС (в случае плохого качества прямого и обратного КПД). Вычисление значений $C_1^{(i)}, C_2^{(i)}$, при $i=2...w$, путем построения математической модели доставки МПС для каждого отдельного ПТПД.

Этап 4 методики: нахождение минимальных скоростей $V_1^{(i)}, V_2^{(i)}$ для каждого ПТПД виртуального соединения на базе решения задачи Лагранжа (выражение (4)).

Этап 5 методики: проверка соответствия полученных скоростей для каждого ПТПД виртуального соединения значению $V_{физ}$.

Этап 6 методики: при необходимости производится коррекция скоростей для каждого ПТПД виртуального соединения, выражения (4-6).

Вывод значений сеансовых параметров для каждого i -го ПТПД ($u_{sk}, g^{(i)}, V_1^{(i)}, V_2^{(i)}$).

Данная методика представлена на рисунке 5.

Предложенная методика может быть использована при формировании виртуального составного соединения на базе каналов ДКМВ радиосети, при этом модель доставки МПС, а также итоговые выражения, определяющие минимальные скорости передачи в КПД каждого ПТПД, должны быть запрограммированы в контроллере каждого АСН на стадии разработки рабочей конструкторской документации соответствующей ОКР, а затем должны использоваться на стадии эксплуатации виртуального соединения для настройки сеансовых параметров перед началом информационного обмена.

Литература

1. Головин О.В., Простов С.П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. Профессора О.В. Головина. М.: Горячая линия-Телеком, 2006. 598с.

2. Цимбал В.А., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Нахождение границ применимости протокола типа Х.25 с кумулятивной квитанцией в асимметричном радиотракте передачи данных при требуемой достоверности и оперативности доставки многопакетного сообщения // Фундаментальные исследования, 2017. Вып. 12. Ч.1. С.143-148.

3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: Питер, 2012. 944 с.

4. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: монографии. М.: Вузовская книга, 2014. 144 с.

5. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1963. 575 с.

6. Лягин М.А., Хоптар В.В. Постановка и решение задачи Лагранжа применительно к оптимизации скорости в канале передачи данных направления «беспилотный летательный аппарат – земля» на сеансе связи // Известия Института инженерной физики, 2018. №1(47). С.58-62.

7. Цимбал В.А., Потапов С.Е., Тоискин В.Е., Лягин М.А. Приложение теории конечных марковских цепей к анализу протоколов информационного обмена и оптимизации их параметров // Международная конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2018); Доклады; Серия: науч. конф. посвящ. Дню радио / Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. М.: ООО «БРИС-М», 2018. Вып. LXXIII. С.5-16.

8. Пашинцев В.П., Киселев Д.П., Казначеев В.А., Жарнов А.А. Зависимость надежности декаметровый радиосвязи от диффузности ионосферы / REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2017. Т. 7. № 4. С. 437-440.

9. Цимбал В.А., Лягин М.А., Хоптар В.В., Сорокин О.И. Моделирование процесса информационного обмена в тракте передачи данных из совокупности параллельных декаметровых каналов / Сб. тезисов докладов X Международной отраслевой науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества» / МТУСИ. М.: Изд. ООО «Издательский дом Медиа публицер», 2016. С. 79.

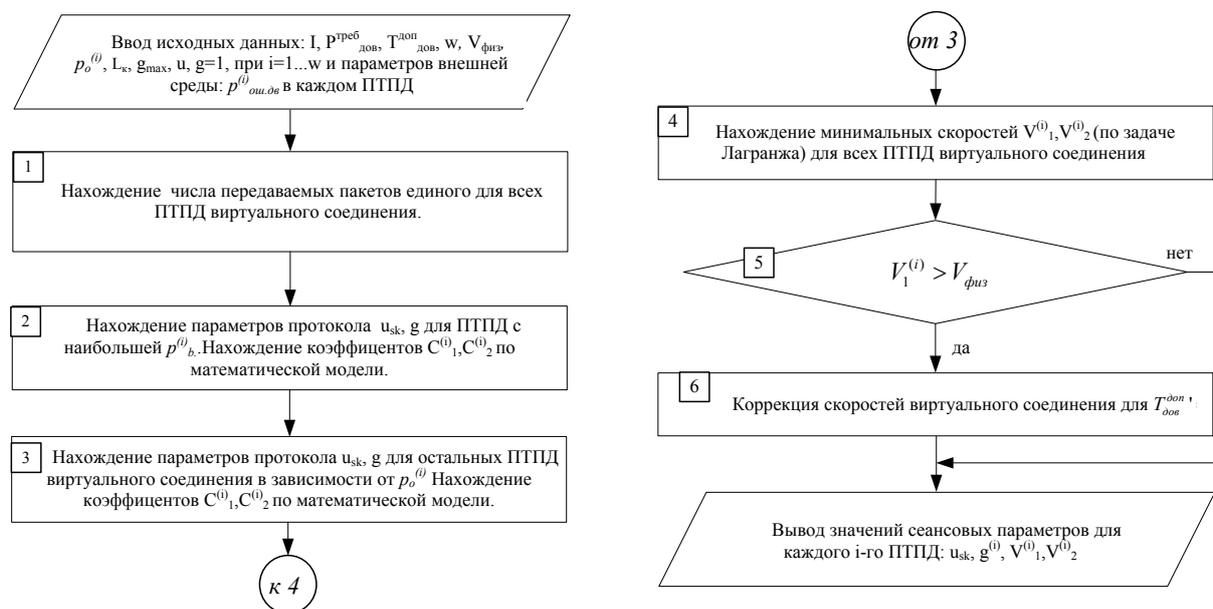


Рис. 5. Методика нахождения оптимальных сеансовых параметров составного виртуального соединения

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК: 524.83, 524.85, 539.12

НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИЛОЖЕНИЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УТРАИВАЮЩИХСЯ ПЕРИОДОВ*

NEW PERSPECTIVES FOR APPLICATIONS OF THE UNIVERSAL PERIOD-TRIPLING SYSTEM

Вадим Николаевич Лесных

младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: 1253vadim@mail.ru

Евгений Валерьевич Коломбет

младший научный сотрудник
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел. +7(4967)73-94-64
E-mail: kvision@mail.ru

Валерий Александрович Коломбет

кандидат физико-математических наук
заведующий лабораторией
Институт теоретической и
экспериментальной биофизики РАН
Адрес: 142290, Московская обл.,
г. Пущино, ул. Институтская, д. 3
Тел.: +7(4967)73-94-64
E-mail: kolombet@iteb.ru

Аннотация

Статья посвящена расширению спектра научных и технических следствий обнаружения т.н. универсальной системы утраивающихся периодов. На примерах частот телевидения, мобильной телефонии, компьютерных процессоров и пр. уже показана важность учета в технических устройствах специфической (как позитивной, так и негативной) роли спектра утраивающихся периодов. Дальнейшие перспективы постановки и решения технических задач порождает возникающая область своеобразной биофизики, основанная на гомологии с биологическими явлениями ряда явно небиологических феноменов, тесно связанных с происхождением универсальной системы утраивающихся периодов. А именно, в масштабах колоссальных плотностей энергий, крайне далеких от ~ 25 КДж/моль характерных для биохимических феноменов, появляются основания снова применять биологические термины «размножение» и «мутация». Гипотетическая квазибиология, в основе которой лежит универсальная система утраивающихся периодов, названа триологией. Пока еще не ясно, насколько далеко удастся проследить сходство биологии с триологией, но, поскольку здесь возможен прорыв в принципиально новые разделы науки и техники, соответствующие оценки должны быть выполнены и обсуждены.

Ключевые слова: универсальная система утраивающихся периодов, мутации, размножение, планковский масштаб, итерации, треугольник Серпинского, логарифмический масштаб, фрактал.

Summary

The article is devoted to the expansion of the range of scientific and technical consequences of so-called the universal period-tripling system. The importance of taking into account the specific (both positive and negative) role of the spectrum of the tripling periods in technical devices has already been shown on the examples of frequencies of TV, mobile telephones, computer processors, etc. Further prospects for the formulation and solution of technical problems give rise to the arising area of a kind of biophysics, based on homology with biological phenomena of a number of evidently non-biological phenomena, closely related to the origin of the universal period-tripling system. Namely, biological terms «reproduction» and «mutation» appear again on the scale of enormous energy density, which is very far from ~ 25 KJ/mol typical for biochemical phenomena. Hypothetical quasi-Biology based on the universal period-tripling system looks like a TRIologia. The article is devoted to the expansion of the range of scientific and technical consequences of so-called the universal period-tripling system. A depth of the similarity between biology and triology is not yet clear how. It should be tracked because there is a potential here for a breakthrough into fundamentally new areas of science and technology. This is why appropriate assessments must be made and discussed.

Keywords: universal system otryvayas periods, mutations, breeding, Planck scale, iterationy, Sierpinski triangle, logarithmic scale, fractal.

* Работа выполнена по госзаданию ИЭТБ РАН № госрегистрации 01201351298.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение

Эта статья продолжает серию наших публикаций, посвященных исследованию феномена универсальной системы утраивающихся периодов (УСУП) [1-13]. Анализ большого количества периодических процессов, происходящих во всевозможных масштабах времени, доступных для исследования, показывает, что, по крайней мере, в области периодов, простирающейся от $\sim 10^{-15}$ сек до $\sim 10^{15}$ сек, проявляется особенная роль серий периодов $T_{k,m} = T_0 3^k / 2^m$ [14-19]. Наблюдаемые периоды УСУП с большой точностью совпадают с расчетными при изменении масштабов времени на приблизительно 30 десятичных порядков величины, хотя физика явлений в этих масштабах, конечно же, самая разная. Это позволяет предположить, что область периодов $T_{k,m}$ можно продлить еще на ~ 30 десятичных порядков, т.е. протянуть ее приблизительно до планковского масштаба времени 10^{-43} сек. Фактически, это наше предположение состоит в том, что корни феномена УСУП скрыты в масштабе явлений квантовой гравитации, и, значит, таким способом может возникнуть принципиально новый путь изучения физики тех ультрамикромасштабов, в которых, как сейчас предполагается, зародилась вселенная.

На этой основе была сконструирована первая, пока еще очень приблизительная модель УСУП [11, 12]. Более совершенные версии модели должны будут более точно описывать физику, лежащую в основе УСУП. В этой работе мы продолжаем настройку модели УСУП на лучшее соответствие экспериментальным данным.

Результаты

На *рисунке 1* изображена основа модели УСУП – итерация утроения периода. Предполагается, что она состоит из двух промежуточных этапов, последовательно происходящих в околопланковском масштабе T_{pl} .

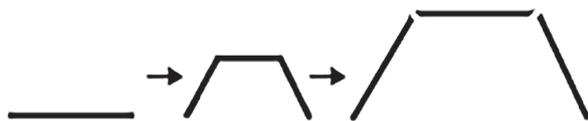


Рис. 1. В модели УСУП итерация утроения периода T_{pl} , т.е. переход $1 T_{pl} \rightarrow 3 T_{pl}$ состоит из двух этапов [11, 12]. Во-первых, выполняется этап увеличения длительности периода в полтора раза. На *рисунке 1* он представлен превращением прямолинейного отрезка длины T_{pl} в характерную ломаную линию, состоящую из трех «дочерних» отрезков вдвое меньшего размера; этот этап ответственен за усложнение фрактальной формы начинающего формироваться мега-треугольника Серпинского. Второй этап обеспечивает увеличение каждого «дочернего» отрезка до стартового размера T_{pl} , т.е. до размера, способного обеспечить следующую итерацию утроения

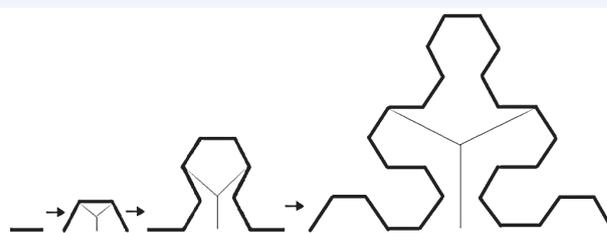


Рис. 2. Первые шаги итерационного процесса в модели выращивания мега-треугольника Серпинского из околопланковской области периодов. Длина периметра последовательно описывает периоды УСУП $1 T_{pl}, 3 T_{pl}, 9 T_{pl}, 27 T_{pl}, \dots$, т.е. $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Каждый прямолинейный участок ломаной линии имеет околопланковскую длительность ($T_{pl} \sim 10^{-43}$ сек). Тонкие линии на рисунке иллюстрируют возможный алгоритм самосборки растущего мега-треугольника Серпинского в виде трёх стандартно состыкованных копий блока, возникшего в результате предыдущей итерации утроения

Первые три итерации утроения периода изображены на *рисунке 2*.

В модели предполагается, что все базовые явления УСУП происходят в ультрамикроскопическом околопланковском масштабе вполне аналогично тому, как рост размеров живого многоклеточного существа происходит вследствие размножения составляющих его микроскопических клеток. Как известно, в биологии это размножение основано на свойствах вещества в масштабе, описываемом молекулярно-кинетической теорией. Большую роль в биологии играет определенная температура, т.е. флуктуации вполне определенного размера.

На *рисунке 3* изображены в обычном масштабе уже не первые ($k=1,2,3,\dots$), а отдаленные ($k=64,65$ и 128) этапы разрастания мега-треугольника Серпинского (МТС).

В обсуждаемой модели УСУП [11, 12] структура мега-треугольника Серпинского иногда резко нарушается стохастическими мутациями,

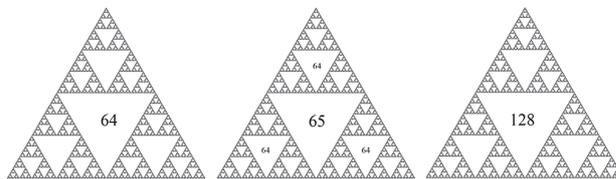


Рис. 3. Фрактал мега-треугольника Серпинского, описывающий периоды УСУП, выглядит при небольшом разрешении практически одинаково в самые различные моменты усложнения; изменяется лишь масштаб, а также неразличимая на глаз филигранность структуры МТС. Числа иллюстрируют количества утроений околопланковского периода T_{pl} . Например, числу $k=65$ соответствует период (т.е. периметр ломаной линии, составляющей МТС) равный $3^{65} T_{pl}$. Линейные размеры, например, длина основания МТС составляют $2^k T_{pl}$, поэтому в логарифмическом масштабе они пропорциональны k

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ



Рис. 4. Мутация уполовинивания периода УСУП, в данном примере якобы возникшая в ходе второй итерации в серии УСУП с $m=0$. Здесь при $k=2$ случайно не выполнялся этап удвоения размеров – один из двух промежуточных этапов процесса утроения периода. Начиная со следующей итерации реализуется уже случай $m=1$, когда периоды $T_{k,m}$ описываются не первоначальной формулой $T_{k,0}=T_{pl}3^k/2^0$, а несколько изменившейся: $T_{k,1}=T_{pl}3^k/2^1$

обусловленными достаточно высокой (около-планковской) температурой процесса: начиная с какого-то случайного номера итерации k , период может вдруг удвоиться или, наоборот, уменьшиться вдвое. Причиной этого явления в модели оказались случайные пропуски одного из двух промежуточных этапов в итерации утроения. После пропуска первого этапа итерации возникают серии УСУП с $m=1$ (это мутация уменьшения периода вдвое), после пропуска второго этапа – серии с $m=-1$ (это мутация удвоения периода). Биологическим аналогом этого явления является рост т.н. синхронной культуры, где деления всех клеток происходят одновременно, см. рисунки 4-6.

Вторая мутация приводит к сериям с параметром m , равным либо плюс 2, либо 0, либо минус 2. Ноль возникает в случае, когда следствие мутации удвоения периода компенсируется следствием мутации уполовинивания периода или наоборот. Таким образом, серия УСУП с $m=0$ отвечает, как МТС вообще без мутаций, так и МТС с четным количеством противоположных мутаций, компенсирующих изменения

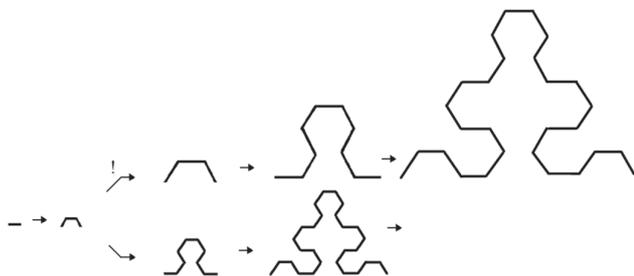


Рис. 6. То же, что на рисунке 5, но уже для случая мутации (см. «!») удвоения периода. Форма МТС после мутации начинает отставать на один шаг в своем развитии, и часы, основанные на любой частоте УСУП мутантной серии с $m=-1$, начинают идти в два раза медленнее. Можно сказать, что темп любых событий, происходящих на частотах УСУП мутантной серии, после такой мутации замедляется вдвое

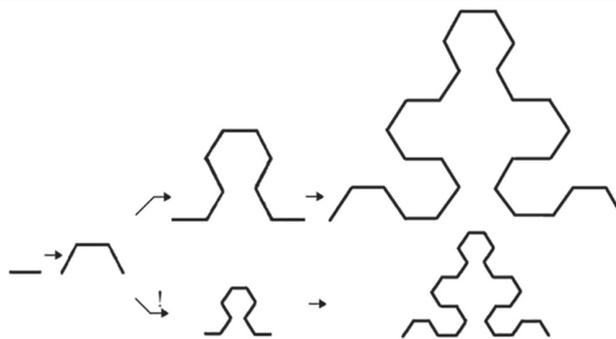


Рис. 5. Сравнение рисунков 2 и 4 с целью иллюстрации изменения, произошедшего в МТС вследствие мутации уполовинивания периода (см. на рисунке символ «!»). После такой мутации форма МТС не искажается, но любые часы, основанные на частотах УСУП мутантной серии с $m=1$, пойдут в два раза быстрее. Можно сказать, что темп событий после мутации возрастет вдвое

начального периода. Число мутаций невелико, т.к. реальное количество итераций k утроения планковского периода в обозримых масштабах времени по порядку величины близко к 2^7 [9, 11], а грубая эмпирическая оценка вероятности мутации – это одна мутация на десяток или на десятки итераций [12].

Для сравнения, максимальное количество удвоений клетки многоклеточного организма различно в зависимости от типа клетки (печени, кожи, сердца и т.д.) и ещё сильнее оно зависит от организма, которому эта клетка принадлежит (землеройка, человек, синий кит и т.д.). Для большинства клеток человека число удвоений близко к 50. Это существенно меньше возможного числа утроений в УСУП (~128).

Нужно также отметить, что, если бы вероятность мутации, которая удваивает период УСУП, совпадала с вероятностью мутации, которая уменьшает этот период вдвое, то наблюдения большого количества различных периодов УСУП показывали бы центральную роль серии с $m=0$: пары мутаций противоположного направления уравнивали бы следствия друг дру-

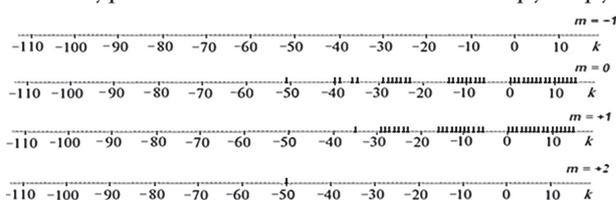


Рис. 7. Обнаруженные периоды УСУП концентрируются в сериях с параметром $m=0$ и 1. Смещение среднего значения m в окрестность середины расстояния между $m=0$ и $m=1$ обусловлено в модели разной вероятностью первого и второго этапов, из которых составлена итерация утроения

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

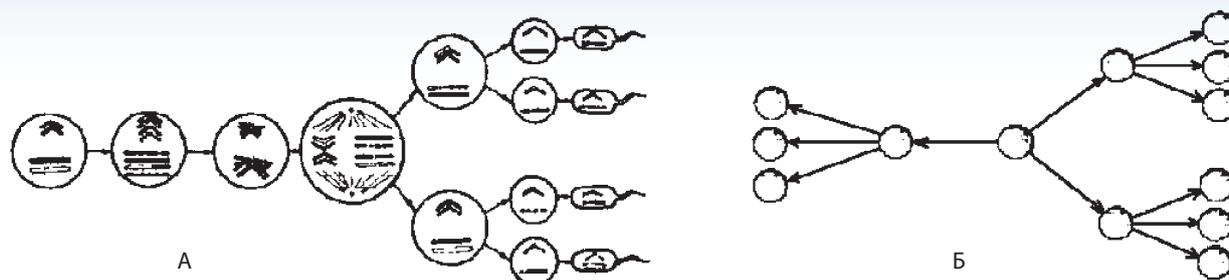


Рис. 8. Каскады дихотомического процесса деления клеток в биологии, базирующейся в обычном масштабе молекулярно-кинетической теории, и соответствующие каскады утроений в гипотетической триологии, базирующейся в околопланковском масштабе. А – пример пары каскадов размножения биологических клеток (мейоз), Б – пример гипотетической пары каскадов размножения в триологии. Внутри биологических клеток схематически изображен генетический аппарат, обеспечивающий дубликацию клеток. Для унификации стиля рисунков А и Б, в каждую триологическую «клетку» можно вставить стилизованную двухэтапную схему рисунок 1 как грубую схему аппарата, обеспечивающего размножение (триплицирование)

га. Однако, в реальности, наряду с серией $m=0$, весьма ярко проявляется еще и серия с $m=1$ (рисунки 7). Отсюда ясно, что случайные сбои, т.е. пропуски первого либо второго промежуточных этапов в итерации утроения периода (рисунки 1) происходят с различными вероятностями. Вероятность случайного пропуска этапа удвоения в такой ущербной итерации доминирует, причем доминирует так, что, как показывает опыт, среднее m обильно представленных случаев $m=0$ и $m=1$ лежит где-то в окрестности значения $m=1/2$ (рисунки 7). Выходит, что далеко не все «дочерние клетки» первого этапа итерации имеют возможность, расти в ходе второго этапа до стандартного размера T_{pp} и в результате происходит существенное смещение m от 0 в сторону 1.

Можно попытаться дать грубую оценку того, во сколько раз вероятность первого этапа (рисунки 1) должна быть больше вероятности второго, чтобы в итоге получилась средняя величина m смещенная к $1/2$. Если в серии с $m=0$ в итерации номер k выполнен первый этап итерации, то дальше возможны два варианта. Если второй этап тоже произойдет, тогда параметр m останется по-прежнему равным 0. Если же второй этап будет опущен, то это будет означать мутацию уполовинивания периода: возникнет серия УСУП с $m=1$. Здесь конкурируют два варианта развития событий, описываемые формулами $T_{k,0} = T_{pr} 3^k / 2^0$ и $T_{k,1} = T_{pr} 3^k / 2^1$. Они различаются блоком $x=2^m$. Наблюдения (рисунки 6) дают, по сути, $m \approx 1/2$. Отсюда $x \approx 2^{1/2}$: отношение вероятностей вариантов «есть мутация/нет мутации» близко к корню из двойки, т.е. вероятность первого этапа итерации больше, чем вероятность второго этапа приблизительно в $2^{1/2}$ раза.

Кстати, эта оценка естественным образом ведет еще и к интерпретации наблюдаемого преувеличения серий с положительными значениями m . Серии с отрицательным m , т.е. серии

с удвоениями периода тем маловероятнее, чем больше количество этих маловероятных мутаций m . Так, например, четыре таких мутации ($m=-4$) маловероятнее в $(2^{1/2})^4$, т.е. в 4 раза, чем четыре альтернативных мутации, т.е. серии с $m=+4$. Эта количественная оценка фактически подтверждается: к настоящему моменту уже выявлены серии УСУП с минимальным значением $m=-3$ и с максимальным $m=+11$; более вероятных серий с положительным m приблизительно вчетверо больше.

Обсуждение

Научившись целенаправленно управлять мутациями УСУП и самосборкой фрагментов МТС, можно было бы ставить и пытаться решить очень специфические задачи. Косвенную информацию о характере этих задач дает сопоставление масштабов энергий, характерных для Биологии и для гипотетической «ТРИологии» (рисунки 8).

В биологии энергия разрыва макроэргической связи ~ 0.25 эВ. Для подчеркивания масштабов: отрыв электрона из атома водорода требует затраты 13,6 эВ энергии. Аналогом в триологии служит планковская энергия $1,22 \cdot 10^{28}$ эВ, ее тротиловый эквивалент близок к 500 кг. Сопоставление столь различно энергоемких процессов может легко спровоцировать вывод о безнадежности практической триологии. Тем не менее, заказ на работу со сверхвысокими энергиями в настоящее время уже постепенно формулируется. Например, нобелевский лауреат Кип Торн прогнозирует создание недоступной сейчас плотности энергии и посредством т.н. эффекта Казимира выполнение топологических изменений в пространстве-времени с далеко ведущими последствиями [20, 21].

Доводом в пользу положительной оценки перспектив прикладной триологии служит ла-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

винообразный, взрывной характер процесса, лежащего в ее фундаменте, а также яркие успешные примеры, где именно взрывной характер процесса привел к априори труднопредсказуемым прорывам в науке и технологиях. В физике это, в частности, создание атомной бомбы, основанной на обнаружении цепной ядерной реакции [22], а в биологии это, например, открытие полимеразной цепной реакции, позволяющей неожиданно легко и быстро получать макроскопические количества одинаковых фрагментов молекулы ДНК [23].

И материал, полученный непосредственно из наблюдений множества серий УСУП, и выполненные выше модельные оценки пока ещё не очень ясно очерчивают контуры гипотетической триологии. Лишь время покажет, насколько далеко удастся продолжить аналогию биологии с триологией в практическую область, но движение в этом направлении актуально, т.к. оно в перспективе может привести к принципиально новым областям человеческой практики.

Литература

1. Бондарь А.Т., Федоров М.В., Коломбет В.А. Утраивающиеся периоды в мультимасштабных физических и биологических явлениях // Биофизика, 2015. Т.60. №6. С.1208-1215.
2. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Федоров М.В. Обнаружение в технических устройствах фрактальной системы утраивающихся периодов, известной по своим физическим геофизическим, биофизическим и биологическим манифестациям // Биофизика, 2016. Т.61. №3. С.615-624.
3. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. О перспективе применения фундаментальной системы утраивающихся периодов в мультимасштабных технических устройствах // Известия Института инженерной физики, 2016. №1(39). С.8-11.
4. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Предсказание тактовой частоты процессора будущего поколения компьютеров как пример эффективности использования в технике свойств фрактальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.55-58.
5. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Коломбет В.А. Особенность проявления фрактальной системы утраивающихся периодов в телевидении и мобильной телефонии // Известия Института инженерной физики, 2016. №4(42). С.34-40.
6. Коломбет Е.В., Лесных В.Н., Скавуляк А.Н., Коломбет В.А., Бондарь А.Т. Проявление универсальной системы утраивающихся периодов в УВЧ терапии // Известия Института инженерной физики, 2017. №2(44). С.70-73.
7. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Учет существования сети Петца как новый путь к повышению эффективности распознавания целей // Известия Института инженерной физики, 2017. №3(45). С.37-39.
8. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Коломбет Е.В. Определение перспективных частот РЛС // Известия Института инженерной физики, 2017. №4(46). С.18-21.
9. Коломбет В.А., Лесных В.Н. Универсальная система утраивающихся периодов как возможный индикатор дробления времени, сопровождающего эволюцию Вселенной. Материалы конференции «Физика пространства и времени». 2017. Муром, Премилы горы, 23-28 марта 2017. С.17-20.
10. Коломбет В.А. Обнаружение частот Петца в когнитивных процессах. Материалы всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». 25-29 сентября 2017 г., Нижний Новгород, ИПФ. С.126-128.
11. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Бондарь А.Т. Треугольник Серпинского как удобная математическая модель для описания универсальной системы утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №1(47). С.63-68.
12. Коломбет В.А., Архипов В.Ю., Елистратов А.В., Лесных В.Н., Коломбет Е.В., Серая О.Ю. Стохастика и мутации в универсальной системе утраивающихся периодов // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.56-62.
13. Коломбет В.А., Лесных В.Н., Станкевич А.А., Milian-Sanchez V. Наблюдение «музыки сфер» во всей области, заключенной между планковским и космологическим масштабами времени. Система «Планета Земля». 2018. М.: ЛЕНАРД. С.146-161.
14. Puetz, S.J. The Unified Cycle Theory: How Cycles Dominate the Structure of the Universe and Influence Life on Earth. (2009) Outskirts Press, Denver, Colorado; ISBN: 978-1-4327-1216-7.
15. Puetz, S.J. Unified Cycle Theory: Introduction & Data. (2010) Proceedings of the NPA, Long Beach 2010 Annual Conference.
16. Puetz Stephen J., Prokoph Andreas, Borchardt Glenn, Mason Edward W. Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events. Chaos, Solitons & Fractals, 2014. V.62-63. P.55-75.
17. Puetz S.J., Borchardt G. Quasi-periodic fractal patterns in geomagnetic reversals, geological activity, and astronomical events. Chaos, Solitons and Fractals, 2015. V.81. P.246-270.
18. Puetz S.J., Prokoph A., Borchardt G. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory // Journal of Statistical Planning and Inference DOI: 10.1016/j.jspi.2015.10.006-October 2015.
19. Prokoph A., Puetz S. J. Period-Tripling and Fractal Features in Multi-Billion Year Geological Records Mathematical geosciences DOI: 10.1007/s11004-015-9593-y-April 2015.
20. Everett A., Roman T. Time Travel and Warp Drives: A Scientific Guide to Shortcuts through Time and Space. University of Chicago Press, 2011.
21. Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения // Успехи физических наук, 1988. Т.156. №.3. С.385-426.
22. Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. Механизм деления ядер // Успехи физических наук, 1941. Т.25. С.381-405
23. Saiki R.K., Scharf S., Faloona F., Mullis K.B., Horn G.T., Erlich H.A., Arnheim N. Enzymatic amplification of beta-globin genomic sequences and restriction site analysis for diagnosis of sickle cell anemia. Science, 1985. Dec 20. 230 (4732). P.1350-1354.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 656.25

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ОТВЕТСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ АЛС НА БАЗЕ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО РАДИОКАНАЛА

GENERAL PROVISIONS OF THE METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING INTEGRITY CONTROL SYSTEMS FOR SENSITIVE INFORMATION IN ALS SYSTEMS BASED ON A BROADCASTING RADIO CHANNEL

Дмитрий Вячеславович Смирнов
*почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, доцент
действительный член АИИ
Генеральный директор – Первый
Вице-президент Института
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93*

Александр Михайлович Коротин
*младший научный сотрудник
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: alexkor91@gmail.com*

Ярослав Романович Воронов
*аспирант
МОУ «ИИФ»
Адрес: 142210, Московская обл.,
г. Серпухов, Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7 (4967) 35-31-93
E-mail: cleric_yarik@mail.ru*

Аннотация

В статье приведено общее описание начальных этапов методики построения систем контроля целостности (СКЦ) ответственной информации, передаваемой автоматической локомотивной сигнализацией на базе широковещательного радиоканала (АЛС-ШР). Определен список свойств и параметров АЛС-ШР, влияющих на процесс построения СКЦ, и предложен порядок определения их значений. Получено необходимое условие построения безопасной СКЦ, которому должны удовлетворять параметры АЛС-ШР. Сделан вывод, что для завершения методики и определения последних двух ее этапов дальнейшие исследования должны быть связаны с разработкой алгоритмов выбора механизмов защиты, применяемых в СКЦ, а также процедуры обновления параметров безопасности.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, АЛС на базе широковещательного радиоканала, система контроля целостности, СКЦ ответственной информации.

Summary

The article provides a general description of the initial stages of the methodology for constructing integrity monitoring systems (SCC) for sensitive information transmitted by automatic locomotive signaling based on a broadcasting radio channel (ALS-ShR). A list of properties and parameters of ALS-ShR, affecting the process of building SCC, was determined, and the procedure for determining their values was proposed. The necessary condition for the construction of a secure SCC, which must satisfy the parameters of ALS-ShR, has been obtained. It was concluded that to complete the methodology and determine the last two phases, further research should be related to the development of algorithms for selecting protection mechanisms used in the SCC, as well as the procedure for updating security parameters.

Keywords: automatic locomotive signaling, broadcasting radio-based ALS, integrity monitoring system, SCC responsible information.

Введение

Переход к использованию систем автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) [1, 2] на базе радиоканала усложняет обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта, так как в этом случае канал связи между

станционной и бортовой частями системы выходит за пределы контролируемой зоны [3]. В результате появляется возможность реализации угроз безопасности ответственной информации (ОИ) [4, 5] со стороны внешнего нарушителя, способных привести к возникновению транс-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

портных происшествий. Для защиты от данных угроз применяются системы контроля целостности (СКЦ), гарантирующие, что полученная ОИ является актуальной и отправлена легитимной станционной или бортовой частью системы [6].

Существующие решения по защите ОИ обладают рядом ограничений и могут быть не применимы для некоторых типов АЛС, в частности, для АЛС на базе широкополосного радиоканала (АЛС-ШР)[7], используемых на территории РФ, в связи с чем, актуальной является задача построения СКЦ для данного типа систем. Выбор механизмов защиты при построении СКЦ для АЛС-ШР зависит от ряда факторов и условий [8], что значительно усложняет задачу построения унифицированной СКЦ, применимой для защиты любой АЛС-ШР. Таким образом для обеспечения безопасности движения при использовании АЛС-ШР представляется целесообразным разработать методику построения СКЦ. В рамках данной статьи показаны основные этапы, которые должна содержать данная методика, и приведено описание ее первых двух этапов.

1. Общее описание методики

Для защиты от угроз безопасности ОИ со стороны внешнего нарушителя, способных привести к возникновению транспортных происшествий [5], система контроля целостности должна содержать механизмы защиты, приведенные в *таблице 1*, выбор которых зависит от ряда факторов, таких как ограничение пропускной способности радиоканала, количества передаваемой ОИ, периода обмена ОИ, доверенности станционных и бортовых частей АЛС-ШР и некоторых других условий [8].

Исходя из этого, предлагаемая методика, в первую очередь, должна, основываясь на свойствах и характеристиках защищаемой АЛС-ШР позволять произвести выбор как самих механизмов защиты, так и их параметров. Кроме того, так как для обеспечения безопасного обмена ответственной информацией в рамках СКЦ предполагается использование ЭП и/или КА, для которых необходимо использование параметров контроля целостности [8], методика должна предусматривать решение задачи безопасного обновления данных параметров, а также, в случае невозможности доставки параметров контроля целостности в станционную и/или бортовые части АЛС-ШР в рамках процедуры аутентификации, определять альтернативный вариант доставки. Для решения приве-

Таблица 1

Механизмы защиты от угроз безопасности ОИ

Угрозы	Механизм защиты
Отправка поддельной ОИ в радиоканал	Электронная подпись (ЭП) или коды аутентификации (КА)
Подмена базовой и/или абонентской радиостанции	Процедура аутентификации участников движения
Повторная отправка ранее перехваченной в радиоканале ОИ	Временные метки или порядковые номера сообщений

денных задач необходимо определить значения параметров АЛС-ШР, влияющих на процесс построения СКЦ. При этом, так как возможны ситуации, при которых построение СКЦ, обеспечивающей безопасность ответственной информации, невозможно, то перед выбором механизмов защиты и разработкой процедур обновления требуется проверить выполнение условий, необходимых для построения безопасной СКЦ. Под безопасной СКЦ в статье понимается система контроля целостности ответственной информации, обеспечивающая безопасность движения железнодорожного транспорта при условии возможности реализации угроз безопасности ответственной информации.

Приведенные выше рассуждения позволили определить основные этапы построения СКЦ, схематично изображенные на *рисунке 1*, которые должна содержать предлагаемая методика.

Далее в рамках данной статьи приводится подробное описание первых двух этапов методики.



Рис. 1. Этапы построения СКЦ ответственной информации, передаваемой АЛС-ШР

2. Определение параметров и свойств АЛС-ШР, влияющих на процесс построения СКЦ

В результате анализа условий и факторов, влияющих на выбор механизмов защиты и процедуры обновления [8], было выявлено 29 свойств и параметров систем АЛС-ШР, как количественных, так и качественных, которые должны быть определены в рамках первого этапа. Далее в статье приводится перечень данных параметров, способ определения их значений, а также характер их влияния на процесс построения СКЦ.

1. Наличие двустороннего обмена ответственной информацией между станционными и бортовыми частями системы (*direction*). Если в системе АЛС-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ШР ответственная информация передается только со стороны станционной части ($direction=0$), то СКЦ должна обеспечить защиту только для данного направления передачи. Если используется двусторонний обмен ответственной информацией ($direction=1$), то СКЦ должна блокировать выявленные угрозы для обоих направлений передачи ответственной информации.

2. Количество радиоканалов, используемых для передачи сообщений со стороны бортовых частей в (M). Количество используемых радиоканалов влияет на порядок вычисления количества информации, которое может применяться для защиты ответственной информации в рамках СКЦ. Если в зоне действия каждой из станционных частей для передачи станционных и бортовых сообщений используется общий радиоканал, то $M=0$, в противном случае $M>0$. Значение параметра M должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

3. Эффективная пропускная способность радиоканала, используемого для передачи сообщений станционных частей (C^c). Эффективная пропускная способность радиоканала будет зависеть от полосы пропускания, мощности сигнала, уровня шума, а также количества служебной информации, передаваемой системой радиосвязи. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты станционных сообщений.

4. Эффективная пропускная способность радиоканала, используемого для передачи сообщений бортовых частей (C^a). Аналогично C^c , зависит от полосы пропускания, мощности сигнала, уровня шума и количества служебной информации системы радиосвязи. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты бортовых сообщений. При использовании общего радиоканала для передачи ответственной информации со стороны станционных и бортовых частей ($M=0$), выполняется $C^a=C^c$. Значение параметра C^a должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

5. Период обмена ответственной информацией, содержащейся в сообщениях станционных частей ($T_{обм}^c$). Значение периода обмена зависит от установленных правил эксплуатации железнодорожного участка и технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты станционных сообщений.

6. Период обмена ответственной информацией, содержащейся в сообщениях бортовых частей ($T_{обм}^a$). Аналогично $T_{обм}^c$, зависит от установленных правил эксплуатации железнодорожного участка и технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может ис-

пользоваться для защиты бортовых сообщений. Значение параметра $T_{обм}^a$ должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

7. Максимальное количество ответственной информации, передаваемой станционной частью за период обмена $T_{обм}^c$ (I_{ou}^c). Значение параметра зависит от технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты станционных сообщений.

8. Максимальное количество ответственной информации, передаваемой бортовой частью за период обмена $T_{обм}^a$ (I_{ou}^a). Значение параметра зависит от технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты бортовых сообщений. Значение параметра I_{ou}^a должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

9. Максимальное количество сообщений с ответственной информацией, передаваемых станционной частью за период обмена $T_{обм}^c$ ($K_{сбщ}^c$). Значение параметра зависит от технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты станционных сообщений.

10. Максимальное количество сообщений с ответственной информацией, передаваемых бортовой частью за период обмена $T_{обм}^a$ ($K_{сбщ}^a$). Значение параметра зависит от технических характеристик АЛС-ШР. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты бортовых сообщений. Значение параметра $K_{сбщ}^a$ должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

11. Максимальное количество локомотивов, поддерживаемых станционной частью АЛС-ШР одновременно (N). Значение параметра зависит от технических характеристик АЛС-ШР, в том числе системы радиосвязи. Влияет на количество информации, которое может использоваться для защиты бортовых сообщений. Значение параметра $K_{сбщ}^a$ должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

12. Допустимое время вычисления и проверки ЭП и/или КА для защиты станционных сообщений ($T_{сбщ}^c$). Значение параметра зависит от времени создания самого сообщения, передачи его по внутренним канал связи в радиостанцию, обработки и инкапсуляции данных на канальном уровне, передачи кадров канального уровня по радиоканалу, принятия и обработки кадра, деинкапсуляции сообщения прикладного уровня. Определение значения параметра $T_{сбщ}^c$ производится опытным путем. Если станционная часть

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

передает более одного сообщения за период обмена $T_{обм}^c$, то значение $T_{сбщ}^c$ должно быть выбрано как наибольшее для всех возможных сообщений: $T_{сбщ}^c = \max(T_{сбщ_i}^c)$, где $i = \overline{1, K_{сбщ}^c}$. Влияет на выбор механизма защиты от угрозы отправки поддельной ответственной информации со стороны станционных частей.

13. *Допустимое время вычисления и проверки ЭП и/или КА для защиты бортовых сообщений ($T_{сбщ}^n$).* Значение данного параметра зависит от тех же факторов, что и параметр $T_{сбщ}^c$. Определение значения производится опытным путем. Если бортовая часть передает более одного сообщения за период обмена $T_{обм}^n$, то значение $T_{сбщ}^n$ должно быть выбрано как наибольшее для всех возможных сообщений: $T_{сбщ}^n = \max(T_{сбщ_i}^n)$, где $i = \overline{1, K_{сбщ}^n}$. Влияет на выбор механизма защиты от угрозы отправки поддельной ответственной информации со стороны бортовых частей. Значение параметра $T_{сбщ}^n$ должно быть определено только в случае двустороннего обмена ответственной информацией ($direction=1$).

14. *Доверенность станционных частей ($Trusted^c$).* Станционная часть может считаться доверенной ($Trusted^c=1$), если в ней установлен резидентный компонент безопасности [9] или выполнены организационные меры защиты – регулярная проверка целостности программного и аппаратного обеспечения, опломбирование оборудования, организация режима доступа к системе. Если станционные части не являются доверенными ($Trusted^c=0$), то построение безопасной СКЦ невозможно.

15. *Доверенность бортовых частей ($Trusted^n$).* Доверенность бортовых частей ($Trusted^n=1$) устанавливается аналогично станционным. Использование бортовых частей, не являющихся доверенными ($Trusted^n=0$), приводит к необходимости использования ЭП в качестве механизма защиты от угрозы отправки поддельной информации со стороны станционных частей.

16. *Наличие мер защиты от НСД к станционным частям и компрометации хранящихся в них параметров СКЦ ($НСД^c$).* Угроза компрометации параметров СКЦ станционных частей является неактуальной ($НСД^c=0$), если применены технические и/или организационные меры защиты (использование СЗИ с неизвлекаемыми параметрами защиты, контроль доступа к оборудованию и др.), блокирующие или существенно затрудняющие возможность ее реализации. Возможность реализации определяется путем проведения экспертной оценки. Если данная угроза является актуальной ($НСД^c=1$), то построение безопасной СКЦ невозможно.

16. *Наличие мер защиты от НСД к бортовым частям и компрометации хранящихся в них параметров СКЦ ($НСД^n$).* Актуальность угрозы компрометации параметров СКЦ определяется

аналогично станционным частям. Возможность компрометации оценивается как во время движения локомотива, то есть нахождения его в маршруте, так и за его пределами (во время стоянок локомотива, его ремонта, выезда за пределы участка). Если компрометация возможна ($НСД^n=1$), то в качестве механизма защиты от угрозы отправки поддельной информации со стороны станционных частей можно использовать только ЭП.

18. *Допустимое время установки соединения и перехода к передаче ответственной информации ($T_{соед}$).* Данный параметр будет зависеть от разрешенной скорости движения, длины блок-участков, профиля пути, характеристик подвижных составов: веса, длины и др. Допустимое время установки соединения будет влиять на выбор процедуры аутентификации.

19. *Возможность ручного синхронного обновления параметров СКЦ в станционных частях АЛС-ШР ($synk_man_upd^c$).* Значение данного параметра зависит от количества станционных частей на участке, их удаленности друг от друга, правил эксплуатации системы. Ручное обновление параметров СКЦ в станционных частях может быть невозможным ($synk_man_upd^c=0$) для систем АЛС-ШР, покрывающих большие железнодорожные участки с большим количеством станционных частей. Возможность обновления определяется путем проведения экспертной оценки. Данный параметр будет влиять на выбор процедуры аутентификации участников движения, процедуры обновления параметров СКЦ, а также альтернативных вариантов доставки параметров контроля целостности.

20. *Возможность ручного синхронного обновления параметров СКЦ в бортовых частях АЛС-ШР ($synk_man_upd^n$).* Значение данного параметра зависит от количества локомотивов, применяемых на железнодорожном участке, оборудованном АЛС-ШР, порядка их эксплуатации и технического обслуживания. Ручное обновление параметров СКЦ в бортовых частях может быть невозможным ($synk_man_upd^c=0$) для систем АЛС-ШР, покрывающих большие железнодорожные участки с большим количеством участников движения (бортовых частей). Возможность обновления определяется путем проведения экспертной оценки. Данный параметр будет влиять на выбор процедуры аутентификации участников движения, процедуры обновления параметров СКЦ, а также альтернативных вариантов доставки параметров контроля целостности.

21. *Наличие точек подключения станционных частей к внешним сетям (ext_ch^c).* Параметр $ext_ch^c=1$, если существует канал связи, который может быть использован для передачи информации в станционную часть АЛС-ШР с удаленного

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

узла, расположенного во внешней сети (internet, intranet и др.). В качестве канала связи может выступать прямое соединение с удаленным узлом. Если прямое соединение отсутствует, то канал связи может быть построен с использованием съемных носителей, позволяющих передать необходимые параметры от узлов, расположенных на станциях и подключенных к внешним сетям (internet, intranet), до стационарного оборудования АЛС-ШР. Определяется экспертным путем. Наличие точек подключения позволяют реализовать процедуру удаленного обновления параметров СКЦ в стационарных частях.

22. *Наличие точек подключения бортовых частей к внешним сетям (ext_ch^A)*. Параметр $ext_ch^C=1$, если существует канал связи, который может быть использован для передачи информации в бортовую часть АЛС-ШР с удаленного узла, расположенного во внешних сетях (internet, intranet и др.). Канал связи строится аналогичным способом, как и для стационарных частей АЛС-ШР. Определяется экспертным путем. Наличие точек подключения позволяют реализовать процедуру удаленного обновления параметров СКЦ в бортовых частях.

23. *Наличие временных меток или порядковых номеров сообщений в протоколе прикладного уровня АЛС-ШР (TS)*. Отсутствие временных меток или порядковых номеров сообщений в протоколе прикладного уровня ($TS=0$) приводит к необходимости реализации собственного механизма защиты от угрозы отправки ранее перехваченной ответственной информации.

24. *Наличие механизма определения направления передачи или отправителя сообщений в протоколе прикладного уровня АЛС-ШР ($sender$)*. При отсутствии данных механизмов значение параметра $sender=0$. Если существует возможность определить направления передачи ответственной информации, то есть стационарная или бортовая часть является отправителем сообщения, то $sender=1$. Если в АЛС-ШР возможно определение отправителя сообщения, то есть какая именно стационарная или бортовая часть отравила данное сообщение, то выполняется $sender=2$. Значение данного параметра будет влиять на выбор механизма защиты от угрозы повторной отправки информации. В случае передачи ответственной информации только со стороны стационарной части ($direction=0$) значение параметра $sender=2$.

25. *Наличие дополнительного оборудования в стационарных и бортовых частях АЛС-ШР для определения точного времени ($time_equip$)*. При наличии данного оборудования и возможности определения точного времени значение параметра ($time_equip=1$). В противном случае, ($time_equip=0$). Значение данного параметра будет влиять на выбор механизма защиты от угрозы повторной отправки.

26. *Последовательность отправки стационарных и бортовых сообщений в рамках периода обмена $T_{обм}^L$ ($parallel_send$)*. Если отправка сообщений бортовыми частями в зоне действия одной стационарной части выполняется одновременно, то $parallel_send=1$. Если вместе с бортовыми сообщениями одновременно происходит передача и стационарных, то $parallel_send=2$. В противном случае, выполняется $parallel_send=0$. Значение параметра $parallel_send$ влияет на значение нижней границы количества информации $I_{TS/SEQ_{min}}$, которое должно содержаться во временной метке или порядковом номере сообщения для обеспечения безопасности движения железнодорожного транспорта. В случае передачи ответственной информации только со стороны стационарной части $direction=0$ значение параметра $parallel_send=0$.

27. *Наличие в системе радиосвязи механизма определения порядкового номера бортовой части среди остальных бортовых частей, находящихся в зоне действия данной стационарной части ($board_seq$)*. В случае отсутствия в системе радиосвязи данного механизма ($board_seq=0$) при использовании порядковых номеров в рамках процедуры аутентификации бортовой части должен быть передан ее порядковый номер $N^{тик}$. При наличии данного механизма ($board_seq=1$) передача $N^{тик}$ в рамках процедуры аутентификации не требуется.

28. *Наличие механизма, позволяющего каждому участнику движения предварительно знать количество сообщений, которые будут переданы в рамках периода обмена другими участниками ($quantity$)*. В случае отсутствия в АЛС-ШР данного механизма ($quantity=0$) применение порядковых номеров возможно только при использовании уникальной нумерации для каждого участника движения.

29. *Наличие механизма проверки ошибок нумерации по завершению движения локомотива в зоне действия стационарной части ($check_final_err$)*. В случае отсутствия в АЛС-ШР данного механизма ($check_final_err=0$) применение порядковых номеров возможно только при использовании уникальной нумерации для каждого участника движения.

Таким образом, в результате первого этапа должны быть определены 29 свойств и параметров АЛС-ШР, на основе значений которых в дальнейшем будет производиться выбор механизмов защиты и процедуры обновления параметров СКЦ.

3. Проверка выполнения необходимых условий построения безопасной СКЦ

В результате определения свойств АЛС-ШР, влияющих на процесс построения СКЦ было установлено, что при использовании недоверенных стационарных частей ($Trusted^C=0$) или наличии угрозы НСД к стационарным частям и

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

компрометации хранящейся в ней информации ($НСД^c=1$) построение безопасной СКЦ невозможно. Рассмотрим подробнее влияние данных параметров на процесс построения СКЦ.

Использование недоверенных станционных частей в рамках АЛС-ШР означает отсутствие гарантий, что данные станционные части правильно выполняют свои функции и имеют неизменное проверенное программное и аппаратное обеспечение [9]. Отсутствие таких гарантий автоматически приводит к тому, что ответственная информация, которая будет передана станционной частью, может являться модифицированной и не соответствовать реальной поездной обстановке еще до самого момента ее отправления в радиоканал. В результате получения бортовыми частями такой информации возможно возникновение опасных ситуаций для любого из участников движения, находящихся в зоне действия данной станционной части.

Аналогичным образом на возможность построения безопасной СКЦ влияет наличие мер защиты от НСД к станционным частям. Если злоумышленник имеет возможность получить несанкционированный доступ к станционным частям и скомпрометировать хранящиеся в них параметры контроля целостности, используемые для вычисления и проверки ЭП или КА, то у него появляется возможность реализации угрозы отправка поддельной ОИ в радиоканал, что, в свою очередь, может привести к нарушению безопасности движения в зоне действия данной станционной части и возникновению транспортных происшествий.

Таким образом, если станционные части АЛС-ШР не являются доверенными или существует угроза НСД и компрометации хранящихся в станционной части параметров СКЦ и отсутствуют технические и/или организационные меры защиты от НСД, то построение безопасной СКЦ не представляется возможным. Необходимое условие построения безопасной СКЦ формулируется как:

$$\begin{cases} Trusted^c = 1, \\ НСД^c = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где параметр $Trusted^c=1$, если станционные части АЛС-ШР являются доверенными, и $НСД^c=0$, если угроза НСД и компрометации параметров СКЦ в станционных частях системы не актуальна или применены организационные и/или технические меры защиты, достаточные для ее блокировки.

Заключение

Представлены основы методики построения СКЦ для обеспечения безопасности движения при использовании АЛС на базе широкополосного радиоканала. Отличительной особен-

ностью методики является учет свойств и параметров систем АЛС-ШР.

В законченном виде предложенная методика должна содержать четыре этапа. Первый этап заключается в определении свойств и параметров АЛС-ШР, влияющих на выбор механизмов защиты и процедуры обновления. На втором этапе проверяется выполнение условий, необходимых для построения безопасной СКЦ. Содержание данных этапов представлены на обобщение выше.

В рамках третьего этапа на основе определенных на первом этапе свойств и параметров АЛС-ШР предлагается определить механизмы защиты для каждой из выявленных угроз. Для этой цели была необходима разработка алгоритмов выбора механизмов защиты. На четвертом этапе предполагается разработать процедуру обновления параметров СКЦ и оценки альтернативных вариантов доставки параметров контроля целостности в станционные и бортовые части АЛС-ШР.

Литература

1. ГОСТ Р 53431-2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения (с Изменением № 1). Введ. 2011-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 19 с.
2. Тильк И.Г. АЛС с использованием радиоканала // Автоматика. Связь. Информатика, 2010. №7 С. 7-9.
3. Базовая модель угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных (выписка) [Электронный ресурс]: утв. ФСТЭК России 15.02.2008. 69 с. Режим доступа: <http://fstec.ru/component/attachments/download/289> (дата обращения: 25.10.2017).
4. ОСТ 32.17-92. Безопасность железнодорожной автоматики и телемеханики. Основные понятия. Термины и определения. Введ. 1993-01-01. СПб.: Типография ПИИТ, 1992. 33 с.
5. Коротин А.М. Анализ угроз безопасности ответственной информации, передаваемой системой АЛС на базе радиоканала // Безопасность информационных технологий, 2017. №2. С. 42-49.
6. Бакуркин Р.С., Безродный Б.Ф., Коротин А.М. Противодействие компьютерным атакам в сфере железнодорожного транспорта // Вопросы кибербезопасности, 2016. №4. С. 29-35.
7. Коротин А.М. Протокол EuroRadio как способ обеспечения целостности ответственной информации в АЛС на базе радиоканала // Вопросы защиты информации, 2017. №2. С. 44-48.
8. Bezrodnyi, B.F. The Basis for Building Integrity Monitoring System of Critical Information in ALS Based on Broadcast Radio Channel [Текст] / B.F. Bezrodnyi, A.M. Korotin // In CEUR Workshop Proceedings – 2017. – Vol-2081 (Selected Papers of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference on Secure Information Technologies, BIT 2017) — pp. 6-10.
9. Коняевский В.А. Доверенные системы как средство противодействия киберугрозам. Базовые понятия // Information Security, 2016. № 3. С. 40-41.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 355.58:004.942

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ОБЫЧНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПОРАЖЕНИЯ

AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR PREDICTING THE STATE OF FIRE- HAZARDOUS OBJECTS WHEN EXPOSED TO SHOCK WAVES GENERATED BY CONVENTIONAL MEANS OF DESTRUCTION

Владимир Иванович Мухин
заслуженный деятель науки РФ
доктор военных наук, профессор
профессор кафедры информатики
и вычислительной техники
Академия гражданской защиты МЧС России
Адрес: 141435, Московская обл.,
г.о. Химки, м-н Новогорск
Тел.: +7(498)699-05-59

Станислав Викторович Самойлов
кандидат технических наук, доцент
начальник научно-исследовательского отдела
(планирования и организации подготовки
научно-педагогических кадров)
Академия гражданской защиты МЧС России
Адрес: 141435, Московская обл.,
г.о. Химки, м-н Новогорск
Тел.: +7(498)699-05-59

Аннотация

В статье рассматривается процесс разработки автоматизированной информационной системы прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов при воздействии ударных волн, генерируемых обычными средствами поражения, в соответствии с методологией разработки информационных систем. Проведен системный анализ предметной области исследования, представлено описание информационных потоков в процессе прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов при воздействии ударных волн, генерируемых обычными средствами поражения. Описаны функциональные модели процессов расчета оценки состояния ПВОО после воздействия длинных и коротких ударных волн, а также вероятностной оценки состояния ПВОО после воздействия длинных и коротких ударных волн. Представлен проект автоматизированной информационной системы в средах CA ERWin Process и Data Modeler, а также прототип информационной системы в среде 1С: Предприятие 8.3.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, прогнозирование, пожаровзрывоопасные объекты, обычные средства поражения, функциональная модель.

Summary

The article deals with the process of developing an automated information system for forecasting the state of fire and explosion hazard objects under the impact of shock waves generated by conventional means of destruction. The conducted system analysis of the subject area of research, information disclosure in the process of forecasting the state of fire and explosion hazard objects under the impact of shock waves generated by conventional means of destruction. Functional models of the processes for calculating the PVOE state estimation after the action of long and short shock waves are described, as well as the probabilistic estimation of the PVO state after exposure to long and short shock waves. The project of the automated information system in the CA ERWin Process and Data Modeler is presented, as well as the prototype of the information system in the 1С: Предприятие 8.3.

Keywords: automated information system, forecasting, fire and explosion hazard facilities, conventional means of destruction, functional model.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Целью исследования является разработка автоматизированной информационной системы прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов (далее – ПВОО) при воздействии ударных волн (далее – УВ), генерируемых обычными средствами поражения (далее – ОСП).

Задачи, решаемые в рамках исследования:

- сбор и обработка информации необходимой для описания процесса прогнозирования состояния ПВОО;

- разработка функциональной модели процесса прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов при взаимодействии длинных и коротких воздушных ударных волн, генерируемых обычными средствами поражения;

- разработка функциональной модели расчета оценки состояния пожаровзрывоопасных объектов после воздействия длинных и коротких ударных волн;

- разработка функциональной моделей вероятностной оценки состояния пожаровзрывоопасных объектов после воздействия длинных и коротких ударных волн;

Методами научно-практических исследований являются методы структурного системного анализа, проектирования и разработки информационного и программного обеспечения информационных систем.

ПВОО – объекты, на которых производятся, хранятся, транспортируются взрывоопасные продукты или продукты, приобретающие при определенных условиях способность к возгоранию или взрыву.

В процессе исследования предметной области было исследовано взаимодействие с органами военного командования по вопросам гражданской обороны (далее – ГО), а также построена модель функционирования ИС ПС ПВОО УВ ОСП.

Взаимодействие МЧС с органами военного командования по вопросам гражданской обороны занимает особое место. Это обусловлено тем, что мероприятия ГО будут осуществляться в условиях военного времени (военного положения) на территориях военных округов, где могут осуществляться боевые действия, а командующие военными округами будут решать в первую очередь задачу выявления непосредственной подготовки и отражения агрессии против Российской Федерации в границах ответственности. Следовательно, сроки, территория (объекты) и порядок ликвидации ЧС силами ГО должны быть тесно увязаны с планами командующего военным округом.

Кроме того, управление военного округа решает задачи оказания помощи органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации и органам местного самоуправления, органам управления других войск, воинских формирований в организации применения сил и средств, выделяемых военным округом для ликвидации чрезвычайных ситуаций. Помимо этого, управление военного округа решает задачи в организации восстановления нормального функционирования объектов повышенной опасности ВС РФ на территории военного округа, пострадавших в результате возникновения чрезвычайных ситуаций.

а) Организация взаимодействия по приведению в готовность по плану ГО:

- уведомление о внедрении соответствующих степеней готовности;

- уведомление об угрозах, возникающих при ведении военных действий либо вследствие этих действий;

- способность применения инфраструктуры и собственности боевых населенных пунктов с целью размещения и первоочередного жизнеобеспечения, эвакуируемого на территорию муниципального образования населения, материальных и культурных ценностей;

- организация ведения всех видов разведки и обмена информацией в области ГО;

- формирование группировки сил ГО в безопасных районах;

- использования маршрутов эвакуации населения, передвижения сил гражданской обороны;

- регулирование областей размещения эвакуированных жителей;

- осуществлении дорожно-комендантской службы;

б) после нанесения ударов противника обычными средствами поражения по территории муниципального образования – организация взаимодействия по вопросам:

- сбора данных о времени, месте и масштабах применения противником обычными средствами поражения;

- при образовании радиационной, химической, биологической, инженерной, пожарной и медицинской обстановки;

- приведения в готовность системы управления и сил ГО, а также организации АСДНР.

В соответствии с этими вопросами взаимодействия разрабатываются в рамках решений руководителей ГО на организацию и ведение ГО.

Структурно-функциональный анализ позволил разработать контекстную диаграмму верхнего уровня (см. рисунок 1).

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

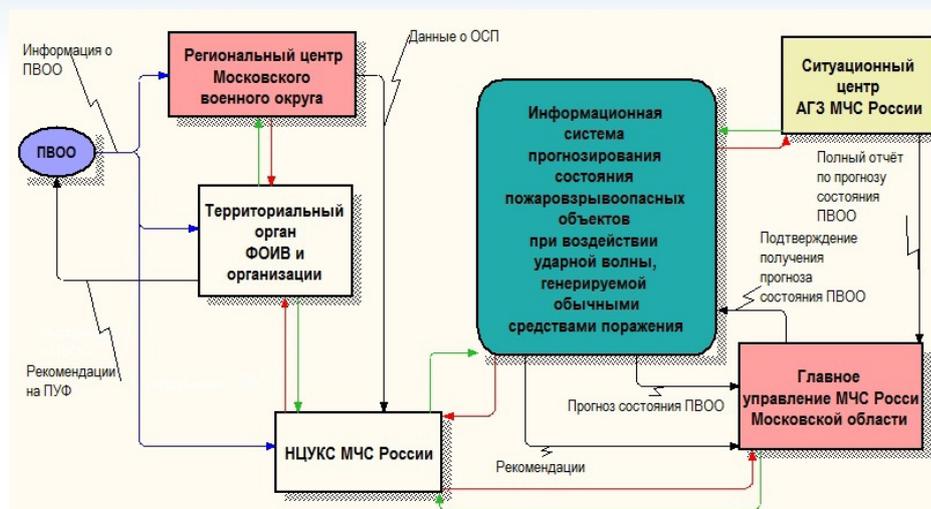


Рис. 1. Контекстная диаграмма верхнего уровня

Как видно из рисунка 1 ИС взаимодействует с внешними сущностями:

1. «Региональный центр Московского военного округа»;
2. «Территориальный орган ФОИВ и организаций»;
3. «Главное управление МЧС России Московской области»;
4. «НЦУКС МЧС России»;
5. «Ситуационный центр АГЗ МЧС России».

Первая сущность «Региональный центр военного округа» взаимодействует с комендантом местного гарнизона. Непосредственная работа по организации взаимодействия осуществляется органом управления муниципального образова-

ния, уполномоченным на решение задач ГО ЧС с комендантом местного гарнизона.

Вторая сущность представляет собой «Территориальный орган ФОИВ и организации».

В законе о ГО определяются полномочия органов исполнительной власти субъектов РФ, а именно:

- организация проведения мероприятий по ГО, реализация планов ГО и защиты населения;
- в пределах своих полномочий создавать и поддерживать в состоянии готовности силы и средства ГО;
- осуществить подготовку и обучение населения в области ГО;
- формировать и поддерживать в состоянии стабильной готовности к использованию технические системы управления ГО, системы оповещения населения об опасностях, возникающих при ведении военных действий или вследствие этих действий, а также об опасности возникновения или о возникновении ЧС природного и техногенного характера, защиты сооружений и других объектов ГО;
- формировать планы мероприятий по под-

готовке к эвакуации населения, материальных и культурных ценностей в безопасные районы, развертыванию лечебных и других учреждений для перво-

степенного обеспечения пострадавших;

- формировать планы на мероприятия по поддержанию устойчивого функционирования организаций в военное время;
- формировать и поддерживать в целях ГО запасы материально-технических, производственных, медицинских и иных средств;
- гарантировать уведомление населения об

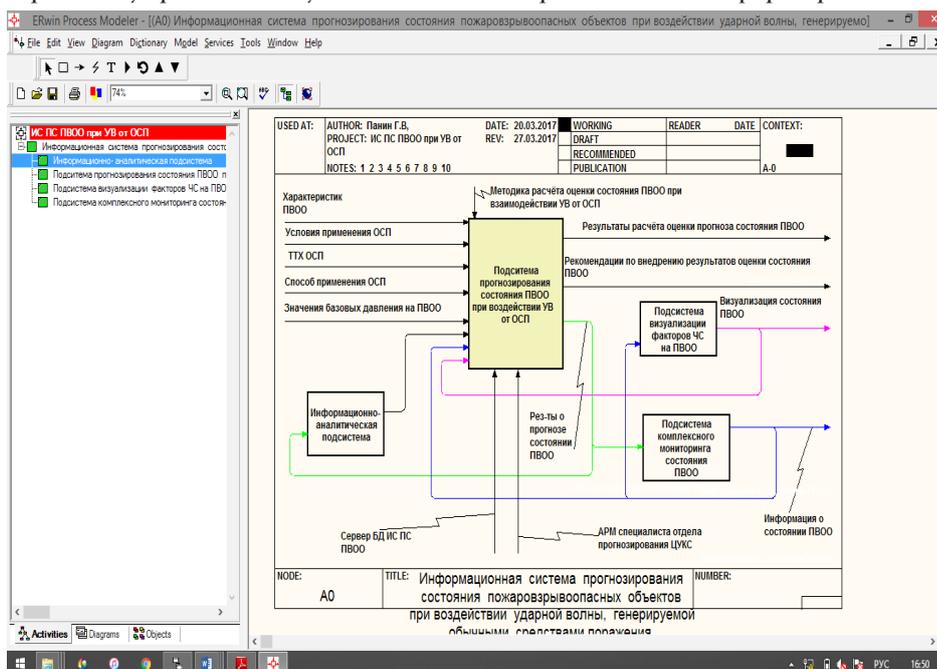


Рис. 2. Верхняя контекстная диаграмма подсистемы ИС ПС ПВОО УВ ОСП

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

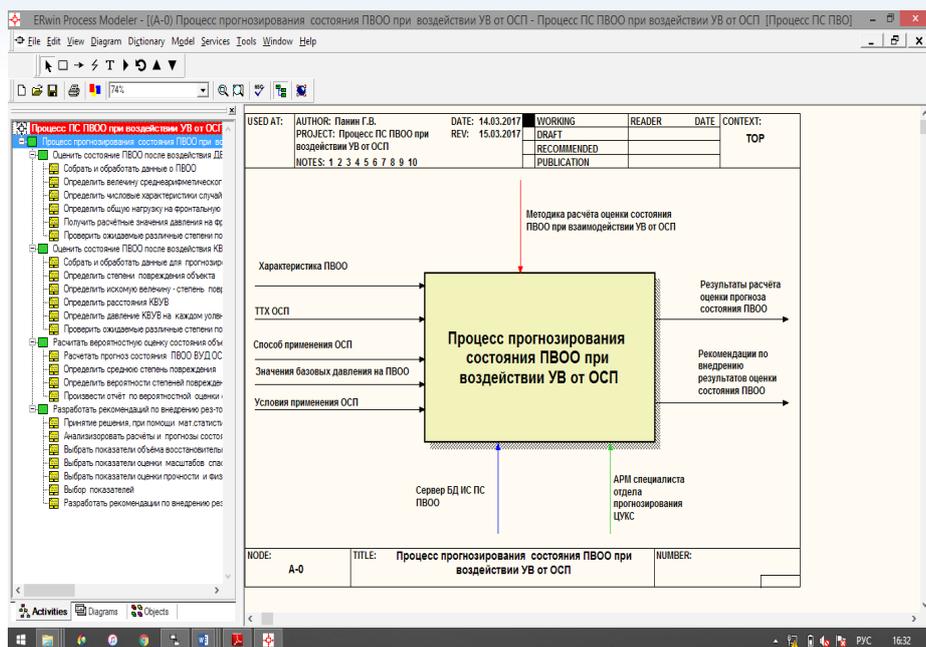


Рис. 3. Контекстная диаграмма верхнего уровня

угрозах, возникающих при ведении военных действий или вследствие этих действий, а также об опасности возникновения или о возникновении ЧС природного и техногенного характера.

Третьей внешней сущностью является «Ситуационный центр АГЗ МЧС России», которой выполняются основные работы функциональной активности ИС ПС ПВОО УВ ОСП. К таким работам относятся: сбор, хранение данных и их обработка для прогнозирования ЧС техногенного характера, вызванных взрывами на пожаровзрывоопасных объектах, генерация рекомендаций и подготовка отчетов.

В процессе прогнозирования состояния ПВОО участвуют такие сущности как «Главное управление МЧС России Московской области», «НЦУКС МЧС России», «Ситуационный центр АГЗ МЧС России».

В дальнейшем рассматривается верхняя контекстная диаграмма методологии IDEF0, в которой раскрываются все подсистемы ИС ПС ПВОО УВ ОСП (см. рисунок 2).

Подсистема «процесса прогнозирования состояния ПВОО при воз-

действии УВ от ОСП» предназначена для подготовки исходных данных для прогнозирования и их последующей загрузки в реляционное хранилище данных.

Исходные данные о состоянии пожаровзрывоопасных объектов при воздействии ударных волн, генерируемых обычными средствами поражения, рассчитываются по методике оценки состояния ПВОО.

Исходные данные прогнозирования ЧС техногенного характера, вызванных взрывами на ПВОО, определяются методикой расчета этих данных.

В Ситуационном Центре Академии гражданской защиты формируются необходимые рекомендации для руководителя «Территориального органа ФОИВ и организации» и руководителя ГУ МЧС России Московской области.

Разработка модели процессов функционирования ИС ПС ПВОО УВ ОСП была выполнена с помощью инструментального средства CA ERWin Process Modeler

В модели отображены следующие элементы:

Входные стрелки:

- Характеристика ПВОО;

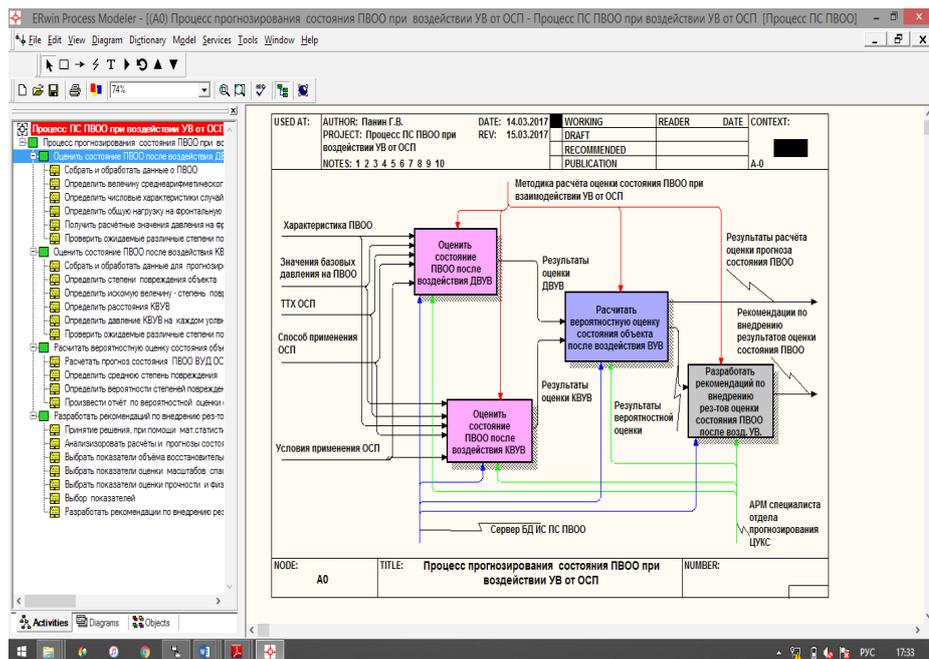


Рис. 4. Контекстная диаграмма уровня А0

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

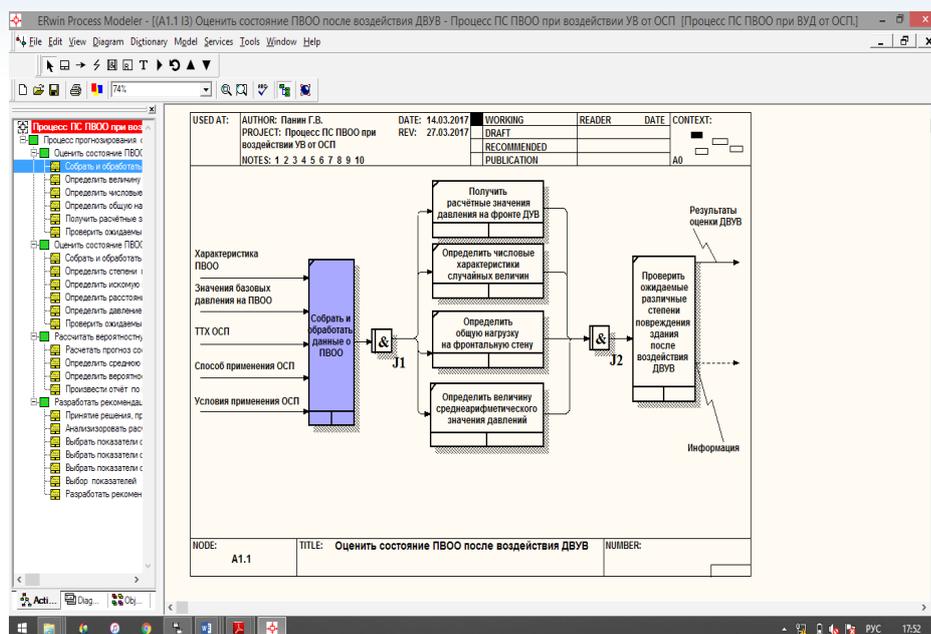


Рис. 5. Диаграмма декомпозиции уровня A1.1

- ТТХ ОСП;
- Способ применения ОСП;
- Значения базовых давлений на ПВОО.

Выходные стрелки:

- Результаты расчета оценки прогноза состояния ПВОО;
- Рекомендации по внедрению результатов оценки состояния ПВОО.

Стрелки управления:

- Методика расчета оценки состояния ПВОО при взаимодействии УВ от ОСП.

Стрелки механизмов:

- Сервер БД ИС ПС ПВОО;
- АРМ специалиста отдела прогнозирования ЦУКС.

Итоговая контекстная диаграмма верхнего уровня процесса прогнозирования состояния ПВОО при воздействии ударной волны, генерируемой обычными средствами поражения, представлена на рисунке 3.

Далее выполняется декомпозиция созданной контекстной диаграммы. При этом создается контекстная диаграмма уровня A0 (рисунк 4), состоящая из четырех блоков:

1. «Оценить состоя-

ние ПВОО после воздействия длинных воздушных ударных волн (ДВУВ);

2. «Оценить состояние ПВОО после воздействия коротких воздушных ударных волн (КВУВ);

3. «Рассчитать вероятностную оценку состояния объекта после воздействия воздушных ударных волн (ВУВ);

4. «Разработать рекомендации по внедрению результатов оценки состояния ПВОО при воздействии УВ».

Блок «Оценить состояние ПВОО после воздействия ДВУВ» далее детализируется диаграммой декомпозиции уровня A1.1 (рисунк 5). Она включает блоки:

1. «Собрать и обработать данные о ПВОО»;

2. «Получить расчетные значения давления на фронте ДУВ»;

3. «Определить числовые характеристики случайных величин»;

4. «Определить общую нагрузку на фронтальную стену»;

5. «Определить величину среднеарифметического значения давлений».

Блок «Оценить состояние ПВОО после воздействия КВУВ» детализируется диаграммой де-

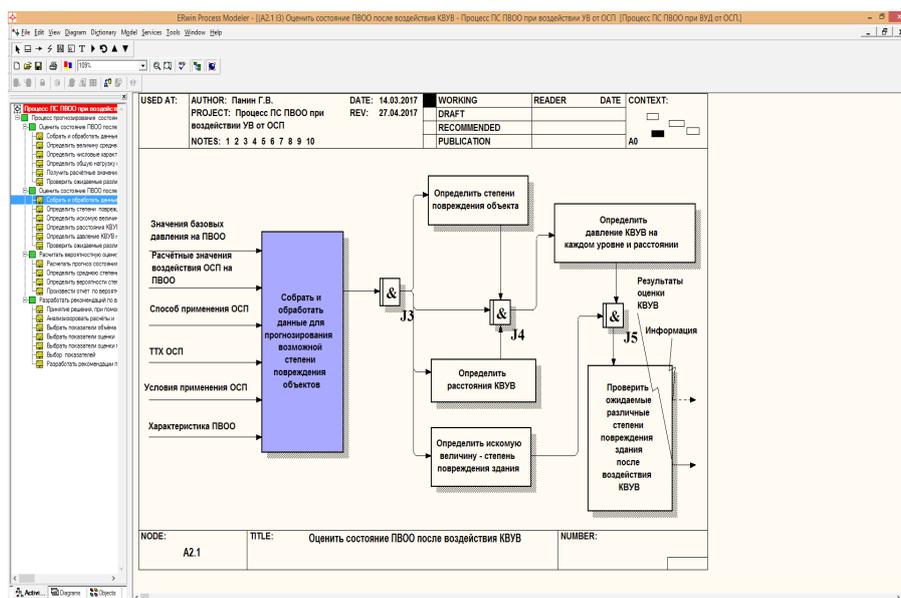


Рис. 6. Диаграмма декомпозиции уровня A2.1

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

композиции уровня А2 (рисунк 6).

Она состоит из блоков:

- «Собрать и обработать данные для прогнозирования возможной степени повреждения объектов»;
- «Определить степени повреждения объекта»;
- «Определить расстояния КВУВ»;
- «Определить искомую величину – степень повреждения здания»;
- «Определить давление КВУВ на каждом уровне и расстоянии»;
- «Проверить ожидаемые различные степени повреждения зданий после воздействия КВУВ».

Блок «Рассчитать вероятностную оценку состояния объекта после воздействия ВУВ» детализируется диаграммой декомпозиции уровня А3 (рисунк 7).

Она состоит из блоков:

- «Рассчитать прогноз состояния ПВОО ВУВ ОСП»;
- «Определить среднюю степень повреждения»;
- «Определить вероятности степеней повреждения здания»;
- «Произвести отчет по вероятностной оценке состояния объекта после ВУВ».

Блок «Разработать рекомендации по внедрению

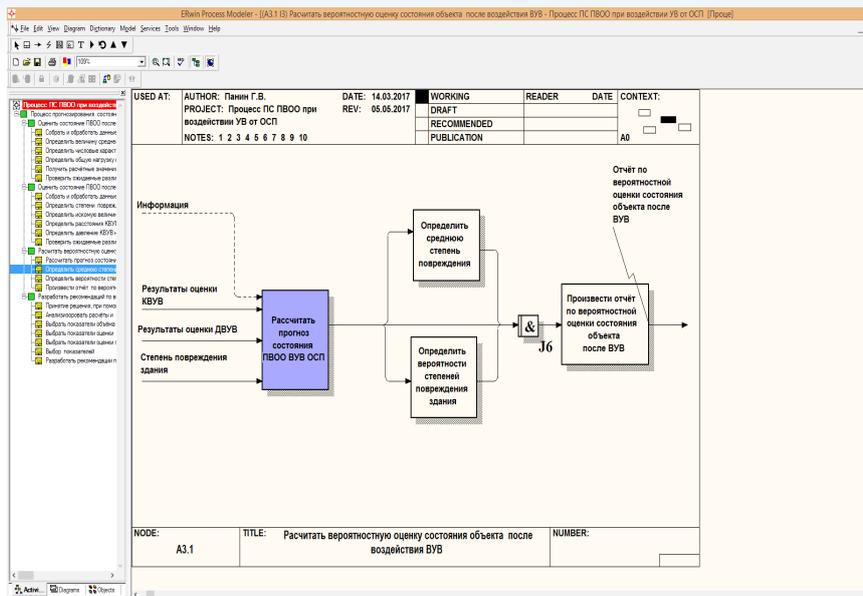


Рис. 7. Диаграмма декомпозиции уровня А3.1

нию результатов оценки состояния ПВОО после воздействия УВ» детализируется диаграммой декомпозиции уровня А4 (рисунк 8).

Она состоит из блоков:

- «Анализировать расчеты и прогнозы состояний ПВОО при ВУВ от ОСП»;
- «Выбрать показатели оценки прочности и физической устойчивости»;
- «Выбрать показатели объема восстановительных работ»;
- «Выбрать показатели оценки масштабов спасательных работ при аварийных взрывах»;
- «Выбор показателей»;
- «Разработать рекомендации по внедрению результатов»;

- «Принятие решения».

Таким образом, разработанная модель позволила выявить основные процессы и функции, реализуемые для процесса прогнозирования состояния ПВОО, и легла в основу создания информационной системы прогнозирования состояния пожаровзрывоопасных объектов при воздействии ударной волны, генерируемой обычными средствами поражения (по Московской области).

С помощью структурограмм описания данных детализируются потоки и накопители данных. Для каждого потока данных, ко-

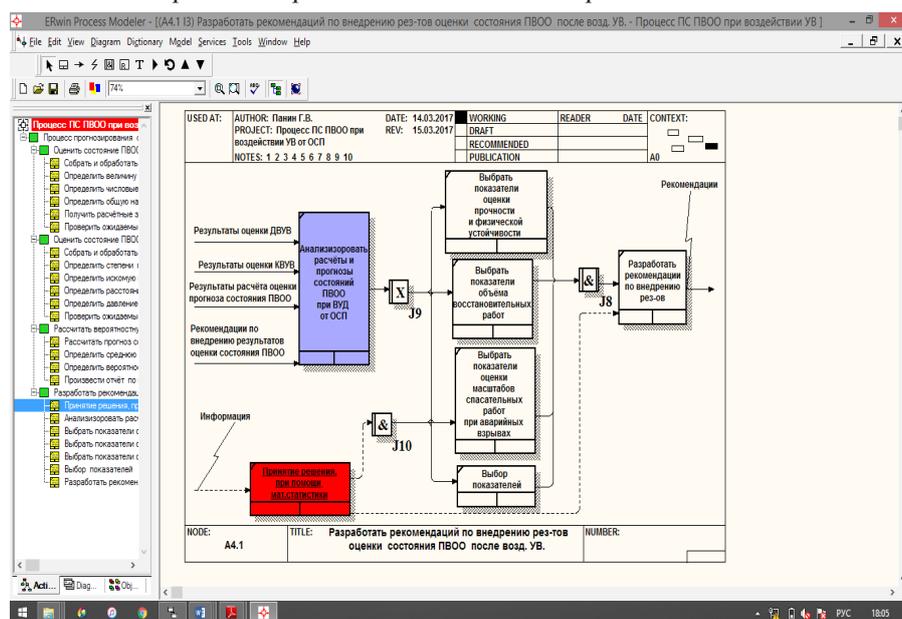


Рис. 8. Диаграмма декомпозиции уровня А4.1

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

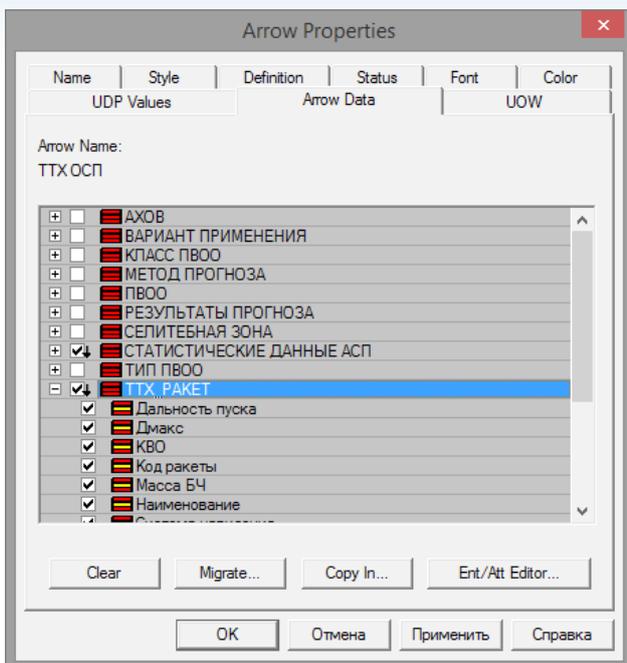


Рис. 9. Структурограмма описания данных с детализацией сущностей «ТТХ ракет»

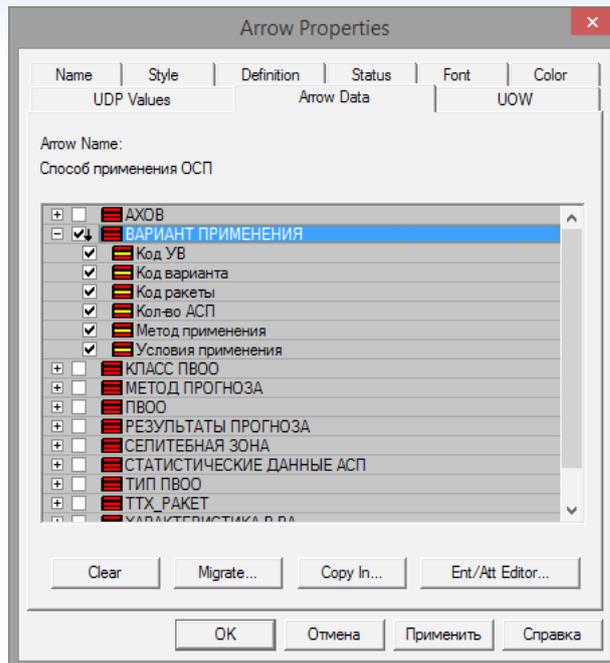


Рис. 10. Структурограмма описания данных с детализацией сущностей «вариант применения»

торые надо детализировать, создаются сущности и атрибуты.

На рисунках 9 и 10 представлена структурограмма описания потока данных «ТТХ ОСП» и «Способ применения ОСП».

Практическая реализация методологии IDEF1X с помощью «CA ERwin Data Modeler» имеет свои особенности. Основными уровнями представления модели данных в терминологии «CA ERwin Data Modeler» являются: логический (LogicalLevel) и физический (PhysicalLevel).

Сформированная ER-диаграмма представлена на рисунке 11.

Модель данных, основанная на ключах (KB-модель), кроме сущностей и связей, включает в

себя ключевые атрибуты сущностей: первичные (PK) и внешние (FK).

Определяем первичные ключи, используя следующие требования:

1. атрибуты первичного ключа не могут принимать неопределенные значения;
2. атрибуты первичного ключа должны однозначно идентифицировать экземпляр сущности;
3. количество атрибутов в первичном ключе должно быть минимальным.

Образованная KB-модель представлена на рисунке 12.

Полная атрибутивная модель дает наиболее детальное представление о структуре проектируемой БД: представляет данные в третьей нормальной форме и включает все сущности, атрибуты и связи.

Сформированная FA-модель предметной области представлена на рисунке 13 (на логическом уровне представления данных).

FA-модель зависит от конкретной СУБД и содержит информацию о всех объектах БД. Стандартизированного метода создания универсальной БД не существует, так как физическая модель зависит от опреде-

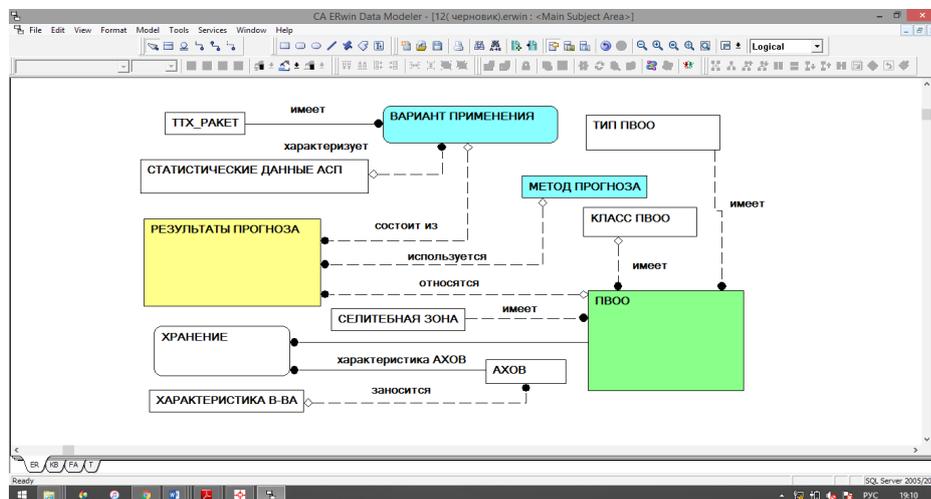


Рис. 11. ER-диаграмма базы данных ИС

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ленной СУБД. Важным пунктом проектирования БД в физической модели является описание всей информации о конкретных физических объектах.

Определяя домены атрибутов для каждой сущности, области их допустимых значений и типы данных, мы создаем трансформационную модель для определенной СУБД (рисунки 14).

Далее была разработана DBMS-модель в виде SQL-кода. Его интерпретация позволила получить схему базы данных в формате СУБД «1С: Предприятие» на физическом уровне.

При разработке ИС ПС ПВО УВ ОСП выбрана технологическая платформа «1С: Предприятие 8.3 (8.3.5.1460)» (рисунки 15).

Для внедрения прототипа в жизнь, мы сначала опирались на метаданные и единую модель, рассмотрели элементы системы, которые будут связаны друг с другом на клиентской стороне пользователя.

Еще одним преимуществом в реализации поставленных задач на платформе 1С является ориентированность платформы на ведение ре-

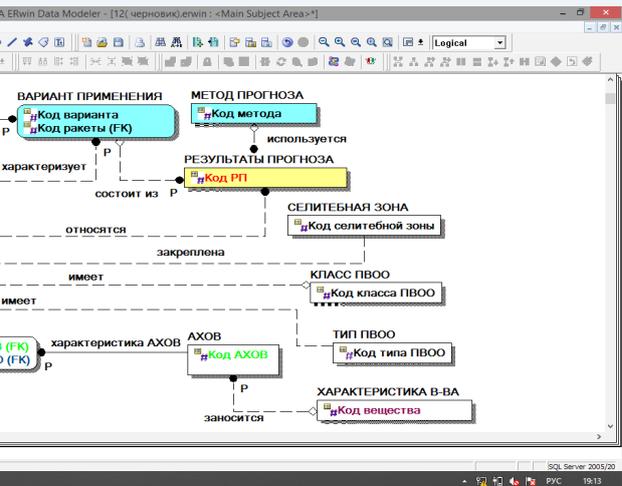


Рис. 12. KB-модель базы данных ИС

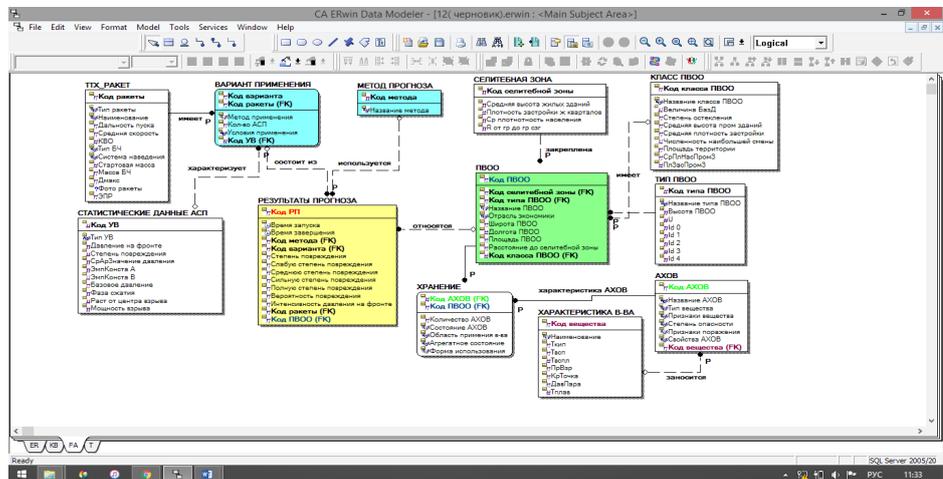


Рис. 13. FA-модель базы данных ИС

гистров документов и осуществление таблиц и диаграмм результирующих данных в процессе расчетов.

В разработки ИС ПС ПВО УВ ОСП использованы такие объекты конфигурации как: справочник, регистры сведений, документы,

перечисления, макеты, команды, роли, общие модули и формы, отчеты с печатной формой и другое.

Объект конфигурации «Справочник» предназначен для сбора и хранения данных в виде списков. С помощью «Справочников» основывается платформа, которая реализуется в виде БД. БД ИС ПС ПВО реализовывалась на таких «Справочниках» (рисунки 16).

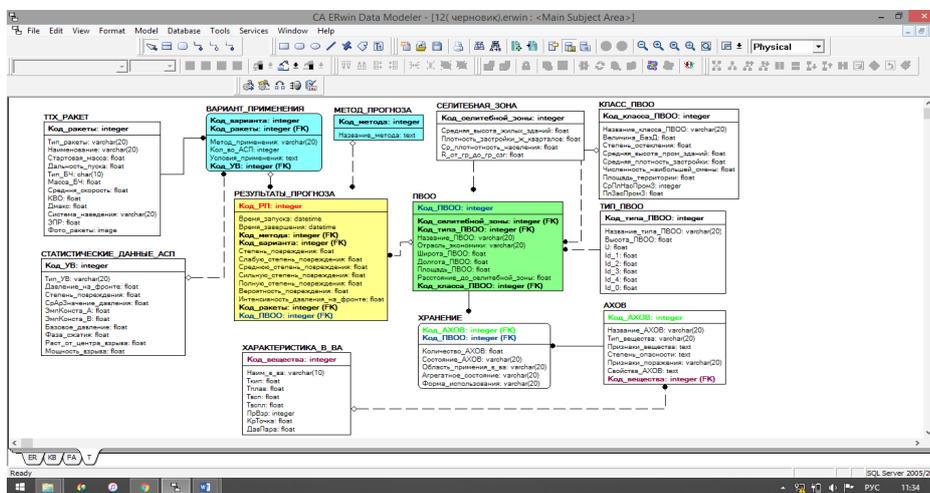


Рис. 14. Т-модель данных

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

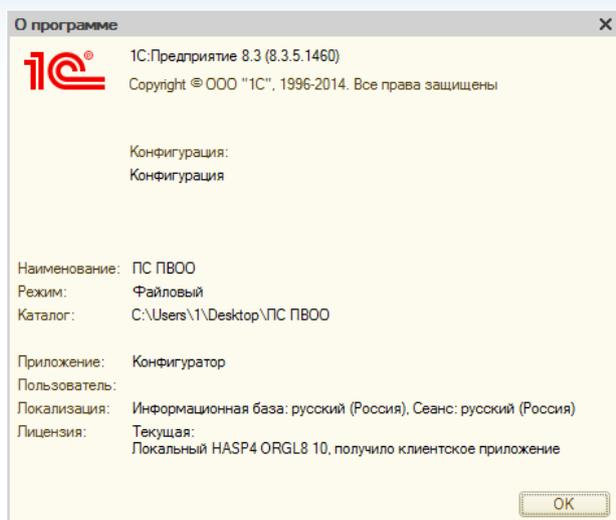


Рис. 15. Справка о программе «1С: Предприятие»

Для создания расчетов прогнозирования состояния ПВОО при взаимодействии УВ, генерируемыми ОСП, создавались документы (показаны на *рисунке 17*).

В документе «Оценка Состояния ДУВ» осуществлены реквизиты (показанные на *рисунке 18*):

- Высота здания;
- Степень остекления;
- Тип здания;
- Степень повреждения 1;

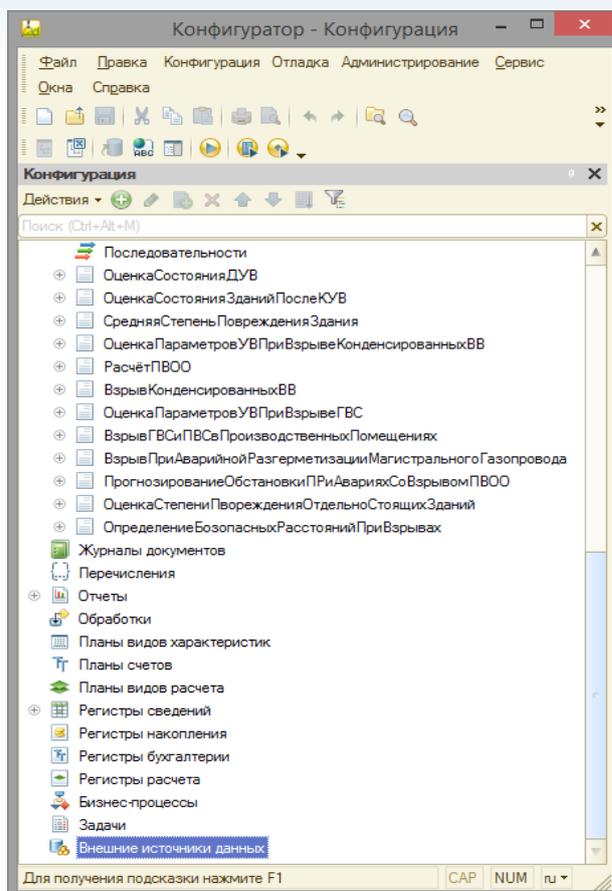


Рис. 17. Документы конфигурации

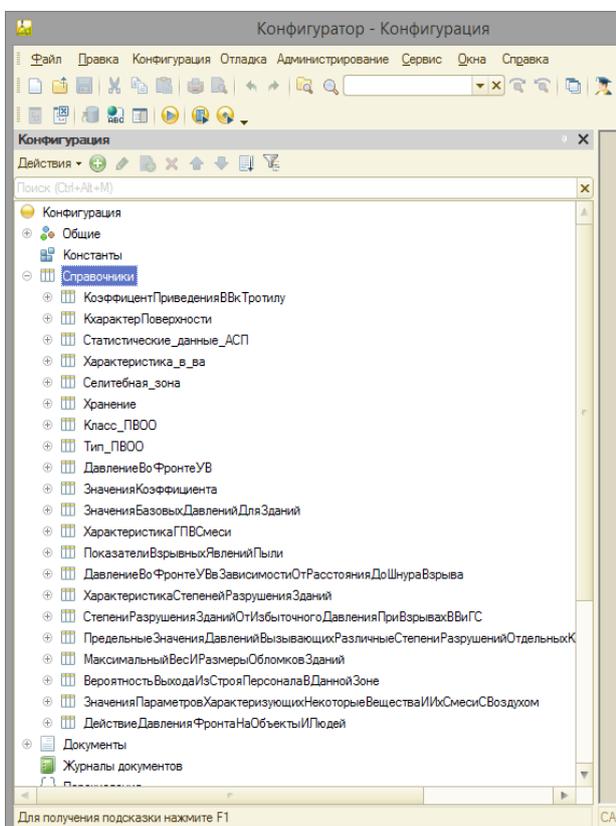


Рис. 16. Справочники конфигурации

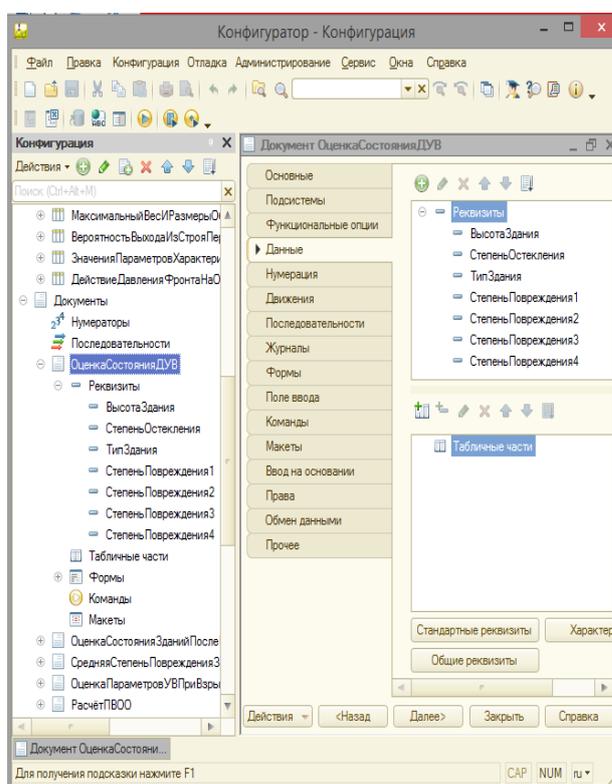


Рис. 18. Документы конфигурации «Оценка Состояния ДУВ»

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Дата	Высота здания	Степень повреждения	Тип здания	Степень повреждения1	Степень повреждения2	Степень повреждения3	Степень поврежд
18.04.2017 13:45:08	24,00	0,50	С легким металле...	15,73	28,96	42,19	
01.05.2017 12:34:56	25,00	0,60	Деревянные	5,61	10,69	15,58	
02.05.2017 12:41:24	34,00	0,20	С легким металле...	12,10	22,28	32,46	
02.05.2017 12:56:51	25,00	0,44	Кирпичный бескарка...	9,79	18,03	26,26	
03.05.2017 11:41:02	26,00	0,40	С тяжёлым каркас...	21,90	40,31	58,72	

Рис.19. Подсистема «Расчет оценки объекта»

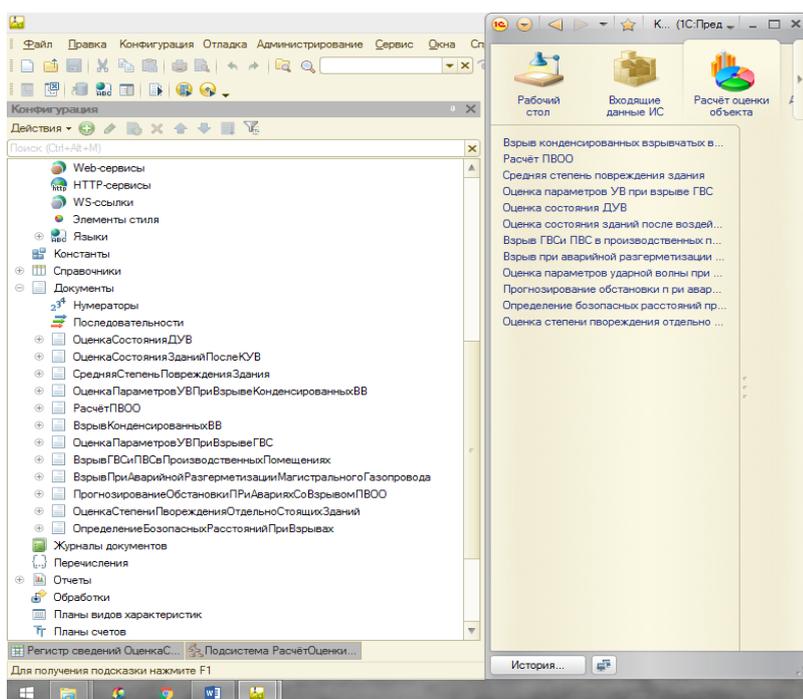


Рис. 20. Документы для расчета прогноза состояния ПВОО

Здание	Давление, кПа
Антисейсмические железобетонные	80
Деревянные	7
Железобетонные каркасные	27
Кирпичные бескаркасные	13
С лёгким металлическим каркасом и бескаркасные	20
С метал. каркасом и заполнением из волнистой стали	10
С тяжёлым каркасом и без кранового оборудования	25
С тяжёлым каркасом и крановым оборудованием	30

Рис. 21. Справочник «Значения Базовых Давлений Для Зданий»

- Степень повреждения 2;
- Степень повреждения 3;
- Степень повреждения 4.

«Документ» предназначен для хранения и описания информации, также он является прикладным объектом конфигурации, обладая способностью проведения фактов, означая то, что событие, которое он хранит, используется для расчета оценок состояния ПВОО. Для отражения и анализа расчетов в подсистеме «Расчет оценки объекта» (рисунки 19) собраны документы для проведения расчетов (рисунки 20).

Документ «Оценка Состояния ДУВ» рассчитывает показатели воздействия ДУВ на здание. Последующими действиями полученные данные с расчета этого документа послужат для расчета всего прогноза состояния ПВОО. Дополняется данными из справочника «Значения Базовых Давлений Для Зданий» (рисунки 21).

В справочнике «Значения Базовых Давлений Для Зданий» хранятся статистические данные, которые были выделены экспериментальным методом.

При создании справочника «Значения Базовых Давлений Для Зданий» в закладке Данные задали длину кода – 10, тип кода – Строка, длину наименования справочника равной 100 символам в виде наименования. Для именования здания применяется стандартный реквизит, дополнительным реквизитом является «Давление» с типом «Число», длиной равной 5 с неотрицательным явлением (рисунки 22).

Для создания в базе данных структуры, которая позволяет накапливать информацию для удобного анализа, применяется один из объектов конфигурации «Регистр сведений». Назначение регистра сведений – для накопления информации. Поэтому для проведения отчетов взяли за основу регистр сведений, одним из основных примеров является регистр сведений «Оценка Состояния ДУВ».

Измерения регистра:

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

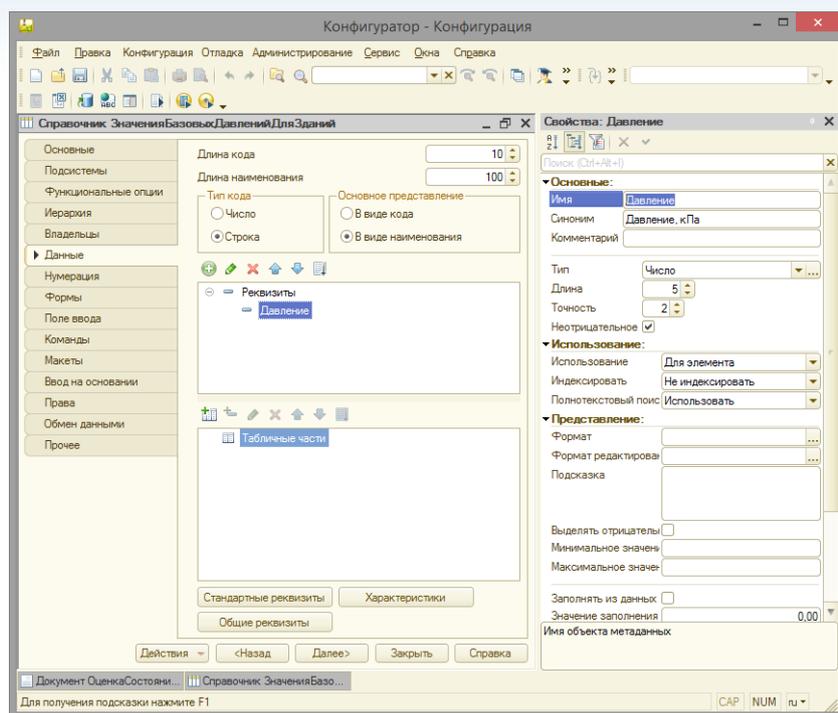


Рис. 22. Объект конфигурации – справочник «Значения Базовых Давлений Для Зданий»

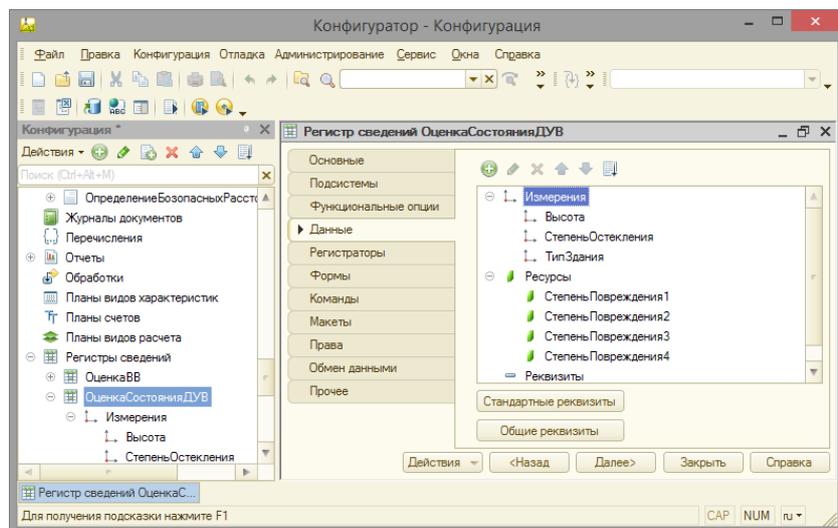


Рис. 23. Объект конфигурации регистр сведений «Оценка Состояния ДУВ»

- «Высота» – тип СправочникСсылка. ОценкаСостоянияДУВ;
 - «Степень Остекления» – тип СправочникСсылка. ОценкаСостоянияДУВ;
 - «Тип Здания» – тип СправочникСсылка. ОценкаСостоянияДУВ;
- а ресурсами послужили степени повреж-

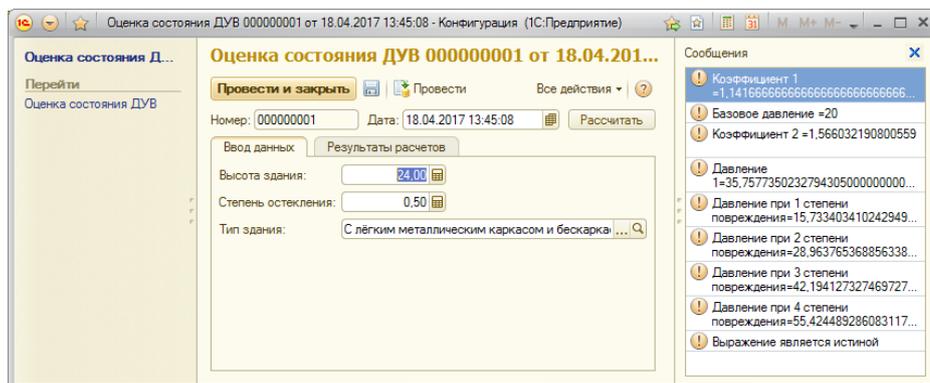


Рис. 24. Расчет оценки состояния ДУВ

дения при выводе результата расчета (рисунк 23).

Процесс отражения изменений в документах в «1С: Предприятие» представлен в виде «Движения документа», о чем делаются записи в регистрах при изменениях в документах. Примеры расчетов показаны на рисунках 24-26.

Происходит запись в регистрах, которые создаются в процессе ведения документа.

После накопленных в регистре «Оценка Состояния ДУВ» полученных данных из документа «Оценка Состояния ДУВ», происходит анализ, и эти же данные обрабатываются для дальнейшего использования.

После расчета документа «Взрыв конденсированных взрывчатых веществ» получаем отчет. Сам объект конфигурации «Отчет» является прикладным инструментом, предназначенным для описания алгоритмов, при получении необходимых входных данных. «Отчет» строится на таблицах, диаграмм и пр.

Для всех документов созданы отчеты для формирования первичных обработанных данных для объединения результирующего прогноза состояния ПВОО. Пример первичного отчета документа «Взрыв конденсированных взрывчатых веществ» представлен на рисунках 27 и 28.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

действия длинных и коротких ударных волн;

- разработан проект ИС ПС ПВОО УВ ОСП в средах CA ERWin Process & Data Modeler;

- разработан прототип ИС ПС ПВОО УВ ОСП в среде ИС 1С: Предприятие 8.3.

Информационная система прогнозирования состояния ПВОО при воздействии УВ, генерируемых ОСП, может быть реализована в главных управлениях МЧС России по субъектам РФ.

Литература

1. Качанов С.А., Нехорошев С.Н., Попов А.П. Информационные технологии поддержки принятия решений в чрезвычайных ситуациях: Автоматизированная информационно-управляющая

система единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: вчера, сегодня, завтра: Монография. М.: Деловой экспресс, 2014. 400 с.

2. Саяпин О.В., Самойлов С.В., Чискидов С.В. Проектирование АСОИУ. Часть 1: Учебное пособие для вузов МЧС России. Химки: ФГБОУ ВПО АГЗ МЧС России, 2013. 168 с.

3. Исаев Г.Н. Проектирование информационных систем: Учебное пособие. М.: Омега-Л, 2013. 424 с.

4. Белов В. В. Проектирование информационных систем: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. В. Белов, В. И. Чистякова; под ред. В. В. Белова. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 352 с.

5. Советов Б.Я., Цехановский В.В., Чертовский

В.Д. Базы данных. Учебник для прикладного бакалавриата. М.: Юрайт, 2014. 463 с.

6. Туманов В.Е. Основы проектирования реляционных баз данных. М.: Интернет-университет информационных технологий, 2014. 420 с.

7. Кузнецов С.Д. Базы данных. Учебник. М.: Издательский центр «Академия», 2012. 496 с.

8. Радченко М.Г. 1С: Предприятие 8.3. Практическое пособие для разработчика. М.: ООО «1С – Паблишинг», СПб: Питер. 2013. 912 с.

9. Егоров П.Т., Шляхов И.А., Алабин Н.И. Гражданская оборона. М.: Высшая школа, 1977. 205 с.

10. Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А., Костин А.И., Ларионов В.И. Убежища гражданской обороны. Конструкции и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 605 с.

11. Колибернов Е.С., Корнев В.И., Сосков А.А.

Справочник офицера инженерных войск. М.: Воениздат, 1989. 432 с.

12. Мартемьянов А.И. Восстановление и усиление зданий в сейсмических районах. М.: Наука, 1988. 264 с.

13. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Л.: Судпромгиз, 1962. 312 с.

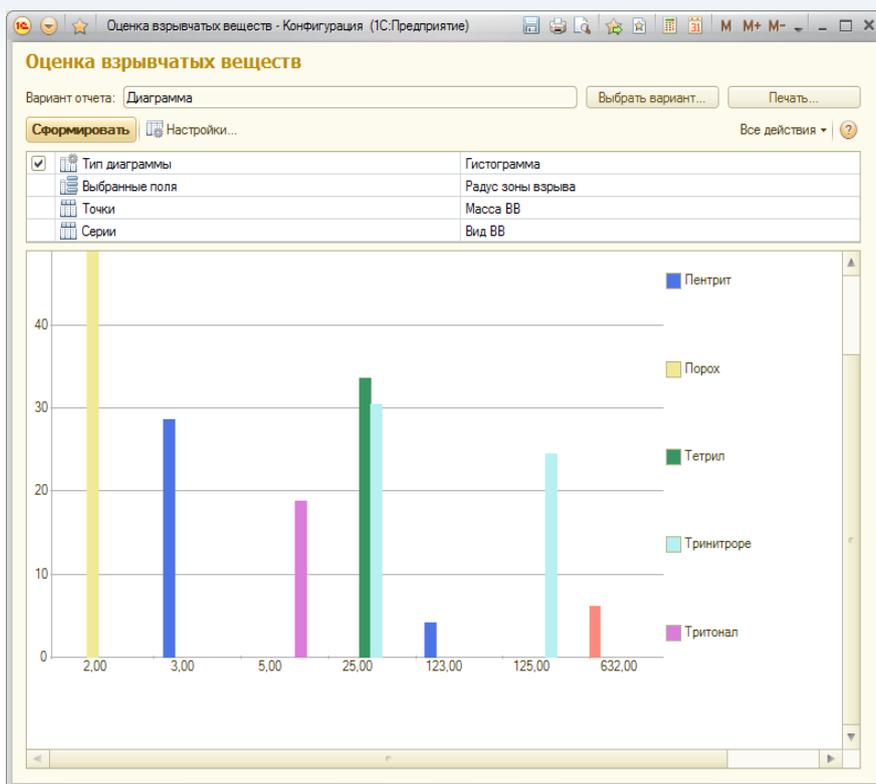


Рис. 28. Отчет в форме гистограммы «Оценка взрывчатых веществ»

Вид ВВ	2,00	3,00	5,00	25,00	123,00	125,00	632,00	Итого
	Радиус зоны взрыва							
Аммонал							6,06	6,06
Пентрит		28,60			4,15			32,75
Порох	50,66							50,66
Тетрил				33,54				33,54
Тринитроре				30,45		24,47		54,92
Тритонал			18,77					18,77
Итого	50,66	28,60	18,77	63,99	4,15	24,47	6,06	196,70

Рис. 29. Печатная форма табличной части отчета «Оценка взрывчатых веществ»

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 539.182

ИДЕИ И МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗАПУТЫВАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СПИН- КУБИТОВ. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНСАМБЛЬ И МАТРИЦА ПЛОТНОСТИ

ON THE IDEAS AND METHODS OF THE SOLID SPIN-STATE QUBIT ENTANGLEMENT. STATISTICAL ENSEMBLE AND DENSITY MATRIX

Геннадий Германович Волков

*доктор физико-математических
наук, профессор*

ведущий научный сотрудник
ФГБУ Петербургский институт ядерной
физики им. Б.П. Константинова
188300, Ленинградская обл.,
г. Гатчина, Орлова роща, д. 1
Тел.: +7(813)714-60-25
E-mail: gennadii.volkov@rambler.ru

Сергей Владимирович Смуров

почетный работник науки и техники РФ

доктор технических наук, профессор
Первый заместитель Генерального
директора по научной работе –
главный конструктор МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: sv@mail.ru

Александр Альбертович Масликов

*кандидат физико-математических
наук, доцент*

старший научный сотрудник
филиал «Протвино» Государственного
университета «Дубна»
Адрес: 142281, Московская обл.,
г. Протвино, Северный проезд, д. 9
Тел.: +7(4967)31-01-92
E-mail: masspref@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрение системы, состоящей из двух и более кубитов, приводит к необходимости использования матрицы плотности для описания такой составной системы, запутывание которой является ресурсом квантовой информации, например, телепортации, квантовых вычислений, сверхплотного кодирования и многого другого. Конкретно, наши интересы будут включать два направления запутывания спин-электронных, спин-электрон-фотонных, спин-электрон-ядерных состояний в системе двух твердотельных кубитов, соответственно разделенных как (а) на малые, так и (б) на достаточно длинные расстояния. В последние несколько лет в этих направлениях уже получены первые пионерские результаты по запутыванию спин-электронных состояний двух NV-центров, в одном эксперименте, находящихся на расстоянии 25 нм при комнатной температуре (а), а в другом – удаленных один от другого на три метра в условиях низкой криогенной температуры (б). Наши интересы связаны с изучением возможностей расширения самих идей и методов этих с целью получения эффектов запутанности спиновых состояний двух и более твердотельных кубитов на удаленных расстояниях при комнатной температуре. В этой статье мы отталкиваемся от основ динамики квантового запутывания составных спин-электронных состояний в рамках возможностей аппарата матриц плотности.

Ключевые слова: составные квантовые системы, квантовая запутанность, NV-центры в алмазе, спин-электрон кубиты, матрица плотности.

Summary

Consideration of a system consisting of two or more qubits leads to the need to use a density matrix to describe such a composite system, entanglement of which is a resource of quantum information, for example, teleportation, quantum computing, superdense coding, and much more. Specifically, our interests will include two directions of entanglement of spin-electron, spin-electron-photon, spin electron-nuclear states in a system of two solid-state qubits, respectively separated both (a) into small and (b) into sufficiently long distances. In the past few years, the first pioneering results on the entanglement of the spin-electronic states of two NV-centers have already been obtained in these directions, in one experiment, located at a distance of 25 nm at room temperature (a), and in the other, three meters distant from each other under conditions of low cryogenic temperatures (b). Our interests are connected with the study of the possibilities of expanding the very ideas and methods of these with the aim of obtaining the effects of entanglement of the spin states of two or more solid qubits at remote distances at room temperature. In this paper, we start from the fundamentals of the dynamics of quantum entanglement of composite spin-electronic states within the framework of the capabilities of the density matrix apparatus.

Keywords: compound quantum systems, quantum entanglement, NV-centers in diamond, spin-electron qubits, density matrix.

Глава 1.

Введение. Квантовая физика от начала ее создания до современной квантовой информации

Чтобы прочувствовать временной прогресс в развитии необычной почти мифической идеологии квантовой физики и создаваемой на ее основе квантовой информации, надо обратиться лет на 150 и немного более назад и проследить шаги ее становления вместе с великими открытиями, совершенными в трудностях преодоления формирования такого сознания, которое смогло принять эти необычные, казалось бы, абсолютно некорректные идеи.

Квантовая физика зародилась с проблем описания явлений микромира атомов и света и прогрессировала в жарких дебатах в процессе возникновения и дальнейшего развития таких необычных, но революционных идей, как принцип суперпозиции, волновой и операторный формализм Гильбертова пространства, электромагнитная и спиновая природа материи видимой части Вселенной, принцип тождественности частиц, и, наконец, такое явление как запутывание квантовых состояний, разделившего научный мир того времени на два лагеря, Копенгагенский и его оппоненты. Поэтому будет полезно выделить три этапа.

I этап. Прогресс в систематизации Менделеевым всех атомов природы и единая теория электромагнетизма и света, сформулированная в уравнениях Максвелла, можно считать отсчетом создания новой физики, за пределами классической физики, которая взяла на себя ответственность описывать явления микромира, которые напрямую связаны с природой и динамикой Космоса.

Атом водорода и его дискретная спектроскопия Ридберга. Массивные атомы и их радиоактивность – нестабильность материи.

Волновая теория света и абсолютизм скорости света – Макейльсон, Морли плюс группа симметрий преобразования Лоренца (В. Вогт, 1887) – легли в основу той теории относительности, которая еще тогда не подозревала о существовании у элементарных базовых частиц вселенной спиновой структуры. Излучение черного тела и формулы Вина и Планка: $E = h\nu$ и использование ее в фотоэффекте Эйнштейном.

II этап. Открытие электрона и теория его взаимодействия Лоренца, эффект Зеемана, открытия Томсоном электрона и Резерфордом ядерной структуры атома, полуклассическое квантование атома Бором и Зоммерфельдом.

III этап. Создание аппарата нерелятивистской квантовой механики:

а) операторный + соотношения неопределенности + матричный = формализм Гейзенберга (квантование осциллятора)-Борн-Паули (квантование атома Водорода)-Дирак (релятивистика и анти-мир);

б) волновой Де-Бройль + Шредингер (волновые функции).

Принципы суперпозиции и измерения квантовых состояний – от волновых функций к матрицам плотности.

в) доказательство дуализма этих двух методов – корпускулярный и волновой; открытие нового квантового числа атомов электронов – спин и открытие спиновой квантовой механики. Квантовая спин-статистика-фермионы + бозоны. Квантовомеханическое доказательство систематизации Менделеевым атомов электро-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

магнитно-видимой Вселенной – небольшой части Гипер-Вселенной! Создание квантовой физики ядра – протоны+нейтроны. Триумфальное шествие квантовой физики от нерелятивистской к релятивистской и затем к созданию квантовой теории поля, в которой волновые функции частиц будут уже операторами и появится такое необычное понятие как антикоммутируемость фермионных полей.

Главный итог квантовой теории: будут введены механизмы рождения и распадов материи. Так как наша биологическая жизнь на земле связана с низкими скоростями, $v \ll c$ (c – скорость света), то практическое внедрение квантовой физики началось с нерелятивистской квантовой механики, которая в последние десятилетия трансформировалась в практическую нанофизику, включающую в себя уникальные возможности непосредственного манипулирования квантовыми состояниями, как атомных, так и ядерных систем. И главным оружием этого манипулирования стали спины фотона, электронов, протонов, нейтронов, ядер.

Как лазерный луч меняет электронные состояния атомов? Как радиоволны, СВЧ и вообще излучение, видимое и невидимое – возбуждают ядра и атомы в ткани человека? Как ДНК переносит информацию биологических индивидуумов через тысячелетия, десятки тысячелетий? Как работает наш мозг – квантовый компьютер? Как квантовая атомно-молекулярная составляющая человека взаимодействует с другими представителями биологического микромира?

Все это некоторые примеры физических процессов, управляемых квантовой механикой, теорией, описывающей, как окружающий мир ведет себя в масштабе атомов, электронов и молекул, и составляющей основу всего нашего понимания микроскопических явлений, которые могут быть запутаны с масштабными космическими процессами, несущих как рождение, так и гибель цивилизаций. Грандиозные успехи на заре квантовой физики ознаменовались квантованием систем, состоящих из чистых состояний. Здесь имеется в виду как квантование атома водорода, так и квантование многоэлектронных атомов таблицы Менделеева. В квантовой физике можно обозначить ряд труднопреодолимых для сознания человека направлений, которые представляют наиважнейшие интересы как для дальнейших более тонких теоретических исследований динамики микромира, так и для практических целей. Одно из них связано с квантованием много-частичных систем и восходит еще к старой классической Проблеме Трех (и более) Тел. Другое направление связано с явлением за-

путанности, с которым столкнулись в квантовой физике при описании эволюции составных систем.

Квантовая запутанность между пространственно разделенными квантовыми состояниями является одним из тех интригующих явлений в микроскопической физике, практическое проникновение в которую могло бы прояснить перечисленные выше вопросы и могло бы позволить решить уникальные задачи квантовых технологий и квантовой информации [1]. Запутывание, которое в результате независимых измерений на пространственно-разделенных объектах, показывает корреляционные эффекты, которые нельзя объяснить классической физикой – это один из феноменов квантовой физики. Будучи признанным своеобразным противостоящим человеческой интуиции свойством квантовой теории, оно превратилось в уникальный ресурс для квантовой обработки информации и коммуникации. За последние несколько десятилетий был проведен ряд экспериментальных демонстраций сцепления между фотонами, атомами, ионами и твердотельными системами, такими как квантовые точки, сверхпроводящими цепями и макроскопическими алмазами. Квантовая сеть может быть построена путем использования сцепления для соединения локальных вычислительных узлов, каждая из которых содержит регистр хорошо управляемых и долгоживущих кубитов. Твердые тела являются привлекательной платформой для таких регистров, так как использование нанообработки и дизайна материалов может обеспечить хорошо контролируемые и масштабируемые квазисистемы. Потенциальное влияние квантовых сетей на науку и технику в последнее время стимулировало исследовательские усилия по созданию запутанных состояний отдаленных твердотельных кубитов. Первым кандидатом на твердотельный квантовый регистр является центр дефектов азота (NV) в алмазе. Центр NV объединяет долгоживущий электронный спин ($S=1$) с надежным оптическим интерфейсом, позволяющий измерять и контролировать на высоком уровне спиновой кубит.

Термин «квантовый контроль» охватывает разнообразное поле исследований, от контроля спиновой динамики и основанных на подходах, разработанных в контексте электронного парамагнитного резонанса – ЭПР или двойного электронного резонанса – ДЭЭР, где можно спин-электронные состояния возбуждать лазерным светом и управлять ВЧ-сигналами, ансамблей ядерного магнитного резонанса (ЯМР), где ядерные спиновые состояния уже управляются

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

радиочастотными (РЧ) импульсами. Кроме того, электронный спин NV можно использовать для доступа и манипулирования спинами путем формирования многоциклового регистра. Для использования таких регистров в квантовой сети требуется механизм для последовательного подключения удаленных NV-центров. Генерация сцепления между кубитами спиновых NV-центров в отдаленных установках достигается, объединением недавно созданных методов инициализации спина и однократного считывания с эффективным резонансным оптическим детектированием и управлением на основе обратной связи по оптическим переходам, совершая операции в одном эксперименте. Достигнутые результаты представили твердотельные кубиты как высоко обещающие кандидаты на внедрение квантовых сетей на один уровень с захваченными атомарными кубитами.

Центр NV имеет спиновые степени свободы, связанные как с связанными электронами, так и соседними ядерными спинами и, подобно атомным состояниям, эти спины могут быть решены с использованием оптических переходов. В то же время твердотельный хост обеспечивает быстрое электрическое и магнитное управление с использованием встроенной проводки и волноводов аналогично, фотонные структуры могут быть изготовлены, чтобы создать эффективный оптический интерфейс. Достигнуто множество демонстрационных демонстраций, таких как одно-, двух-кубитовые операции, высокоточное однократное считывание, одно- и двух-кубитовые алгоритмы и запутанность между ядерными и электронными и ядерными кубитами спина. Именно дефектные спины в алмазе стали представлять в последнее время собой как особенно привлекательные для практики твердотельные спин-кубитовые системы.

Современные инженерные решения в запутанности квантовых состояний являются решающим шагом в квантовой технологии. Хотя запутанность среди слабо взаимодействующих систем, таких как фотоны, была продемонстрирована уже на ранних этапах квантовой оптики, детерминированная генерация запутывания в более сложных системах, такие атомы или ионы, не говоря уже о твердых телах, являются относительно недавним достижением. Обычно в твердотельных системах быстрая дефазировка прекращает любую полезную степень квантовых корреляций. Либо развязка должна использоваться для защиты квантовых состояний, либо требуется тщательная инженерия материалов для увеличения согласованности. Чаще всего, и это особенно важно для твердотельных систем, нужно прибе-

гать к низким (милли-градусным) температурам для достижения достаточно надежной и долговременной квантовой когерентности.

Спины достаточно слабо связаны с окружающей средой, чтобы обеспечить наблюдение когерентности при комнатной температуре. Кроме того, время жизни электронного спинового переплетения распространяется на миллисекунды путем переплетения переходов в ядерные спины.

В настоящее время в прямой зависимости от целей создания:

I) квантового компьютера, магнетометрии и других методов изучения процессов клетки и других микрообъектов;

II) дальней криптографической связи и телепортации.

развиваются два направления:

I) генерация запутанных квантовых ансамблей на микро расстояниях до 25-50 нм;

II) генерация запутанности нескольких квантовых центров на огромных расстояниях.

В соответствии с этими задачами были предложены различные схемы масштабирования системы запутанных спин-электронных состояний. В последнее время сделаны первые и впечатляющие успехи по этим двум направлениям:

I) запутывание между двумя одиночными спин-дефектами в алмазе при комнатной температуре [2,3];

II) геральдовое и детерминистское запутывания между твердотельными кубитами при низкой температуре, разделенное на три метра [4,5]. Безусловная квантовая телепортация между удаленными твердотельными кубитами. Квантовое переплетение между оптическим фотоном и твердотельным спин-кубитом [6]

Эксперименты отмечают важный шаг к масштабируемому квантовому устройству при комнатной температуре, который потенциально может использоваться для обработки квантовой информации. Путь к перепутыванию при комнатной температуре является следствием сильной связи между спин-магнитными дипольными моментами основных состояний соседних центров дефектов. Это взаимное дипольное взаимодействие масштабируется как расстояние d^{-3} и должно быть больше, чем взаимодействие каждого электронного спина с остаточными парамагнитными примесями или ядерными спиновыми моментами в решетке. Таким образом, типичные расстояния отсечки для сильного взаимодействия ограничены временем дефазировки электрона (миллисекунды) около 25-30 нм. Другой важной особенностью текущих экспериментов являются прогресс в запутыва-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

нии спин-фотонных, спин-электронных, спин фотон-электрон, спин электрон-спин ядро двух-кубитных систем.

В экспериментах [4,5] было осуществлено запутывание при низкой температуре двух электронных спиновых кубитов в алмазе с пространственным разделением трех метров, для которого был использован надежный протокол, основанный на создании зацепления спин-фотонов в каждом NV-центре и в последующем совместном измерении фотонов. Обнаружение фотонов предвещало проекцию спиновых кубитов на запутанное состояние. В результате выполнения однократного считывания на кубитах в разных NV-центрах были получены нелокальные квантовые корреляции. Более того, полученная дальняя связь может быть объединена с недавно достигнутыми операциями инициализации, считывания и запутывания на локальных долгоживущих ядерных спиновых регистрах.

Глава 2.

Чистые и смешанные состояния

В классических компьютерах физические состояния, в которых они кодируют информацию, соответствуют логическим состояниям 0 или 1, соответственно, называемом «битом». Квантовый аналог «бита» – это состояние двумерной квантовой системы – кубит:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1; \quad \{\alpha, \beta\} \in S^3 \approx SU(2) \quad (1)$$

вектор в Гильбертовом пространстве $\mathcal{H} = \mathbb{C}^2$, условие нормировки приводит к редукции до $S^3 \approx SU(2)$. В качестве базиса выбираются ортонормированные состояния $\{|0\rangle, |1\rangle\}$.

Так как общую фазу можно игнорировать, чистые кубиты принадлежат двумерной сфере Блоха

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta/2 \\ e^{i\varphi}\sin\theta/2 \end{pmatrix}, \quad \{\alpha, \beta\} \in S^2 \approx \mathbb{CP}^1 \approx SU(2)/U(1) \quad (2)$$

Состояние n -кубитов можно рассматривать как нормированный вектор в тензорном произведении $\mathcal{H}^{\otimes n}$. Следствием этого является экспоненциальный рост размерности пространства состояний кубитов – 2^n .

Общий вид многокубитного n -мерного квантового состояния – кудит – имеет следующий вид

$$|\Psi\rangle = \sum_{i_1, \dots, i_n=0,1} a_{i_1 \dots i_n} |i_1\rangle \otimes \dots \otimes |i_n\rangle \quad (3)$$

$$\equiv \sum_{i_1, \dots, i_n=0,1} a_{i_1 \dots i_n} |i_1 \dots i_n\rangle, \quad i_k = 0, 1$$

с условием нормировки

$$\sum_{i_1, \dots, i_n=0,1} |a_{i_1 \dots i_n}|^2 = 1 \quad (4)$$

Например, состояние двух A -, B -кубитной квантовой системы:

$$|\Psi\rangle = \sum_{i_A=1}^2 \sum_{j_B=1}^2 a_{ij} |i\rangle_A |j\rangle_B \quad (5)$$

Состояние будет сепарабельным или незапутанным, если оно представимо в виде прямого произведения

$$|\Psi\rangle = |\Psi\rangle_A \otimes |\Psi\rangle_B. \quad (6)$$

Все другие состояния являются запутанными. Тензорный характер многокубитной системы позволяет легко применять унитарные одно- и двух CNOT-кубитовые преобразования.

В квантовой физике можно рассматривать и более сложные многоуровневые квантовые состояния – кутриты:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle + \gamma|2\rangle, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 = 1; \quad \{\alpha, \beta, \gamma\} \in S^5 \approx SU(3)/SU(2) \quad (7)$$

Аналогично случаю кубитов чистые кутриты можно рассматривать на гиперповерхности, но уже более высокой размерности [8]

$$\{\alpha, \beta, \gamma\} \in \mathbb{CP}^2 \approx SU(3)/SU(2) \times U(1) \quad (8)$$

Кроме чистых состояний, являющихся векторами в Гильбертовом пространстве состояний $\mathcal{H}^{\otimes n}$ и описываемых Шредингеровской эволюцией волновой функцией, которое имеет вид

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad \Psi = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix}, \quad (9)$$

в квантовой механике рассматривают и смешанные состояния ансамблей, для описания которых вводится оператор плотности ρ . Так, если для смеси состояний $\{|\psi_i\rangle\}$ с соответствующими вероятностями p_i оператор плотности ρ можно представить в следующем виде [7]

$$\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle \langle \psi_i|, \quad \sum_i p_i = 1 \quad (10)$$

Тогда чистому состоянию $|\psi\rangle$ соответствует матрица-оператор плотности $\rho = |\psi\rangle \langle \psi|$ и соответствующая ему матрица будет иметь только одно ненулевое собственное значение равное единице.

В общем случае любое состояние можно описать оператором плотности ρ , действующим на коммутативном гильбертовом пространстве H . Так среднее значение наблюдаемой A дается выражением

$$\langle A \rangle = \text{Tr}\{\rho A\} \quad (11)$$

Глава 3.

Эволюция составных систем и запутанность в формализме матрицы плотности

Явление запутанности, с которым столкнулись в квантовой физике при квантовании со-

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ставных систем связано с тем обстоятельством, что при описании таких систем в гильбертовом пространстве, например, являющимся тензорным произведением двух подпространств

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}^A \otimes \mathcal{H}^B \quad (12)$$

глобальное состояние $\Phi \in \mathcal{H}$ не является прямым произведением состояний $\Phi_A \in \mathcal{H}^A$ и $\Phi_B \in \mathcal{H}^B$, то есть

$$\Phi \neq \Phi_A \otimes \Phi_B. \quad (13)$$

Эволюция обеих подсистем одинаково важна, хотя они могут находиться в двух разных лабораториях, и операции, выполняемые независимо в двух лабораториях с использованием операторов вида

$$|\Phi\rangle_A \otimes |\hat{1}\rangle_B; |\hat{1}\rangle_A \otimes |\Phi\rangle_B \quad (14)$$

могут не быть состоянием произведения, возможно, из-за прошлой истории глобального состояния системы. В общем случае его можно описать оператором плотности ρ , действующим в композитном гильбертовом пространстве $\mathcal{H} \otimes \mathcal{H}^*$, состояния подсистем которой уже не являются лучами в Гильбертовом пространстве [7].

Можно было бы начать с сепарабельной системы

$$|\Psi\rangle_{AB} = |\psi\rangle_A \otimes |\psi\rangle_B,$$

которая в результате взаимодействия начала свою эволюцию и стала описываться вектором в гильбертовом композитном пространстве

$$|\Psi\rangle_{AB} (t) \in \mathcal{H}^A \otimes \mathcal{H}^B \quad (15)$$

Точнее, пусть

$$|i\rangle_A \in \mathcal{H}^A, |k\rangle_B \in \mathcal{H}^B$$

два ортонормированных базиса в своих гильбертовых пространствах и пусть $|\Psi\rangle \in \mathcal{H}$. Какое-то чистое нормированное состояние в пространстве $\mathcal{H} = \mathcal{H}^A \otimes \mathcal{H}^B$:

$$|\Psi\rangle_{AB} = \sum_{ik} a_{ik} |i\rangle_A |k\rangle_B,$$

$$\langle \Psi | \Psi \rangle_{AB} = \sum_k |a_{kk}|^2 = 1. \quad (16)$$

Параллельно мы будем иллюстрировать изложение конкретными примерами

$$|\Psi\rangle_{AB} = \alpha |0\rangle_A |0\rangle_B + \beta |1\rangle_A |1\rangle_B; \quad \langle \Psi | \Psi \rangle_{AB} = |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \quad (17)$$

связанными при условии $|\alpha|^2 = |\beta|^2 = \frac{1}{2}$ с состояниями Белла. Принцип суперпозиции утверждает, что величина $|a_{ik}|^2$ будет давать вероятность нахождения как системы А, так и В в любой момент времени эволюции рассматриваемой двух-составной, но уже разделенной расстоянием системы. Система в результате произошедшего

взаимодействия перестала быть сепарабельной и результаты измерения показывают, что каждая из подсистемы А и В перестают быть чистыми состояниями. Физические предсказания относительно системных наблюдаемых зависят только от частичных операторов плотности ρ_A и ρ_B , которые можно получить в результате редукции подсистем А и В [7]. Частичные операторы плотности ρ_A и ρ_B по-прежнему обладают важнейшими свойствами как эрмитова самосопряженность, положительная определенность и

$$\text{Tr } \rho_A = \text{Tr } \rho_B = 1,$$

но уже в отличие от чистого состояния

$$(\rho_{A,B})^2 \neq \rho_{A,B} \text{ и } \text{Tr}(\rho_{A,B})^2 < 1 -$$

что является отличительным признаком смешанного состояния. Среднее значение оператора наблюдаемой $(S_A \otimes \hat{I}_B)$, действующей только на одну подсистему

$$\langle S_A \rangle = \langle \Psi | (S_A \otimes \hat{I}_B) | \Psi \rangle_{AB} = \sum_{i,j,m} a_{im} a_{jm}^* \langle i | S | j \rangle_A = \text{Tr} \{ S_A \rho_A \} \quad (18)$$

$$(\rho_A)_{ij} = \sum_m a_{im} a_{jm}^* \langle i | \rho_A | j \rangle = \text{Tr}_B \{ |\Psi\rangle_{AB} \langle \Psi| \} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} (\rho_A)_{00} &= a_{00} a_{00}^* \langle 0 | \rho_A | 0 \rangle = a_{00} a_{00}^* \langle 0 | \rho_A | 0 \rangle \\ &< 0 | \rho_A | 0 \rangle + a_{01} a_{01}^* \langle 0 | \rho_A | 0 \rangle = \\ &= a_{00} a_{00}^* = |\alpha|^2 \end{aligned} \quad (20)$$

$$(\rho_A)_{01} = a_{00} a_{10}^* \langle 0 | \rho_A | 1 \rangle + a_{01} a_{11}^* \langle 0 | \rho_A | 1 \rangle = 0 \quad (21)$$

$$(\rho_A)_{10} = a_{10} a_{00}^* \langle 1 | \rho_A | 0 \rangle + a_{11} a_{01}^* \langle 1 | \rho_A | 0 \rangle = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} (\rho_A)_{11} &= a_{10} a_{10}^* \langle 1 | \rho_A | 1 \rangle + a_{11} a_{11}^* \langle 1 | \rho_A | 1 \rangle \\ &= a_{11} a_{11}^* = |\beta|^2 \end{aligned} \quad (23)$$

Редуцированная матрица плотности принимает следующий вид

$$\rho_A = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & |\beta|^2 \end{pmatrix}, \text{Tr} \{ \rho_A \} = 1, \text{Tr} \{ \rho_A^2 \} < 1 \quad (24)$$

$\text{Tr} \{ \rho_A^2 \} < 1$ – это означает, что редуцированное состояние является смешанным, которое уже невозможно описать с помощью одного вектора состояний.

Аналогично, можно вычислить второе редуцированное состояние

$$(\rho_B)_{ij} = \sum_m a_{mi} a_{mj}^* \langle i | \rho_B | j \rangle = \text{Tr}_A \{ |\Psi\rangle_{AB} \langle \Psi| \} \quad (25)$$

$$\rho_B = \begin{pmatrix} |\alpha|^2 & 0 \\ 0 & |\beta|^2 \end{pmatrix} \quad (26)$$

которое также будет смешанным.

Случай

$$\rho_B = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (27)$$

отвечает максимально запутанным состояниям Белла.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Итак, мы начали с чистого состояния (запутанного), а редуцированные состояния оказались смешанными [1]. Подытоживая, можно сказать, что для описания подсистем запутанных состояний необходимо использовать не векторы состояний, а редуцированные матрицы плотности. Более того, матрица частичного следа является единственным оператором, претендующим на роль правильного описания наблюдаемых подсистемы композитной системы.

Возможны разные критерии определения запутанных двухчастичных систем, но для нас будет интересно утверждение [7], которое гласит, что любое двухчастичное состояние $|\Psi\rangle$ будет запутано при условии существования унитарных операторов U_A и U_B , таких что $U_A \otimes U_B |\Psi\rangle = |00\rangle$. Это утверждение было использовано при построении запутанных спин-триплетных электронных состояний 2-х NV-центров в алмазе [2,3].

Оператор эволюции для объединенной системы $U_{AB}(t)$ воздействует на вектор состояния объединенной системы $|\Psi(t)\rangle_{AB}$, который в произвольный момент времени может быть представлен в виде

$$|\Psi(t)\rangle_{AB} = \sum_{i,k} a_{ik} |i(t)\rangle_A |k(t)\rangle_B, \quad (28)$$

где новые ортонормированные базисные вектора

$$\begin{aligned} |i(t)\rangle_A &= U_{AB}(t) |i(0)\rangle_A, \\ |k(t)\rangle_B &= U_{AB}(t) |k(0)\rangle_B \end{aligned} \quad (29)$$

позволяют определить временную эволюцию матрицы плотности в следующем виде [7]

$$\rho(t) = U_{AB}(t) \rho(0) U_{AB}^\dagger = \exp\left\{-\frac{i}{\hbar} H t\right\} \rho(0) \exp\left\{\frac{i}{\hbar} H t\right\}, \quad (30)$$

где был введен гамильтониан взаимодействия (эволюции)

$$U_{AB}(t) = \exp\left\{-\frac{i}{\hbar} H t\right\} \quad (31)$$

Используя кратко изложенный формализм матрицы плотности, в следующей статье будут рассмотрены методики для двух конкретных случаев запутанности, осуществленных в экспериментах при комнатной и при низкой температурах [2, 3, 4, 5].

Литература

1. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge Univ. Press, 2000).
2. Dolde F., Jakobi I., Naydenov B., Zhao N., Pezzagna S., Trautmann C., Meijer J., Neumann P., Jelezko F., Wrachtrup J. Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond. *Nature Phys.* 9, 139–143 (2013).
3. Dolde F., Jakobi I., Naydenov B., Zhao N., Pezzagna S., Trautmann C., Meijer J., Neumann P., Jelezko F., Wrachtrup J. Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond. Supplementary information DOI: 10.1038/NPHYS2545 *Nature Physics*.
4. Bernien H., Hensen B., Pfaff W., Koolstra G., Blok M.S., Robledo L., Tamirniau T.H., Markham M., Twitchen D.J., Childress L., Hanson R. Heralded entanglement between solid-state qubits separated by three metres/ 86 | *Nature* | Vol. 497 | 2 MAY 2014
5. Pfaff W., Hensen B., Bernien H., van Dam S.B., Blok M.S., Tamirniau T.H., Tiggelman M.J., Schouten R.N., Markham M., Twitchen D.J., Hanson R. Supplementary Materials for Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits./ 29 May 2014 on Science Express DOI: 10.1126/science.1253512.
6. Togan E. et al. Quantum Entanglement Between an Optical Photon and a Solid-State Spin Qubit, *Nature* 466(7307):730-4 August 2010.
7. Weng Cho Chew Quantum Mechanics Made Simple: Lecture Notes September 23, 2013
8. Белокуров В.В., Тимофеевская О.Д., Хрусталев О.А. Квантовая телепортация – обыкновенное чудо. Ижевск: Научно-издательский центр Регулярная и хаотическая динамика, 2000. 255 с.



ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 517.977

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ*

MATRIX METHOD OF PLANNING THE TRAJECTORY OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE OF VARIABLE MASS

Александр Николаевич Попов
генеральный директор
АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова»
Адрес: 305040, г. Курск, ул. Запольная, д. 47
E-mail: plant@aviaavtomatika.ru

Олег Игоревич Атакищев
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора
по специальным проектам
МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: aoi007@mail.ru



Дмитрий Павлович Тетерин
доктор технических наук
первый заместитель
генерального директора
АО «Авиаавтоматика»
им. В.В. Тарасова»
Адрес: 305040, г. Курск,
ул. Запольная, д. 47
E-mail: tdp@aviaavtomatika.ru

Инна Александровна Батраева
кандидат физико-математических наук
и.о. зав. кафедрой
ФГБОУ «Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского»
Адрес: 410012, г. Саратов,
ул. Астраханская, д. 83
Тел.: +7(8452)21-36-27
E-mail: batraevaia@info.sgu.ru

Аннотация

Приводится описание аналитико-числового матричного метода глобального и локального планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата средствами бортовой системы управления с учетом изменения динамических параметров летательного аппарата вследствие уменьшения запасов топлива и массы полезной нагрузки, который отличается от аналогов повышенной точностью и более низкой вычислительной трудоемкостью расчета баллистико-навигационных задач.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, баллистико-навигационное обеспечение, планирование траектории, траектория движения, матрица коэффициентов разложения функции на простейшие дроби в форме Быстрова-Тетерина.

Summary

The description of the analytical-numerical matrix method of global and local planning of the trajectory of the unmanned aerial vehicle by means of the on-board control system, taking into account the change in the dynamic parameters of the aerial vehicle due to the reduction of fuel reserves and the payload mass, which differs from analogs with increased accuracy and lower computational laborious calculation of ballistic-navigational problems.

Keywords: unmanned aerial vehicles, ballistic navigation support, trajectory planning, trajectory of movement, matrix of coefficients of decomposition of a function into simple fractions in the form of Bystrov-Teterin.

Научно-техническая задача разработки и экспериментальной отработки теоретических основ применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) при выполне-

нии поисково-спасательных операций является актуальной [1]. Успешное решение задачи во многом зависит от степени совершенства отечественных бортовых систем управления, про-

* Результаты, представленные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект 9.2108.2017/4.6.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

граммно-аппаратные средства которых должны обеспечивать автономное планирование траектории движения летательного аппарата в режиме времени близком к реальному в зависимости от динамических характеристик летательного аппарата [2]. Трудности обеспечения планирования траектории движения БЛА в этом случае связаны в том числе с недостаточной точностью известных (общедоступных) методов глобального (предполетного) и локального (в полете) планирования траектории движения БЛА переменной массы из-за традиционного использования приближенных численных методов математического моделирования динамических свойств летательного аппарата.

Постановка задачи баллистико-навигационного обеспечения БЛА

Рассматриваются: динамическая модель БЛА заданная в виде однородного обыкновенного дифференциального уравнения n -го порядка с кусочно-постоянными коэффициентами (ОДУ); опорных точек маршрута, через которые планируется пролет БЛА, причем все точки расположены на первом кусочно-постоянном – начальном отрезке траектории, т.е. на отрезке, где запас топлива и масса полезной нагрузки принимается неизменными с начала полета; q точек разрыва траектории, в которых происходит изменение исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата (кусочно-постоянных коэффициентов ОДУ) – изменение запасов топлива и массы полезной нагрузки.

Необходимо построить траекторию движения БЛА по маршруту, состоящую из q непрерывных функций

$$y^j(t), j = \overline{1, q},$$

проходящую через n опорных точек маршрута

$$y(t_1) = y_1, \dots, y(t_n) = y_n$$

и q точек разрыва

$$T_0 = 0 \dots T_q.$$

Аналитико-числовой матричный метод планирования траектории движения БЛА [3, 4]

В ходе предполетной подготовки, до начала движения БЛА по траектории, с использованием вычислительных средств бортовой системы управления или наземных средств баллистико-навигационного обеспечения полетов летательного аппарата:

1. По имеющейся приближенной математической модели летательного аппарата, представленной в виде приведенного однородного дифференциального уравнения n -го порядка с кусочно-постоянными коэффициентами вида

$$a_{0,j} + a_{1,j} \frac{dy(t)}{dt} + a_{2,j} \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \dots + a_{n-1,j} \frac{d^{n-1}y(t)}{dt^{n-1}} + \frac{d^ny(t)}{dt^n} = 0,$$

где n – порядок математической модели летательного аппарата, совпадающей с количеством опорных точек траектории, строят $q+1$ характеристических полиномов вида

$$a_{0,j} + a_{1,j}s + a_{2,j}s^2 + \dots + a_{n-1,j}s^{n-1} + s^n,$$

где $a_{i,j}$ – кусочно-постоянные коэффициенты;

$$i = \overline{0, n-1}, j = \overline{1, q+1};$$

s – независимая переменная (параметр интегрального преобразования Лапласа);

q – количество точек разрыва траектории, в которых происходит изменение исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата (кусочно-постоянных коэффициентов).

Полином

$$a_{0,1} + a_{1,1}s + a_{2,1}s^2 + \dots + a_{n-1,1}s^{n-1} + s^n$$

соответствует первому – начальному кусочно-постоянному отрезку траектории, расположенному между точками T_0 и T_1 ,

где T_0 – относительное время начала полета;

$T_0 = 0, \dots, T_1$ – относительное время первого изменения исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата, вызванных изменением запаса топлива и массы полезной нагрузки.

Полином

$$a_{0,q+1} + a_{1,q+1}s + a_{2,q+1}s^2 + \dots + a_{n-1,q+1}s^{n-1} + s^n$$

соответствует последнему кусочно-постоянному полуинтервалу траектории, расположенному правее точки T_q , где T_q – относительное время последнего изменения исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата, вызванных изменением запаса топлива и массы полезной нагрузки.

На каждом из отрезков и последнем полуинтервале траектории кусочно-постоянные коэффициенты принимают неизменными, т.е. изменение запасов топлива и массы полезной нагрузки не оказывают принципиального влияния на динамические параметры летательного аппарата. Изменение кусочно-постоянных коэффициентов происходит только в точках разрыва траектории

$$T_1, \dots, T_q,$$

причем в этих точках изменяет свое значение хотя бы один из коэффициентов дифференциального уравнения, соответствующего математической модели летательного аппарата.

Если порядок математической модели летательного аппарата меньше количества опорных точек траектории, с использованием положений теории обыкновенных дифференциальных уравнений предварительно строят эквивалентную математическую модель летательного аппарата

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

рата необходимой размерности.

2. Аналитическими методами вычисляют различные корни

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$$

первого характеристического полинома

$a_{0,1} + a_{1,1}s + a_{2,1}s^2 + \dots + a_{n-1,1}s^{n-1} + s^n$, соответствующего математической модели летательного аппарата на первом кусочно-постоянном – начальном отрезке траектории полета летательного аппарата $[T_0, T_1]$ и их кратности

$$m_1, m_2, \dots, m_p,$$

где λ_i – i -й корень полинома;

m_i – кратность i -го корня полинома;

p – количество различных корней полинома [5].

3. Для частного случая простых корней характеристического полинома ($n=p$) формируют матрицу

$$BASIS \in R^{1 \times n} = (b_{1,j}) = [e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_2 t}, \dots, e^{\lambda_n t}],$$

где $e^{\lambda_i t}$ – i -я базисная функция, соответствующая корню λ_i .

Для случая кратных корней полинома ($n > p$) матрицу строят в порядке следования корней и возрастания номера корневой модификации базисной функции [6, 7]:

$$BASIS = \{BASIS^1 \in R^{1 \times m_1}, BASIS^2 \in R^{1 \times m_2}, \dots, BASIS^p \in R^{1 \times m_p}\},$$

$$BASIS^i = (b_j^i) = [b_{1,j}^i, b_{2,j}^i, \dots, b_{m_i,j}^i]; \dots; BASIS^p = (b_j^p) = [b_{1,j}^p, b_{2,j}^p, \dots, b_{m_p,j}^p].$$

Т.е.

$$BASIS = [(b_{1,j}^1, b_{2,j}^1, \dots, b_{m_1,j}^1), (b_{1,j}^2, b_{2,j}^2, \dots, b_{m_2,j}^2), \dots, (b_{1,j}^p, b_{2,j}^p, \dots, b_{m_p,j}^p)].$$

$$b_j^i = e^{\lambda_i t} t^{j-1}, i = \overline{1, p}, j = \overline{1, m_i};$$

$$BASIS = [(e^{\lambda_1 t}, e^{\lambda_1 t} t, \dots, e^{\lambda_1 t} t^{m_1-1}), \dots, (e^{\lambda_p t}, \dots, e^{\lambda_p t} t^{m_p-1})].$$

4. Формируют маршрутную матрицу

$$ROUTE \in R^{n \times n} = (r_{i,j}) [8],$$

элементы которой вычисляют подстановкой относительного времени начала движения летательного аппарата по маршруту $T_0=0$ в матрицу $BASIS$ по формуле

$$r_{i,j} = (b_{1,j})_{T_0=0}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$$

5. Формируют матрицу-столбец значений координат в опорных точках траектории на плоскости [9] в порядке их следования

$$COORD \in R^{n \times 1} = (c_{i,1}).$$

где $c_{i,1} = y_i, i = \overline{1, n}$.

6. Матрицы $BASIS$, $ROUTE$ и $COORD$ записывают в память вычислительных средств бортовой системы управления летательного аппарата, тем самым выполняют формирование в памяти бортовой системы управления летательного аппарата исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата и опорных точках траектории.

7. Средствами бортовой системы управления осуществляют глобальное планирование программной траектории движения летательного аппарата для каждого кусочно-постоянного отрезка (полуинтервала) траектории по матричной формуле

$$y^j(t) = EXPF_j \times ICSL_j, j = \overline{1, q+1},$$

с подстановкой в результат

$$t = t - T_{j-1},$$

где $y^j(t), j = \overline{1, q+1}$ – функция от времени, описывающая траекторию движения летательного аппарата на j -м кусочно-постоянном отрезке (полуинтервале) траектории;

$EXPF_j = e^{FROBA_j \times t}, j = \overline{1, q+1}$ – аналитическая матричная экспонента от матрицы в форме Фробениуса [4]

$$FROBA_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{0,j} & -a_{1,j} & \dots & -a_{n-1,j} \end{bmatrix}, j = \overline{1, q+1}$$

соответствующей j -му кусочно-постоянному отрезку (полуинтервалу) траектории;

$a_{0,j} \dots a_{n-1,j}$ – значения коэффициентов j -го однородного линейного дифференциального уравнения, соответствующего математической модели летательного аппарата на j -м кусочно-постоянном отрезке (полуинтервале) траектории;

$ICSL_j = EXPI_j \times ICSL_{j-1}, j = \overline{2, q+1}$ – матрица начальных условий к j -му однородному линейному дифференциальному уравнению, соответствующему математической модели летательного аппарата на j -м кусочно-постоянном отрезке (полуинтервале) траектории, причем

$$ICSL_1 = KERN \times ROUTE^T;$$

$$KERN = f(BASIS, COORD) -$$

матрица коэффициентов разложения функции на простейшие дроби в форме Быстрова-Тетерина [10];

$EXPI_j = e^{FROBA_j \times INT_j}, j = \overline{1, q}$ – численная матричная экспонента [11] от скалярного произведения матрицы в форме Фробениуса $FROBA_j$, соответствующей j -му кусочно-постоянному отрезку (полуинтервалу) траектории, на длину соответствующего кусочно-постоянного отрезка траектории; $INT_j = T_j - T_{j-1}, j = \overline{1, q}; T_1, \dots, T_q$ – моменты времени полета летательного аппарата – точки разрыва траектории, в которых происходит изменение исходных данных о динамических параметрах летательного аппарата.

8. Функции $y^j(t), j = \overline{1, q}$ записывают в память вычислительных средств бортовой системы управления летательного аппарата, они являются результатом предполетного – глобального планирования траектории движения летательного аппарата.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

После начала движения летательного аппарата по программной траектории движения средствами бортовой системы управления летательного аппарата при помощи метода пропорционального сближения осуществляют отслеживание в каждый рассматриваемый текущий момент времени t положения и компенсацию с приемлемой точностью ухода центра масс летательного аппарата относительно j -й программной траектории движения $y^j(t)$ при соблюдении условий достижения минимальной методической ошибки управления и исключения «срыва» летательного аппарата с программной траектории.

В случае возникновения необходимости оперативного изменения программной траектории движения летательного аппарата в условиях полета на первом кусочно-постоянном – начальном отрезке траектории $[T_0, T_j]$ с использованием вычислительных средств бортовой системы управления:

1. Корректируют матрицу-столбец значений координат в опорных точках траектории *COORD* в части элементов, у которых изменились параметры (координаты) опорных точек траектории

$$c_{i,1} = y_i, i = \overline{1, n}.$$

Если время координата опорной точки траектории не изменилась либо опорная точка траектории на момент возникновения необходимости изменения программной траектории фактически была пройдена, то соответствующий элемент матрицы *COORD* не перевычисляют. Общее количество опорных точек траектории движения не должно изменяться.

2. Откорректированную матрицу *COORD* записывают в память вычислительных средств бортовой системы управления летательного аппарата.

3. Средствами бортовой системы управления осуществляют динамическую коррекцию программной траектории движения летательного аппарата – локальное планирование траектории движения летательного аппарата одновременно для всех опорных точек траектории (планируемых и фактически пройденных) по матричной формуле

$$y^j(t) = EXPF_j \times ICSI_j,$$

$$j = \overline{1, q+1},$$

с подстановкой в результат

$$t = t - T_{j-1},$$

где $y^j(t), j = \overline{1, q+1}$ – непрерывные функции от времени, проходящие через все опорные точки траектории (планируемые и фактически пройденные) и описывающие программную траекто-

рию движения летательного аппарата с учетом текущей динамической коррекции.

4. Функции $y^j(t), j = \overline{1, q}$ записывают в память вычислительных средств бортовой системы управления летательного аппарата, они являются результатом локального планирования траектории движения летательного аппарата.

Дальнейшее движение летательного аппарата по откорректированной программной траектории движения осуществляют аналогичным способом, как и после глобального планирования траектории.

Новизна аналитико-числового метода планирования траектории в учете динамических характеристик БЛА кусочно-переменной массы для случая, когда все опорные точки траектории расположены на начальном отрезке траектории, матричной формализации процедуры построения траектории и введении в рассмотрение нового типа матриц – матрицы коэффициентов разложения функции на простейшие дроби в форме Быстрова-Тетерина. Метод не содержит методической погрешности, допускает параллельное выполнение операций с матрицами средствами бортовых вычислителей.

Численный пример.

Заданы: модель БЛА в виде обыкновенного однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^4 y(t)}{dt^4} + a_{3,j} \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + a_{2,j} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_{1,j} \frac{dy(t)}{dt} + a_{0,j} y(t) = 0;$$

параметры опорных точек маршрута на плоскости для глобального планирования (в примере рассмотрена одна опорная точка, которая совпадает с начальной точкой маршрута $T_0 = 0$)

$$y(0) = 10, \frac{dy(0)}{dt} = 3, \frac{d^2 y(0)}{dt^2} = 3, \frac{d^3 y(0)}{dt^3} = 4;$$

точки разрыва траектории

$$T_1 = 1, T_2 = 3;$$

значения кусочно-постоянных коэффициентов на отрезке $[T_0, T_j]$:

$$a_{0,1} = 1, a_{1,1} = 4, a_{2,1} = 6, a_{3,1} = 4;$$

на отрезке $[T_1, T_2]$:

$$a_{0,2} = 1, a_{1,2} = -4, a_{2,2} = 6, a_{3,2} = -4;$$

на полуинтервале $[T_2, \infty]$:

$$a_{0,3} = 1, a_{1,3} = 4, a_{2,3} = 6, a_{3,3} = 4.$$

Необходимо – построить траекторию движения подвижного объекта на плоскости, проходящую через опорную точку маршрута и точки разрыва траектории полета с учетом их коррекции, с использованием аналитико-числового матричного метода.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Глобальное планирование траектории движения подвижного объекта аналитико-числовым методом

По математической модели летательного аппарата строятся характеристические полиномы:

$$\begin{aligned} S^4 + 4S^3 + 6S^2 + 4S + 1; \\ S^4 - 4S^3 + 6S^2 - 4S + 1; \\ S^4 + 4S^3 + 6S^2 + 4S + 1. \end{aligned}$$

Вычисляются корни и их кратности первого характеристического полинома $\lambda_1 = -1, m_1 = 4$.

Строится матрица базисных функций, обобщенная матрица Вандермонда для случая кратных корней характеристического полинома

$$BASIS = \{BASIS^1 \in R^{1 \times m_1}\} = [e^{-t}, e^{-t}t, e^{-t}t^2, e^{-t}t^3].$$

Формируются маршрутная матрица

$$ROUTE = [e^{0,0,0,0}] = [1, 0, 0, 0]$$

и матрица значений координат в опорных точках траектории на плоскости

$$COORD = \begin{bmatrix} 10 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}.$$

Строятся матрицы в форме Фробениуса:

$$FROBA_1 = FROBA_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -4 & -6 & -4 \end{bmatrix}; FROBA_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 4 & -6 & 4 \end{bmatrix}.$$

Вычисляются аналитические матричные экспоненты от матриц в форме Фробениуса (из-за сложности выражений, приводятся значения отдельных элементов одной матрицы – $EXPF_1$):

$$\begin{aligned} EXPF_1[1,1] &= \frac{1}{6}e^{-t}(6 + 6t + 3t^2 + t^3); EXPF_1[1,2] = \frac{1}{2}te^{-t}(2 + t); \\ EXPF_1[1,3] &= \frac{1}{2}t^2e^{-t}(1 + t); EXPF_1[1,4] = \frac{1}{6}t^3e^{-t}; \\ EXPF_1[2,1] &= -\frac{1}{6}t^3e^{-t}; EXPF_1[2,2] = -\frac{1}{2}e^{-t}(-2 - 2t - t^2 + t^3); \\ EXPF_1[2,3] &= -\frac{1}{2}te^{-t}(-2 - 2t + t^2); EXPF_1[2,4] = -\frac{1}{6}t^2e^{-t}(-3 + t); \\ EXPF_1[3,1] &= \frac{1}{6}t^2e^{-t}(-3 + t); EXPF_1[3,2] = \frac{1}{2}t^2e^{-t}(-4 + t); \\ EXPF_1[3,3] &= \frac{1}{2}e^{-t}(2 + 2t - 5t^2 + t^3); EXPF_1[3,4] = \frac{1}{6}te^{-t}(6 - 6t + t^2); \\ EXPF_1[4,1] &= -\frac{1}{6}te^{-t}(6 - 6t + t^2); EXPF_1[4,2] = -\frac{1}{2}te^{-t}(8 - 7t + t^2); \\ EXPF_1[4,3] &= -\frac{1}{2}te^{-t}(12 - 8t + t^2); EXPF_1[4,4] = -\frac{1}{6}e^{-t}(-6 + 18t - 9t^2 + t^3). \end{aligned}$$

Находятся длины кусочно-постоянных отрезков траектории:

$$INT_1 = T_1 - T_0 = 1 - 0 = 0; INT_2 = T_2 - T_1 = 3 - 1 = 2.$$

Вычисляются численные матричные экспоненты:

$$EXPI_1 = \begin{bmatrix} \frac{8}{3}e^{-1} & \frac{5}{2}e^{-1} & e^{-1} & \frac{1}{6}e^{-1} \\ -\frac{1}{6}e^{-1} & 2e^{-1} & \frac{3}{2}e^{-1} & \frac{1}{3}e^{-1} \\ -\frac{1}{3}e^{-1} & -\frac{3}{2}e^{-1} & 0 & \frac{1}{6}e^{-1} \\ -\frac{1}{6}e^{-1} & -e^{-1} & -\frac{5}{2}e^{-1} & -\frac{2}{3}e^{-1} \end{bmatrix};$$

$$EXPI_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3}e^2 & 2e^2 & -2e^2 & \frac{4}{3}e^2 \\ -\frac{4}{3}e^2 & 5e^2 & -6e^2 & \frac{10}{3}e^2 \\ -\frac{10}{3}e^2 & -12e^2 & -15e^2 & \frac{22}{3}e^2 \\ -\frac{22}{3}e^2 & 26e^2 & -32e^2 & \frac{43}{3}e^2 \end{bmatrix}.$$

Определяются матрицы начальных условий для кусочно-постоянных отрезков и полуинтервала:

$$ICSI_1 = \begin{bmatrix} 10 \\ 3 \\ 3 \\ 4 \end{bmatrix}; ICSI_2 = \begin{bmatrix} \frac{227}{6}e^{-1} \\ \frac{61}{6}e^{-1} \\ \frac{43}{6}e^{-1} \\ \frac{89}{6}e^{-1} \end{bmatrix}; ICSI_3 = \begin{bmatrix} \frac{41}{18}e^2e^{-1} \\ \frac{109}{18}e^2e^{-1} \\ -\frac{97}{18}e^2e^{-1} \\ \frac{65}{18}e^2e^{-1} \end{bmatrix}.$$

Выполняется глобальное планирование траектории движения БЛА (рисунки 1-5):

$$y^1(t) = \frac{1}{6}e^{-t}(60 + 78t + 57t^2 + 32t^3);$$

$$y^2(t) = -\frac{1}{18}e^{-t}(-1274 + 690t - 99t^2 + 2t^3);$$

$$y^3(t) = -\frac{1}{54}e^{-t}(-3948 + 4650t - 1893t^2 + 256t^3).$$

Выводы и рекомендации

Разработанные аналитико-числовой и приближенный численный методы позволяют средствами бортовых средств баллистико-навигационного обеспечения планировать траекторию движения БЛА одновременно для всех опорных точек маршрута и точек разрыва траектории с учетом уменьшения запасов топлива и массы полезной нагрузки [12-17]. Однако данные методы не позволяют планировать движение БЛА по маршруту в случаях, когда все или часть точек разрыва траектории находятся вне первого кусочно-постоянного отрезка – начального отрезка траектории полета летательного аппарата $[T_0, T_1]$, что является предметом дальнейших исследований.

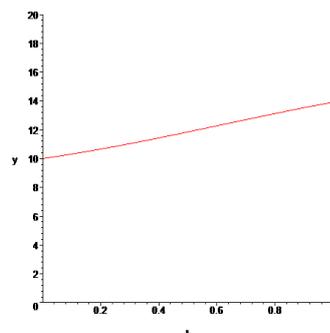


Рис. 1. Траектория движения БЛА на отрезке $[T_0, T_1]$ – непрерывная функция $y^1(t)$

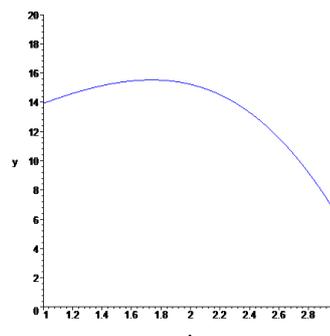


Рис. 2. Траектория движения БЛА на отрезке $[T_1, T_2]$ – непрерывная функция $y^2(t)$

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

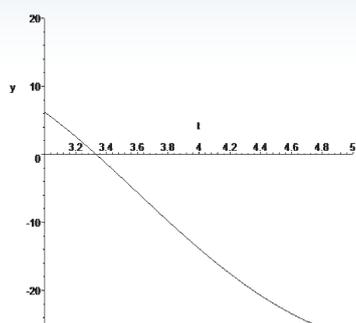


Рис. 3. Траектория движения БЛА на отрезке $[T_2, \infty)$ – непрерывная функция $y_3(t)$

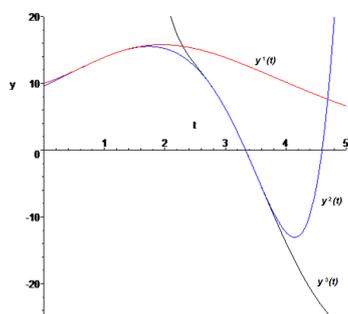


Рис. 4. Непрерывные функции $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$

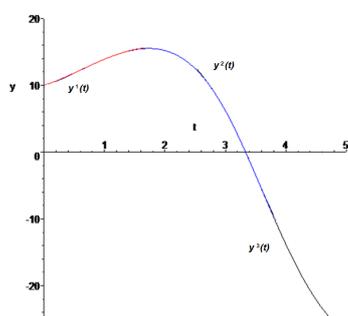


Рис. 5. Результат глобального планирования траектории БЛА

Литература

1. Попов А.Н. Разработка и экспериментальная обработка теоретических основ применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами вертолетного типа взлетной массой до 500 кг при выполнении поисково-спасательных операций на воде: отчет о НИР (промежуточ.) / Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., рук. Тетерин Д.П.; исп.: Попов А.Н. [и др.]. Саратов, 2017. 105 с. № ГР АААА-А17-117101640022-7.
2. Попов А.Н. Пилотажные комплексы и навигационные системы вертолетов / А.Н. Попов, И.В. Сергушов, Д.П. Тетерин и др. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 368 с.
3. Быстров Л.Г. Решение линейных дифференциальных уравнений. Аналитико-числовые методы и алгоритмы. Часть 1 / Л.Г. Быстров, Г.С. Говоренко, Д.П. Тетерин и др. М.: МГУЛ, 2004. 440 с.

4. Голуб Дж. Матричные вычисления / Дж. Голуб, Ч. Ван Лоун. М.: Мир, 1999. 548 с.
5. Дьяконов В.П. Математическая система MapleVR3 / R4 / R5 / В.П. Дьяконов. М.: СОЛОН, 1998. 399 с.
6. Тетерин Д.П. Методы моделирования линейных стационарных элементов систем управления летательных аппаратов // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2009. № 4(42). С. 65-71.
7. Тетерин Д.П. Аналитическое решение неоднородных линейных дифференциальных уравнений со сложной правой частью // Доклады Академии военных наук, 2008. № 5. С. 139.
8. Попов А.Н., Тетерин Д.П. Методика планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника // Известия Самарского научного центра РАН, 2017. Т. 19. № 1(2). С.371-376.
9. Попов А.Н. Методика планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата // Известия Самарского научного центра РАН, 2017. Т. 19. № 1(2). С.364-370.
10. Тетерин Д.П. Алгоритм приведения n-точечных краевых задач для однородных линейных дифференциальных уравнений высших порядков к задаче Коши // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2009. № 2 (39). С. 11-18.
11. Быстров Л.Г., Сафронов В.В., Тетерин Д.П. Компьютерный метод и алгоритм вычисления матричной экспоненты для исследования систем автоматического управления // Интеллектуальные системы: Труды Десятого международного симпозиума. М.: РУСАКИ, 2012. С. 191-196.
12. Ежова Т.Г., Попов А.Н., Тетерин Д.П. Способ управления движением летательного аппарата. Пат. 2648556 (РФ). 2018.
13. Ежова Т.Г., Попов А.Н., Тетерин Д.П. Способ планирования траектории движения летательного аппарата. Пат. 2649287 (РФ). 2018.
14. Попов А.Н., Тетерин Д.П. Способ управления движением летательного аппарата. Пат. 2665820 (РФ). 2018.
15. Батраева И.А., Попов А.Н., Тетерин Д.П. Подпрограмма планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата с учетом противодействия противника. Св. об оф. рег. пр. для ЭВМ №2017660393. 2017.
16. Батраева И.А., Попов А.Н., Тетерин Д.П. Подпрограмма планирования траектории движения беспилотного летательного аппарата. Св. об оф. рег. пр. для ЭВМ №2018610243. 2018.
17. Батраева И.А., Попов А.Н., Тетерин Д.П. Программа планирования траектории движения летательного аппарата с учетом влияния факторов внешней среды. Св. об оф. рег. пр. для ЭВМ № 2018610948. 2018.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 538.958

СОЗДАНИЕ ОДИНОЧНОГО NV-ЦЕНТРА В ЗАДАННОМ МЕСТЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА АЛМАЗА

CREATING A SINGLE NV-CENTER AT THE SPECIFIED PLACE OF THE SYNTHETIC DIAMOND CRYSTAL



Николай Сергеевич Кукин
кандидат технических наук
начальник лаборатории МОУ «ИИФ»
142210, Московская обл., г. Серпухов,
Большой Ударный пер., д. 1а
Тел.: +7(4967)35-31-93
E-mail: n.s.kukin@mail.ru

Александр Николаевич Васильев
доктор физико-математических
наук, профессор
профессор кафедры НИЯУ «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31
Тел.: +7(985)788-56-99
E-mail: alexander.vasiliev@ihelp.ru

Павел Александрович Семёнов
кандидат физико-математических
наук, профессор
профессор кафедры
НИЯУ «МИФИ»
E-mail: Pavel.Semenov@ihep.ru

Сергей Владимирович Смуров
почетный работник науки и техники РФ
доктор технических наук, профессор
первый заместитель Генерального
директора по научной работе –
главный конструктор МОУ «ИИФ»
E-mail: sv_s_fff@mail.ru

Николай Иванович Каргин
доктор технических наук, профессор
и.о. проректора
НИЯУ «МИФИ»

Сергей Александрович Тарелкин
ВрИО руководителя отдела
ФГБНУ ТИСНУМ
108840, Москва, г. Троицк,
ул. Центральная, д. 7а
Тел.: +7(499)400-62-25

Виталий Сергеевич Бормашов
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
ФГБНУ ТИСНУМ

Сергей Юрьевич Трощев
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
ФГБНУ ТИСНУМ

Антон Владимирович Голованов
младший научный сотрудник
ФГБНУ ТИСНУМ

Сергей Дмитриевич Трофимов
стажер-исследователь
ФГБНУ ТИСНУМ

Ирина Олеговна Корчевая
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»

Анна Руслановна Мурадова
научный сотрудник
МОУ «ИИФ»

Андрей Константинович Никитин
инженер-программист
МОУ «ИИФ»
E-mail: ex_nik@mail.ru

Аннотация

В статье представлено описание первой в России процедуры создания одиночного NV-центра в заданном месте синтетического сверхчистого кристалла алмаза. Успешное формирование NV-центра подтверждено путем регистрации его характерного спектра. Одиночность NV-центра подтверждена построением автокорреляционной функции второго порядка, характерной для одиночного квантового объекта – источника одиночных фотонов.

Ключевые слова: кубит, NV-центр, алмазная подложка.

Summary

The article presents the description of the first Russian method for creating of a single NV-center at the certain place of a synthetic bulk diamond. The successful formation of the NV-center is confirmed by registering its characteristic spectrum. The solitude of the NV-center is confirmed by the second-order autocorrelation function that matches the one of a single source of photons.

Keywords: qubit, NV-center, diamond bulk.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Введение

Феномен квантовой запутанности, одного из мощнейших ресурсов квантовой механики, лежит в основе современных квантовых технологий. Это явление играет важную роль, например, в системах защищенной квантовой связи – такие системы полностью исключают возможность незаметного прослушивания из-за того, что законы квантовой механики запрещают «клонирование» состояния частиц света (фотонов). Также это явление крайне важно для создания квантовых компьютеров. Алмазные NV-центры, или «алмазные кубиты», образованные на дефектах в кристаллах, способны при комнатной температуре поддерживать работу квантовой памяти в течение длительного времени для квантовых систем – нескольких миллисекунд. Основным преимуществом «алмазных кубитов» над их популярными сверхпроводящими аналогами является то, что их можно использовать для создания «долгой» квантовой памяти (несколько секунд!) благодаря возможности перенесения кубита на ядерный спин. Сами дефекты способны светиться в оптическом диапазоне, что заметно упрощает передачу данных на расстояния, так как можно использовать высококачественное оптическое волокно. Но разрабатывать и создавать такие современные технологии можно только после того, как будет развита технология создания одиночных NV-центров в алмазах при сравнительно небольшом фоне люминесценции вокруг этих дефектов. Этому и посвящена данная статья. Ранее группа опубликовала ряд научных статей [1-3] о различных свойствах ансамблей NV-центров.

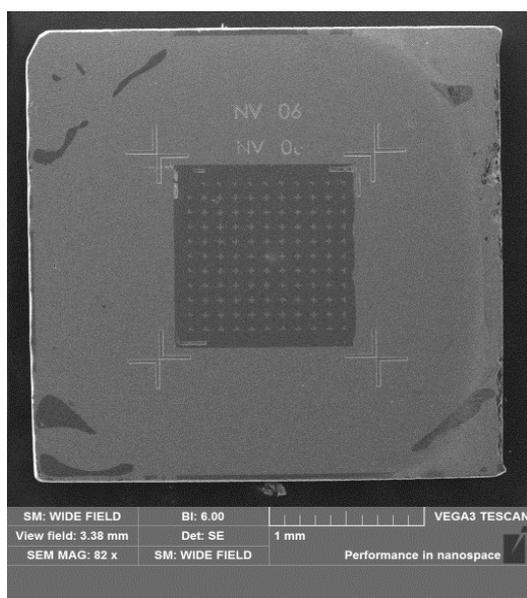


Рис. 1. Маркеры на поверхности CVD слоя образца

Формирование одиночного NV-центра

Методом температурного градиента при НРТ (высокое давление высокая температура) была получена алмазная подложка чистоты 11А с низким содержанием азота, из которой вырезана пластина ориентации 111. Затем методом осаждения из газовой фазы (CVD) на пластине был выращен высокочистый слой алмаза толщиной 10 мкм. После роста CVD слоя поверхность была отполирована. Затем на поверхность методом травления через литографическую оксидную маску были нанесены маркеры (рисунки 1).

Расстояние между отдельными маркерами на рисунке 1 составляет 100 мкм. Для формирования одиночных NV-центров на поверхность была нанесена маска из никеля. На рисунке 2 приведен фрагмент маски, расположенной между каждыми четырьмя маркерами рисунка 1.

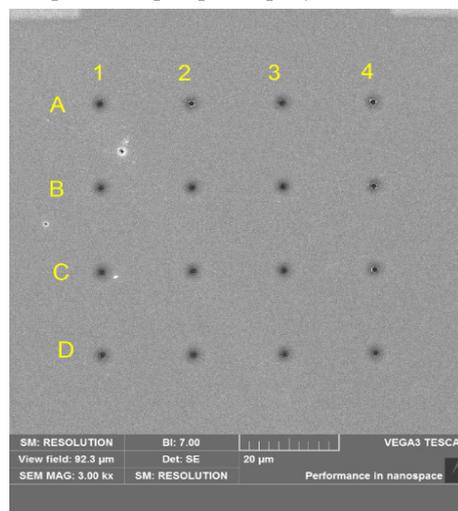


Рис. 2. Никелевая маска

Из-за технологических особенностей изготовления полученный размер отверстий никелевой маски варьировался от нуля (полностью закрытое отверстие) до 1000 нм.

Одиночные NV-центры формировались путем имплантации ионов азота пучком с энергией 50keV и суммарной дозой 10^{10} см⁻². После воздействия пучком и удаления никелевой маски был проведен отжиг образца в вакууме при температуре 700С в течение 1 часа.

Исследования одиночного NV-центра

Для поиска NV-центров было проведено сканирование спектров люминесценции поверхности образца алмаза с использованием конфокального микроскопа при возбуждении лазером 532 нм. Были обнаружены несколько точек, содержащих характерный спектр NV-центра. На рисунке 3 приведен характерный спектр, полученный при сканировании.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

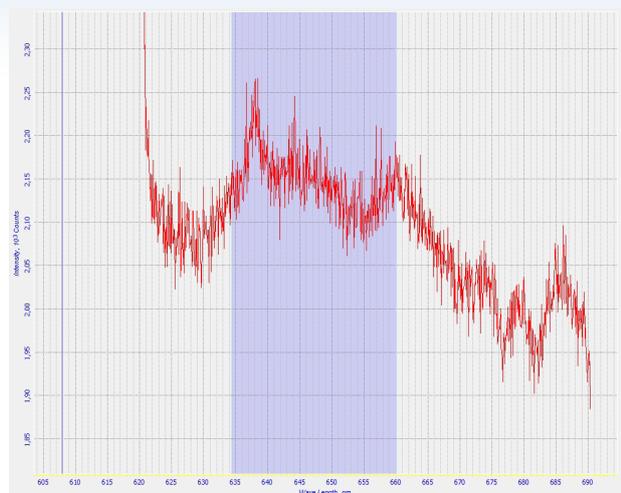


Рис. 3. Характерный спектр NV-центра, полученный при сканировании

Не характерное для NV-центра падение PSB (Phonon Side Band) на длинах волн более 660 нм на *рисунке 3* объясняется наличием в оптическом канале микроскопа соответствующих фильтров подавления спектра с длинами волн более 750 нм. Отношение сигнала к фону для длин волн более 640 нм рядом с NV-центром было равно 4.

Для доказательства одиночности NV-центра была использована автокорреляционная функция второго порядка (метод построения этой функции описан в оригинальной работе [4]), показанная на *рисунке 4*. При построении этой функции выделялся сигнал от NV-центра в диапазоне длин волн от 640 до 700 нм.

В соответствии с падением автокорреляционной функции второго порядка на *рисунке 4*, можно сделать однозначный вывод об одиночности полученного NV-центра. Фон составляет менее 30%, что согласуется с измерениями спектра NV-спектра.

Известный в мире квантовый оптик Алексей Акимов отметил, что его группа видела одиноч-

ные NV-центры в пластинах в России, но

а) это нигде не опубликовано;

б) что гораздо более важно, они не делали одиночные NV-центры «на заказ», т.е. не пытались их специально создавать в заданном месте (видели только случайные NV-центры).

В Гарвардском Университете (США), где он долго работал, такие вещи делают рутинно, но в России, по его мнению, это действительно первый успех такого рода [5].

Заключение

Впервые в России полностью по российской технологии и с использованием только российских материалов получен одиночный дефект (NV-центр) в заданном месте искусственного кристалла алмаза. При этом фон рядом с этим NV-центром не превышает 30%.

Литература

1. Васильев А.Н., Смуров С.В., Семенов П.А., Кукин Н.С., Бухтияров А.А., Капусткин Д.О. Экспериментальное наблюдение оптически детектируемого магнитного резонанса в кристалле алмаза с примесями азота // Известия Института инженерной физики, 2016. №2(40). С.40-44.
2. Васильев А.Н., Смуров С.В., Семенов П.А., Кукин Н.С., Бухтияров А.А., Капусткин Д.О., Глотова И.О., Мурадова А.Р. Исследование осцилляций Раби в кубитах кристалла алмаза с использованием зеленого лазера // Известия Института инженерной физики, 2017. №1(43). С.25-30.
3. Васильев А.Н., Семенов П.А., Кукин Н.С., Корчевая И.О., Мурадова А.Р. определение ориентации осей NV-центров относительно поверхности монокристалла // Известия Института инженерной физики, 2018. №2(48). С.47-49.
4. Hanbury Brown R. and Twiss R.Q. Correlation between photons in two coherent beams of light // Nature, vol. 177, 1956, p. 27.
5. Акимов А.А. – частное сообщение.

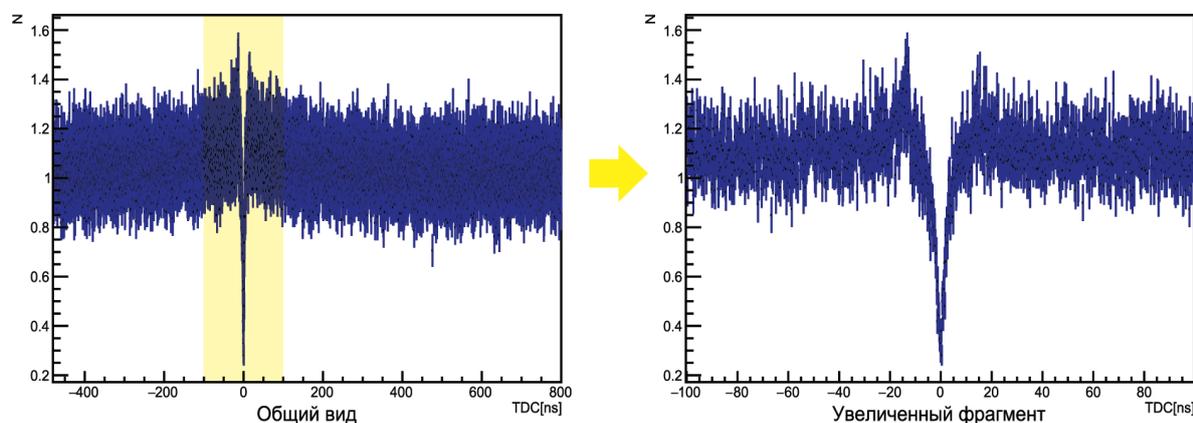


Рис. 4. Автокорреляционная функция второго порядка одиночного NV-центра

ВЛИЯНИЕ ЭЛЛИПСНОСТИ НА МАССОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЮЗЕЛЯЖА

THE EFFECT OF ELLIPSE ON THE MASS CHARACTERISTICS OF THE FUSELAGE

Валентин Владимирович Васильев
кандидат технических наук, доцент
МАИ (национальный
исследовательский университет)
Адрес: 125993, Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4
Тел.: +7 (495) 556-90-11

Егор Николаевич Сосновский
студент
филиал МАИ «Стрела»
Адрес: 140181, Московская обл.,
г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 8
Тел.: +7(985)256-52-06
E-mail: flightwit@gmail.com

Аннотация

Обсуждается и первично оценивается влияние эллипсности в поперечном сечении на весовые характеристики отсека фюзеляжа самолета. Отмечаются характерные преимущества и недостатки, влияющие на облик конструкции шпангоутов эллиптического фюзеляжа. Приведены результаты расчетов составляющих массы отсека эллиптического фюзеляжа.

Ключевые слова: фюзеляж самолета, эллипсность фюзеляжа, избыточное давление, шпангоут, весовые характеристики отсека, масса квадратного метра омываемой поверхности.

Summary

The influence of the ellipse in the cross section on the weight characteristics of the fuselage compartment of the aircraft is discussed and evaluated. There are typical advantages and disadvantages affecting the appearance of the frames of the elliptical fuselage. The results of calculations of the components of the elliptical fuselage compartment are presented.

Keywords: aircraft fuselage, fuselage ellipse, overpressure, frame, compartment weight characteristics, mass of square meter of the washed surface.

С ростом пассажировместимости, требований к комфорту, безопасности и экономической эффективности гражданских самолетов, появляются предложения по созданию транспортных самолетов с нетрадиционными фюзеляжами, в том числе двухпалубных и двухфюзеляжных самолетов (см., например, [1-4]). Исходя из этого, становится понятно, что анализ конструкции и весовых характеристик таких фюзеляжей в рамках строительной механики самолета, проектный поиск новых решений является важной задачей, решение которой позволит в значительной мере расширить подход к будущему созданию фюзеляжей.

Одно из таких направлений проектного поиска представлено использованием фюзеляжей эллиптического сечения с осью эллипсности в горизонтальной плоскости (например, «Фрегат Экоджет» (рисунк 1) [5]). Наряду с декларируемыми преимуществами такой схемы (повышенная пассажировместимость, увеличенный комфорт внутри салона,

возможность экранирования шума двигателей на местности фюзеляжем) ей присущи и недостатки. Главной проблемой является очевидное утяжеления конструкции фюзеляжа в связи с необходимостью противодействия избыточному внутрифюзеляжному давлению, стремящемуся превратить эллипс в круг и нагрузить шпангоуты изгибающимися моментами (рисунк 2), в отличие от круглого фюзеляжа [6, 7]. Все шпангоуты становятся «силовыми», работающие на изгиб

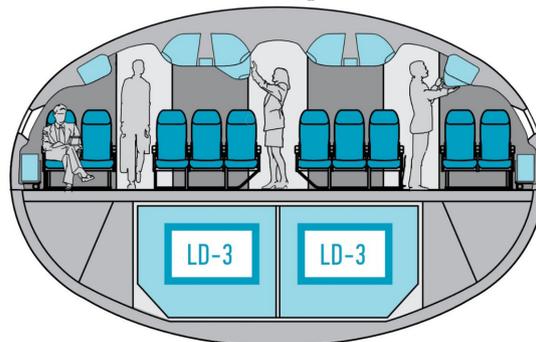


Рис. 1. Сечение фюзеляжа «Фрегат Экоджет»

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

в своей плоскости. Однако известные оценки утяжеления таких фюзеляжей по сравнению с фюзеляжем с круговыми сечениями не выходят за рамки поперечных расчетов конкретных фюзеляжей [8].

В статье оценивается влияние эллипсности сечения на массу наиболее нагруженного отсека фюзеляжа вблизи центроплана для фюзеляжей с эквивалентным диаметром 6,2 метра самолетов со взлетной массой 140-150 тонн и пассажироместимостью 300-350 человек. Под эллипсностью понимается отношение высоты сечения фюзеляжа к его ширине (рисунк 2). При сохранении равной площади поперечного эллиптического сечения с ростом эллипсности высота фюзеляжа уменьшается, а ширина фюзеляжа растет.

Расчетная модель для проведения оценки массы отсека фюзеляжа базируется на безмоментной цилиндрической оболочке эллиптического сечения со шпангоутами, нагруженными равномерным действием внутреннего давления и работающими на изгиб в своей плоскости (рисунк 2). При большой эллипсности ($e < 0,5$) изгибные напряжения в оболочке будут определяющими, в сравнение с которыми напряжения растягивающие (для обшивки мембранные) пренебрежимо малы [9].

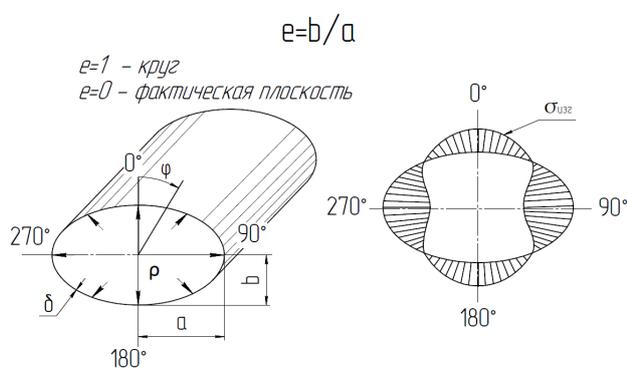


Рис. 2. Модель нагрузки на эллиптический шпангоут

Изгибающий момент в вертикальной плоскости от веса фюзеляжа и грузов вблизи центроплана оценивался для осредненной типовой компоновки. Разгружающий момент от вклада фюзеляжа в создание подъемной силы, увеличивающийся с ростом «физической» эллипсности, не учитывался. Принято, что изгибающий момент добавляет свой «вклад» в массу отсека через приведенную толщину стрингерного набора.

С уменьшением эллипсности ($e \rightarrow 1$) напряжения изгиба в шпангоуте уменьшаются, они становятся типовыми и для фюзеляжей с сечением, близким к круговой форме, определяющими

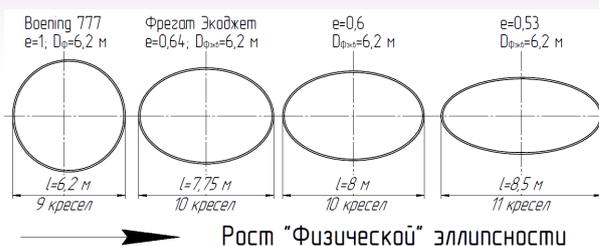


Рис. 3. Типичные рассматриваемые сечения

становятся растягивающие мембранные напряжения в обшивке.

С увеличением степени эллипсности происходит рост толщин обшивки фюзеляжа – за счет уменьшения местной кривизны верха и низа обшивок фюзеляжа при одновременном увеличении приведенной толщины стрингеров – за счет уменьшения строительной высоты фюзеляжа.

Для оценки максимальных значений изгибающих моментов на шпангоуте воспользуемся моделью шарнирно опертой двухопорной арки. При этом изгибающий момент в сечении $\psi=0$ и $\psi=90$ оценивается по следующим зависимостям [10]:

$$M_{0^{\circ}} = \frac{\rho a^2}{2} - \frac{\rho b^2}{2}; M_{90^{\circ}} = \frac{M_{0^{\circ}}}{e},$$

где ρ – погонная нагрузка, собираемая с обшивки на шаге шпангоутов и передающаяся равномерно на шпангоут по внешнему периметру через места крепления стрингеров к стенке шпангоута.

Масса отсека фюзеляжа оценена путем суммирования масс обшивки, стрингерного набора и шпангоутов, установленных с шагом 700 мм. Эксплуатационное давление наддува фюзеляжа принято равным $\Delta p = 0,65 \text{ кг/см}^2$. Минимальная толщина обшивки определялась по безмоментной теории в зависимости от местной кривизны $R_{\text{мест}}$ для уровня цепных напряжений в 10 кг/мм^2 , полагая, что остальные критерии прочности и усталости можно будет удовлетворить изменением толщин и площадей стрингеров, а также локальными усилениями [10]:

$$\delta_{\text{обш}} = \frac{\Delta p R_{\text{мест}}}{[\sigma]}$$

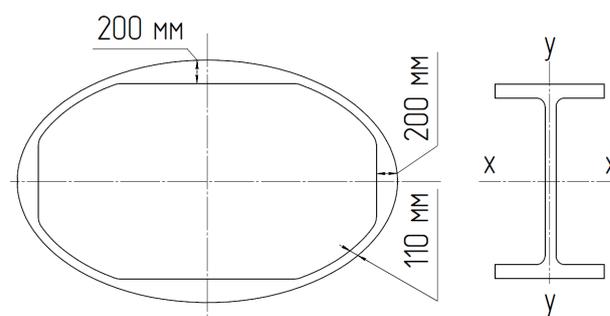


Рис. 4. Сечение эллиптического шпангоута и его геометрия

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

Параметры и весовые характеристики рядового шпангоута круглой формы приняты аналогичными шпангоутам отечественных широкофюзеляжных самолетов [11]. В местах наибольших изгибающих моментов строительная высота сечения эллиптических шпангоутов принималась равной 200 мм (рисунк 4) и рассчитывалась по балочной теории [12–14].

При определении массы шпангоутов распределение материала вдоль периметра шпангоута от максимальных толщин и площадей к минимальным (в зоне перехода эпюры моментов через ноль) принималась линейной. Масса пола и его участие в работе конструкции на данном этапе анализа не учитывались. Конструкция считалась выполненная из алюминиевого сплава с характеристиками $\sigma_s=420$ МПа и плотностью $\rho=2,8$ г/см³.

На основе разработанной весовой модели отсека фюзеляжа проведены весовые оценки, базирующиеся на получении поверхностной плотности, омываемой поверхности фюзеляжа [15], а также погонной массы отсека фюзеляжа длиной в 1 метр (рисунки 5, 6).

Анализ полученных зависимостей подтверждают, что преимущества эллиптической компоновочной схемы над классической требуют внимательного изучения со стороны прочности и экономичности. При этом большинство ранее сделанных допущений предполагают несколько завышенный уровень напряжений у эллипсных фюзеляжей. Так же не учитывался такой фактор, как сокращение длины фюзеляжа вследствие увеличения количества кресел в ряду.

До эллипсности порядка 0,78 наблюдается

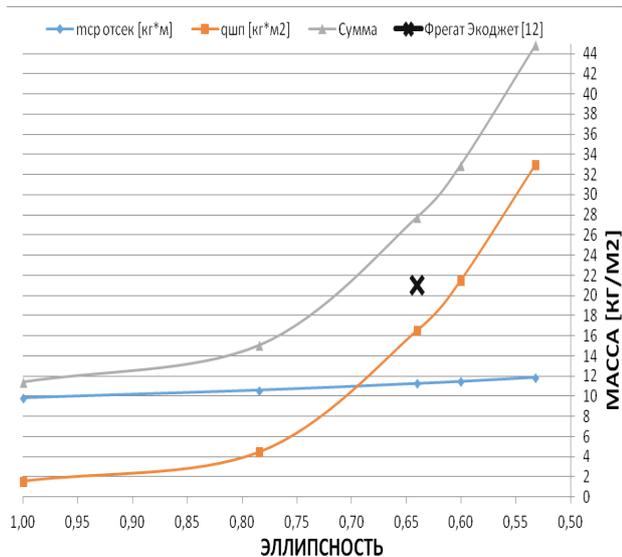


Рис. 5. Зависимость массы шпангоутов, панелей обшивки и всего отсека, отнесенные к единице площади омываемой поверхности

относительно слабое, линейное увеличение общей массы отсека длиной в один метр – порядка 20% (рисунк 6). При эллипсности, превышающей данную величину, масса отсека начинает значительно расти.

Основной вклад в рост массы фюзеляжа вносят шпангоуты (рисунк 5). Для компоновок сечений, представляющих ближайший практический интерес (эллипсность 0,72-0,8), суммарный рост массы отсека фюзеляжа, выполненного из традиционных алюминиевых сплавов, составляет величину порядка 30-40% (рисунк 6). Возможность применения современных ПКМ в конструкции шпангоута может обеспечить аналогичное снижение массы за счет высоких удельных показателей прочности и жесткости ПКМ [16-20].

Обшивку фюзеляжа и стрингерный набор целесообразно сохранить алюминиевыми для лучшего конструктивного решения многочисленных зон крепления стрингеров к стенке эллиптического шпангоута, работающих «на отрыв». Выполнение шпангоута из двух сложенных зеркально половинок швеллерного сечения с закрепленными между стенками швеллеров листовыми «тягами», соединенными со стрингерами, может обеспечить нагружение шпангоута в плоскости симметрии стенки силами от внутреннего давления, а также обеспечит преемственность конструкции шпангоута с уже освоенными конструкциями нервюр из ПКМ.

Известные реализованные конструкции фюзеляжей с эллиптическим сечением имеют вертикальную ось эллипсности (Airbus A-380). Особенности такого расположения оси в сочетании с двухпалубностью в значительной мере нивелируют недостатки эллиптического сечения: балки полов, работающие на растяжение, удерживают боковины шпангоутов фюзеляжа, а увеличенная по сравнению с круговым сечением строительная высота фюзеляжа облегчает восприятие изгибающего момента. Фюзеляж с горизонтальной осью

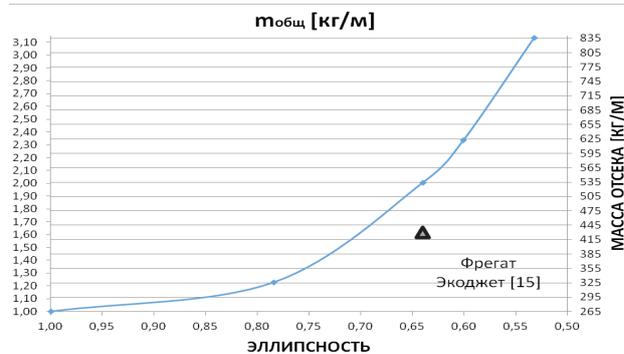


Рис. 6. Зависимость массы отсека длиной в 1 метр от эллипсности

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

эллипсности лишен этих положительных особенностей: балки пола будут работать на сжатие, строительная высота фюзеляжа уменьшается.

Таким образом, очевидные внеэкономические преимущества компоновок самолетов с фюзеляжами эллипсного сечения с осью эллипсности в горизонтальной плоскости требуют внимательного изучения со стороны прочности и экономичности и, как и в случае самолета с крылом обратной стреловидности, вероятнее всего могут быть эффективно реализованы только благодаря широкому применению ПКМ.

Литература

1. E. Torenbeek. *Advanced Aircraft – Conceptual Design, Technology and Optimization of Subsonic Civil Airplanes*. Wiley, Chichester, 2013, 436 с.
2. Арутюнов А.Г., Дыдышко Д.В., Ендогур А.И., Кузнецов К.В., Толмачев В.И. Перспективы развития транспортных самолетов // Труды МАИ, 2016. № 90. <http://trudymai.ru/published.php?ID=74704>
3. Михайлов Ю.С., Петров А.В., Пигусов Е.А., Черноусов В.И. Концепция двухфюзеляжного транспортного самолета // Материалы XXIV научно-технической конференции по аэродинамике. Жуковский: ЦАГИ, 2013. С. 183.
4. Васильев В.В., Лазарев В.В. Двухфюзеляжный самолет: proetcontra // Труды МАИ, 2017. Вып. №96. <http://trudymai.ru/published.php?ID=85698>
5. Бирюк В.И., Климов А.В., Навоев А.А., Черноусов В.И. Конструктивно-силовая компоновка самолета с поперечным сечением фюзеляжа в виде эллипса // Полет, 2011. № 9, С. 12-18.
6. Mansfield E.H., Sc. D, F. R. Ae. S., On the Design of a Row of Windows in a Pressurized Cylindrical Fuselage, Communicated by the Deputy Controller Aircraft (Research and Devepolment), Ministry of Aviation, Report and Memoranda, no 3360, 1963.
7. Application of the Finite Element Method Using MRAC and Mentat, Chapter 8: Aircraft Fuselage Window, Michigan State University, 2005.
8. Бирюк В.И., Климов А.В., Навоев А.А., Черноусов В.И. Разработка конструктивно-компоновочной схемы фюзеляжа перспективного широкофюзеляжного самолета // Ученые записки ЦАГИ, 2013. № 5, С. 102-110.
9. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1994. 384с.
10. Катыврев И.Я., Неймарк М.С., Шейнин В.М. Проектирование гражданских самолетов: Теории и методы. М.: Машиностроение, 1991. 672 с.
11. Войт Е.С., Ендогур А.И., Мелик-Саркисян З.А., Проектирование конструкций самолетов. М.: Машиностроение, 1987. 416с.
12. Ендогур А.И. Конструирование самолетов. Конструирование деталей и узлов. М: МАИ, 2013. 553 с.
13. Егер С.М., Лисейцев Н.К. Проектирование самолетов. М.: Машиностроение, 1983. 616 с.
14. Шейнин В.М., Козловский В.И. Весовое проектирование и эффективность пассажирский самолетов. Т. 1. Весовой расчет самолета и весовое планирование. М.: Машиностроение, 1977. 344 с.
15. Росавия «Фрегат Экоджет», <http://www.frigate-ecojet.ru/>
16. Ramyaа B., Prasath P., Venkadesan S. Analysis and design of steel – concrete composite structure, S.R.M. Engineering College, 2005.
17. Mohite P.M., Upadhyay C.S. A continuum damage mechanics based damage initiation and evolution in laminated composites. Theme: Fracture, Fatigue and Ageing of Structures, 14-th NASAS at VNIT Nagpur, 2006.
18. SachinS., Mohite P.M. Design and Optimization of a Composite Canard Control Surface of an Advanced Fighter Aircraft under Static Loading, Curved and Layered Structures, Vol. 2, 2015, 91-105.
19. Querin S.M., Toropov V.V., Liu D., Lohse-Bush H., Huhne C., Nemann S., Kolesnikov B. Topology and parametric Optimization of a lattice composite fuselage structure, Altair University, 2014.
20. Wilmes H., Kolesnikov B., Fink A., Kindervater C. New design concepts for a CFRP fuselage. In Workshop at German Aerospace Centre (DLR) on Final Project of Black Fuselage, Braunschweig, Germany, 2002.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

УДК 34.096

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ КАК СПОСОБЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ПРАВ НА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ СОБСТВЕННОСТЬ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ИНТЕРЕСАХ

TO THE QUESTION OF THE MECHANISM OF COMPULSORY LICENSING AS A WAY TO LIMIT THE RIGHTS TO INTELLECTUAL PROPERTY IN THE PUBLIC INTEREST

Анна Сергеевна Смурова

студентка магистратуры
Московский государственный юридический
университет им. О.Е. Кутафина
Адрес: 142207, Московская обл.,
г. Серпухов, ул. Осенняя, д. 76, кв. 39
E-mail: smurovaanna@mail.ru

Аннотация

Проведен экспресс-анализ опыта зарубежных государств по распоряжению правами государств на результаты интеллектуальной деятельности в части касающийся механизма принудительного лицензирования как способа ограничения прав на интеллектуальную собственность в общественных интересах. Показано, что все большее значение для уравнивания баланса интересов между правообладателями и пользователями, для разрешения противоречия между правами на интеллектуальную собственность и правом на доступ к технологиям, а также к объектам авторского права, принимают не только гибкие механизмы (режимы ограничений и изъятий), но и связанное с ними на государственном уровне антимонопольное регулирование и регулирование свободного использования результатов интеллектуальной деятельности.

Ключевые слова: результаты интеллектуальной деятельности, интеллектуальная собственность, правообладатель, защита, права, лицензирование, зарубежный опыт, распоряжение правами, государственные закупки.

Summary

An express-analysis of the experience of foreign countries on the disposition of the rights of states to the results of intellectual activity in terms of the mechanism of compulsory licensing as a way of restricting intellectual property rights in the public interest has been carried out. It is shown that increasingly important for balancing the balance of interests between right holders and users, for resolving the contradiction between intellectual property rights and the right to access to technology, as well as to objects of copyright, accept not only flexible mechanisms (restrictions and exemptions), but and related at the state level antimonopoly regulation and regulation of the free use of the results of intellectual activity.

Keywords: results of intellectual activity, intellectual property, right holder, protection, rights, licensing, foreign experience, disposal of rights, government procurement.

Потенциал экономического роста любой страны напрямую зависит от уровня развития науки и техники. Без каких-либо элементов изобретательства и новаторства невозможен был бы технический прогресс и развитие производительных сил. В последнее время с углублением инновационных процессов и повышением уровня информатизации общества значимость интеллектуальной составляющей производственных ресурсов существенно возрастает. Ввиду этого особую значимость приобретает вопрос наиболее эффективного использования и реализации научно-технических достижений, что

непосредственно связано с развитием рынка интеллектуальной собственности, обеспечивающего действенный механизм реализации научно-технических достижений в форме результатов интеллектуальной деятельности (РИД).

Одновременно с этим, в условиях развития мировых рынков важное значение для правообладателей РИД как в России, так и за рубежом имеет доступ к эффективным средствам их правовой защиты. В связи с этим особенно актуальным является анализ опыта зарубежных стран по распоряжению правами государства на результаты интеллектуальной деятельности.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

В настоящее время наблюдается усиление государственной защиты интеллектуальной собственности и развитие механизмов, позволяющих восстановить баланс интересов и предотвратить злоупотребления со стороны правообладателей.

Политика усиления защиты прав на интеллектуальную собственность в рамках глобальных и региональных систем защиты отвечает интересам развитых стран и особенно транснациональных компаний (ТНК) (таких как, например, *Google, Apple, General Electric* и др.). Расширение объема охраны – увеличение сроков охраны, видов правомочий по отношению к действующим объектам и включение в число охраняемых новых объектов (например, биотехнологии, методы и результаты генной инженерии), возможность которых предусмотрена ст. 27 ТРИПС¹, которая ограничивает передачу технологий.

Такая ситуация с усилением защиты выгодна правообладателям технологий и отрицательно воспринимается заинтересованными в получении технологии сторонами, поскольку ограничивает доступ к инновациям в условиях ограниченных бюджетов на НИОКР.

Наряду с положительными эффектами для экономического роста в целом, права на интеллектуальную собственность в случае злоупотребления ими могут иметь и обратный эффект (в определенной мере, это признается даже в Соглашении ТРИПС – п. 2 ст. 8, ст. 40.1². В частности, остро стоит вопрос, связанный с укреплением системы гарантий на международном уровне для предотвращения злоупотребления монопольными правами при международном трансфере технологий.

В этой связи все большее значение для уравновешивания баланса интересов между правообладателями и пользователями, для разрешения противоречия между правами на интеллектуальную собственность и правом на доступ к технологиям, а также к объектам авторского права, принимают не только гибкие механизмы (режимы ограничений и изъятий), но и связанное с ними на государственном уровне анти-

монопольное регулирование и регулирование свободного использования РИД [1].

Так, механизм принудительного лицензирования (процедура принудительного заключения лицензионного соглашения³) позволяет регулятору ограничивать право на интеллектуальную собственность в общественных интересах. В то же время применение данного механизма может привести к значительному негативному влиянию на стимулы к инновационной деятельности [3].

Анализируя зарубежный опыт, в качестве одного из показательных примеров решения на государственном уровне вопроса распоряжения правами на РИД, можно привести законодательную базу Индии. В соответствии со статьями 84 и 92 «Закона о патентах» этой страны [6] возможны следующие случаи применения механизма принудительного лицензирования:

1) любая заинтересованная сторона может обратиться в суд за принудительной лицензией в случае отказа правообладателя от ее выдачи в добровольном порядке, если не удовлетворяются обоснованные потребности общества, запатентованное изобретение не доступно обществу по приемлемой стоимости или запатентованное изобретение не используется в Индии (статья 84);

2) в случае чрезвычайного положения, в особо серьезных экстренных ситуациях (в том числе в случае недостатка лекарственных средств в условиях эпидемии) или в случае некоммерческого использования изобретения в общественных интересах правительство Индии может выдать принудительную лицензию третьему лицу (статья 92);

3) принудительная лицензия может быть выдана для экспорта запатентованных лекарственных препаратов в страны, в которых в недостаточном объеме представлены производственные мощности, необходимые для решения проблем здравоохранения (статья 92А).

Несмотря на наличие в законодательном поле Российской Федерации инструмента принудительного лицензирования, в России еще не было прецедента выдачи принудительной

¹ ТРИПС (TRIPS - Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights) – Соглашение ТРИПС – это соглашение по торговым аспектам прав интеллектуальной собственности.

² Статья 8 Принципы. 2. Надлежащие меры при условии, что они соответствуют положениям настоящего Соглашения, могут быть необходимы для предотвращения злоупотреблений правами интеллектуальной собственности со стороны владельцев прав или обращения к практике, которая необоснованно ограничивает торговлю или неблагоприятным образом влияет на международную передачу технологии. Статья 40.1. Члены договариваются, что некоторые виды лицензионной практики или условия, относящиеся к правам интеллектуальной собственности, которые ограничивают конкуренцию, могут иметь неблагоприятное воздействие на торговлю и препятствовать передаче и распространению технологии.

³ Лицензионное соглашение – это соглашение о долговременном научно-техническом сотрудничестве конкурентов – тех, кто создает и владеет интеллектуальной собственностью, и теми, кто не владеет этой интеллектуальной собственностью и кому эта интеллектуальная собственность необходима для обеспечения достижения собственных целей.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

лицензии. Существующая законодательная база в рассматриваемой сфере в нашей стране представляет собой достаточно громоздкую, сложную и противоречивую систему нормативных правовых актов, значительная часть которых принята на подзаконном и ведомственном уровнях [4].

Возвращаясь вновь к зарубежному опыту (в частности, Индии) необходимо также отметить, что механизм принудительного лицензирования может быть ограничен сферой государственных закупок. В России, например, значительные бюджетные средства в рамках проведения государственных закупок приходится на покупку оригинальных препаратов с высокой стоимостью. Так, в количественном выражении оригинальные лекарственные средства в структуре госзакупок занимают 4,6% по данным маркетингового агентства DSM Group за 2016 год [5], в стоимостном выражении их доля составляет 37,5%. Всего в 2016 году для больниц было закуплено 882,2 млн. упаковок лекарственных средств на сумму 221,9 млрд. рублей [2].

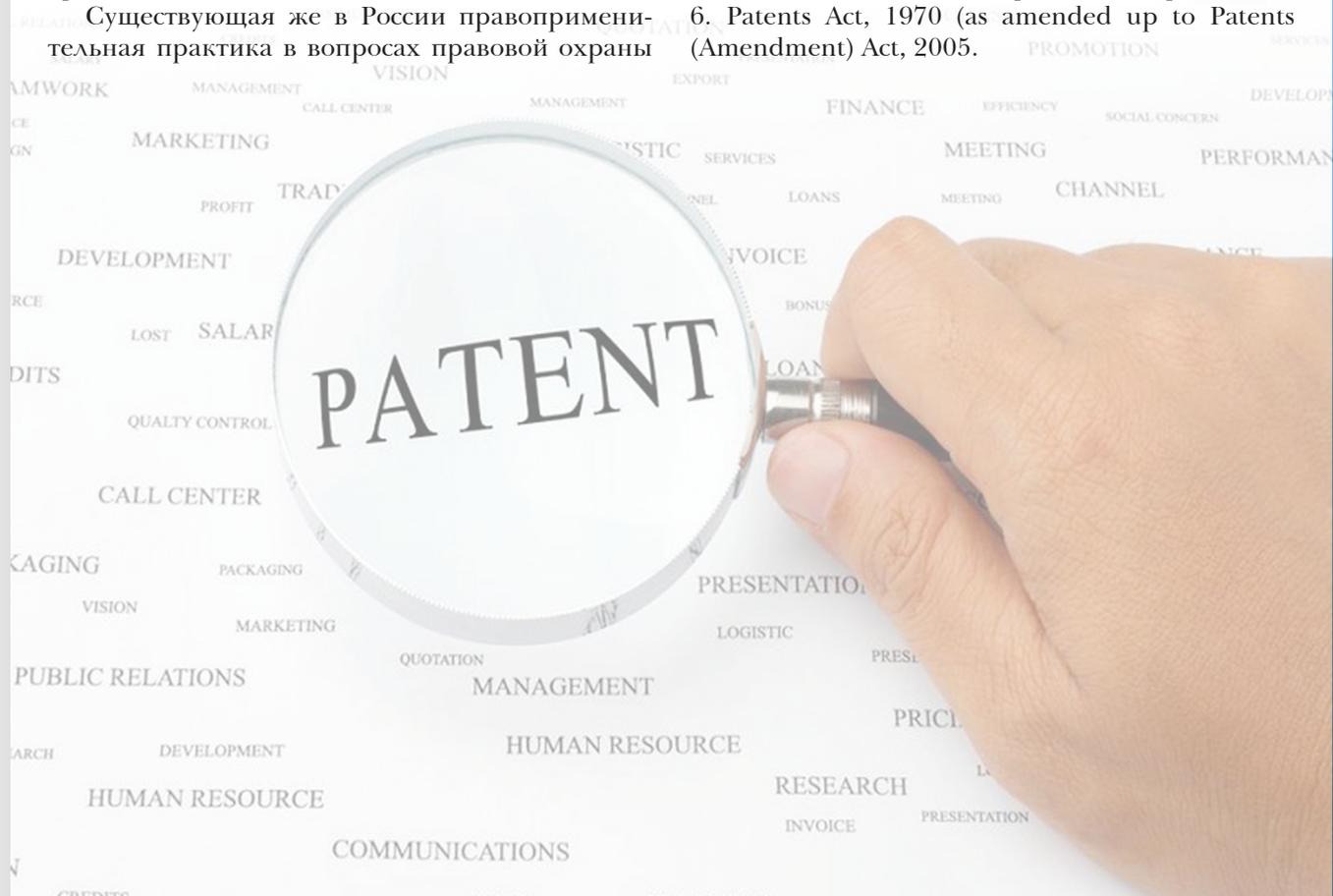
Итак, эффективно организованное распоряжение государством правами на результаты интеллектуальной деятельности стимулирует компании к инновационной активности, одновременно влияя на общественное благо.

Существующая же в России правоприменительная практика в вопросах правовой охраны

результатов выполнения научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической деятельности по государственным контрактам, являющихся объектами интеллектуальной собственности, а также в отношении не охраноспособных результатов, замедляет процесс их коммерциализации и введения в хозяйственный оборот, что в целом негативно сказывается на развитии экономики Российской Федерации.

Литература

1. Алейников Б.Н. Некоторые вопросы становления и развития интеллектуальных прав в России // Российская юстиция, 2016. №7. С. 8-10.
2. Обзор госпитальных закупок по итогам 2016 года URL: <http://www.dsm.ru/news/374/> (Дата обращения 26.10.2018).
3. Право интеллектуальной собственности: Сб. науч. тр. / РАН. ИНИОН. Центр социал. науч.-информ. исслед. Отд. правоведения; МГУ им. М.В. Ломоносова. Каф. предпринимательского права; Отв. ред. Афанасьева Е.Г. М., 2017. 202 с.
4. Правовая защита интеллектуальной собственности: проблемы теории и практики: сборник материалов IV международного юридического форума (IP форума). М., 2016. 417 с.
5. Фармацевтический рынок России: Итоги 2016 года. Аналитический обзор DSM Group.
6. Patents Act, 1970 (as amended up to Patents (Amendment) Act, 2005).



СОБЫТИЯ

ПОЗДРАВЛЯЕМ!

Указом Президента Российской Федерации №693 от 6 декабря 2018 года Президент – Председатель Правления МОУ «ИИФ» заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Почётный гражданин города Серпухова Алексей Николаевич Царьков награжден Орденом Почёта за достижения в научно-исследовательской деятельности, позволившие обеспечить России значительное научное и техническое преимущество в различных отраслях науки, повысить уровень внутреннего производства конкурентно-

способной высокотехнологичной продукции.

От всей души поздравляем Алексея Николаевича с высокой государственной наградой! Искренне убеждены, что и в дальнейшем под его высокопрофессиональным руководством Институт будет развиваться и процветать на благо нашей Родины – великой России!



ТОПОГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ И НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОСУДАРСТВА

В ноябре в Комитете по обороне Государственной Думы состоялось заседание межведомственной рабочей группы по совершенствованию топогеодезического и навигационного обеспечения системы управления обороной и безопасностью государства, созданной при Экспертном совете Комитета для выработки мер законодательного характера по обновлению структуры отрасли геодезии и картографии и распространению на все ее элементы единого поля нормативного правового, информационного и технического регулирования.

Организация вопросов формирования и обеспечения деятельности группы возложена на МОУ «ИИФ». Это решение принято Комитетом по обороне по результатам обсуждения проблемных вопросов топогеодезического и навигационного обеспечения, проведенных с участием представителей Комитета ГД по обороне и ведущих профильных организаций в ходе демонстрационного показа МОУ «ИИФ» результатов разработки навигационно-геодезических комплексов, выполненных им по заказу МО РФ в период 2007-2017 годов.

В группу вошли ведущие профильные специалисты федеральных органов исполнительной власти, федеральных служб, научно-производственных и образовательных организаций.

Заседание открыл Председатель Комитета по обороне, Герой России В.А. Шаманов. Владимир Анатольевич поблагодарил МОУ «ИИФ» за качественную подготовку заседания и отметил, что анализ эффективности действующей сегодня системы управления отраслью геодезии и картографии вызывает необходимость радикального ее реформирования, существующие в отрасли проблемы существенно снижают эффективность решения задач социально-экономического развития государства и обеспечения требуемого уровня его обороноспособности.

С информационными сообщениями по теме рассматриваемых на заседании вопросов выступили руководитель Секции проблем управления обороной государства Экспертного совета Комитета по обороне С.И. Скоков и руководитель межведомственной

рабочей группы, советник группы советников начальника ГШ ВС С.В. Козлов.

В ходе дискуссии участники заседания подтвердили неоспоримую актуальность обсуждаемых вопросов, отметив при этом, что отсутствие централизованного государственного управления геоинформационным научно-производственным комплексом и единых государственных стандартов создания современных геопространственных данных, отсутствие отраслевой координации планирования и выполнения геодезических работ и навигационного обеспечения приводит к снижению эффективности отрасли.

По результатам обсуждения участники заседания приняли решение, основным содержанием которого явилась необходимость дальнейшего развития работы по комплексному анализу нормативной правовой базы, регламентирующей топогеодезическое и навигационное обеспечение государства для подготовки предложений по уточнению федеральных законов.

В целях формирования перспективного облика системы управления отраслью геодезии и картографии предложено изучить возможности и потребности государственных органов в геодезическом, картографическом и навигационном обеспечении обороны и государственной безопасности, включая геодезические данные, картографические материалы и высокоточные геопространственные данные. Конкретизированы задачи и сроки выполнения мероприятий по развитию топогеодезического и навигационного обеспечения государства, уточнены вопросы разработки проектов Концепции развития системы управления обороной и безопасностью РФ и соответствующей федеральной целевой программы в части, касающейся топогеодезического и навигационного обеспечения.

В целом, по общему мнению участников, заседание проведено в деловой обстановке, позволившей определиться в основных направлениях дальнейшей работы и принять конструктивное решение. Очередное заседание группы предусмотрено провести в марте 2019 года.

СОБЫТИЯ

КУРС – НА АРКТИКУ

МОУ «ИИФ» принял участие в VIII Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее», который проходил с 5 по 7 декабря в конгрессно-выставочном центре «ЭКСПОФОРУМ» в Санкт-Петербурге.

Форум проводится с 2011 года, Институт принимает в нем участие последние три года. Основной организатор – МОО «Ассоциация полярников» во главе с Президентом Ассоциации учёным-океанологом, доктором географических наук, профессором, Героем Советского Союза, Героем России А.Н. Чилингаровым.

«Арктика: настоящее и будущее» – авторитетная дискуссионная площадка, которая способствует решению актуальных вопросов развития Арктики, достижению основных национальных интересов России в Арктике путем развития взаимодействия гражданского общества как в формате общественного диалога с органами власти, так и в формате общественной дипломатии с участниками международного неправительственного взаимодействия. Участие в работе форума приняли более 2000 человек – представители 40 российских регионов и 20 зарубежных стран.

Институт представил на выставке экипировку и оборудование, оснащенные системами локального электрообогрева, для выполнения боевых задач на суше и в воде в условиях низких температур; линейку гигиенических и косметических средств «Боеккомплект», обеспечивающую всем необходимым для гигиены при любых погодных условиях.

Особый интерес участников форума вызвали разработанные Институтом препараты: «ИИФ-ФИРОН» (иммуномодуляторное, противовоспалительное, регенераторное действие), «РЕВЕР» (иммуномодулирующее и регенераторное действие), «ФЛЮОСАН» (лечение кровопотери, шока и нарушений кровотока, для ускорения заживления ран и язв), «ФЛЮВИД» (капли для экранирования тканей роговицы глаз, кожи век, лица, слизистой носа от действия повреждающих факторов) и т.д.



Разработки МОУ «ИИФ» высоко оценили командующие флотами РФ, офицеры медицинских служб, представители Ассоциации полярников во главе с А.Н. Чилингаровым, предприятий и медицинских учреждений. Институт наладил новые контакты и достиг договоренностей о дальнейшем сотрудничестве по реализации представленных инновационных медицинских препаратов и оборудования.

ЛУЧШИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ СТЕНД

Делегация ученых МОУ «ИИФ» приняла участие в IV Форуме Комплексной безопасности «Безопасность. Крым-2018».

Стенд Института посетили командование и представители Черноморского флота, МЧС, Росгвардии, Антитеррористической комиссии, Управления специальных видов технического обеспечения ВС РФ, Торгово-промышленной палаты РФ, Союза предпринимателей Республики Крым, представители организаций, работающих в сфере охраны и безопасности, а также предприятий, которые занимаются производством и внедрением инновационных средств охраны и пожаротушения.

Все представленные Институтом средства обеспечения безопасности вызвали интерес участников Форума. Особенно востребованными и актуальными признаны системы пожаротушения и охранные извещатели, а также костюмы с электрообогревом для комфортной работы в условиях низких температур.

По итогам выставки Институт награжден специальным призом и дипломом за лучший инновационный стенд, а также дипломами участника Форума и за разработку автономных систем пожаротушения «Огнеборец».





Atakishchev Oleg I. Doctor of Technical Sciences, Professor. Deputy general director for special projects. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Batraeva Inna A. Candidate of physical and mathematical sciences. Acting Head of Department. Saratov State University. Saratov, st. Astrakhan, 83.

Bormashov Vitaliy S. Candidate of Technical Sciences. Senior scientist. Federal State Budgetary Institution, TIS-NCM. Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a.

Butranov Andrey S. Senior Researcher. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Chipiga Aleksandr F. Candidate of Technical Sciences. Professor. Head of the Department of Information Security of Automated Systems. «North Caucasus Federal University». Stavropol, pr-t. Kulakov, 2, Bldg. 9.

Drobyshevsky Yuri.V. Candidate of Chemical Sciences. Director of Development. «Protyus» LLC. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

Dunilin Victor M. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Durnov Artem S. Researcher. Military unit 33965. Moscow, Michurinsky Prospekt, 70.

Ermakov Artem M. Candidate of biological sciences. Senior Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3. Leading researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Ermakova Olga N. Candidate of biological sciences. Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Golovanov Anton V. Junior scientist. Federal State Budgetary Institution, TISNCM. Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a.

Ivanitskiy Genrikh R. Doctor of physical and mathematical sciences, professor, scientific head. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kargin Nikolay I. Doctor of Technical Sciences, professor, acting vice-rector, National Research Nuclear University, MPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

Khizhnyak Evgeniy P. Doctor of physical and mathematical sciences. Leading Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow Region, Pushchino, ul. Institutskaya, 3.

Khizhnyak Larisa N. Candidate of Medical Sciences. Researcher. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences. Moscow Region, Pushchino, ul. Institutskaya, 3.

Kolombet Evgeniy V. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Kolombet Valeriy A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Korchevaya Irina O. Scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Korotin Alexander M. Junior researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Kostyuk Dmitry V. Postgraduate Student. Department of Information Security of Automated Systems. «North Caucasus Federal University». Stavropol, pr-t. Kulakov, 2, Bldg. 9.

Kosyakov Evgeny N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Professor, Department of Networks and Communication Systems, Space Complexes Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13/

Kozhuryakin Dmitriy A. Senior specialist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a

Kukin Nikolay S. Candidate of Technical Sciences. Senior scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a

Lapin Dmitriy G. Aspirant. Physics Technological Institute, Russian Technological University. Moscow, pr-t Vernadskogo, 78.

Lesnykh Vadim N. Junior scientist. Head of the laboratory. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Lyagin Maxim A. Lecturer. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Maevskiy Evgeniy I. Doctor of Technical Sciences, professor. Vice-director for research. The Institute of Theoretical and Experimental Biophysics. Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3. Head of Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Martynov Sergey V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Head of Department. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.

Maslikov Alexander A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. Branch «Protvino» State University «Dubna». Moscow region, Protvino, Severny passage, 9.

Mitryaev Gennady A. Adjunct. Military Space Academy. A.F. Mozhaisky. St. Petersburg, ul. Zhdanovskaya, 13.

Mukhin Vladimir I. The honoured worker of a science of the Russian Federation. The doctor of military sciences, the professor. Professor of chair of information technology and control systems of Academy of civil protection of the Ministry of Emergency Measures of Russia. Moscow Region, Khimki, Novogorsk.

Muradova Anna R. Magistracy student. Moscow Aviation Institute (National Research University). Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarny I., 1a.



Nikitenko Vladimir V. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Nikitin Andrey K. Software engineer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Pashincev Vladimir P. Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences. Full Professor, Professor at the Department of Information Security of Automated Systems NCFU, Lead Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Popov Alexander N. General Director. «Aviaavtomatika» named after V. Tarasov». Kursk, st. Zapolnaya, 47.

Ryzenkov Vyacheslav A. Candidate of Technical Sciences. Head of Special Orders Department. Ministry of Defense of the Russian Federation. Moscow, Khoroshevskoe highway, d. 76b.

Samoilov Stanislav V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Head of Research Department (planning and organizing the training of scientific and pedagogical personnel). Academy of civil protection of the Ministry of Emergency Measures of Russia. Moscow Region, Khimki, Novogorsk.

Semionov Pavel A. Candidate of physical and mathematical sciences, professor. National Research Nuclear University, MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

Shevchenko Vyatcheslav A. Candidate of Technical Sciences. Contract serviceman of the Armed Forces of the RF, General Directorate for Information and Telecommunications Technology Development of the Ministry of Defense of the RF. Moscow, Frunzenskaya quay, 22/2.

Shlektarev Vladimir A. Engineer. Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow reg., Pushchino, Institutskaya st., 3.

Shmyrin Evgeny V. Candidate of Technical Sciences. Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Smirnov Dmitriy V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, associate professor. General director – First Vice-President of Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Smurov Sergey V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. Deputy director general. General designer. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Smurova Anna S. Student of magistracy in Kutafin Moscow State Law University. Moscow region, Serpukhov, Osenniyaya str. 7B.

Sosnovsky Egor N. Student. Branch of the MAI «Strela» (Zhukovsky). Moscow region, Zhukovsky, Zhukovsky Street, 8.

Stolbov Sergey N. CEO of open company Protius. Moscow, Zelenograd, Shokin Square, 2, building 4.

Tarelkin Sergey A. Acting head of the department, Federal State Budgetary Institution, TISNCM. Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a.

Teterin Dmitry P. Doctor of Technical Sciences, First Deputy General Director «Aviaavtomatika» named after V. Tarasov». Kursk, st. Zapolnaya, 47.

Toiskin Vasily E. Candidate of Technical Sciences. Scientist. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Trofimov Sergey D. Research intern. Federal State Budgetary Institution, TISNCM. Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a.

Troshiev Sergey Y. Candidate of Technical Sciences. Senior scientist. Federal State Budgetary Institution, TISNCM, Moscow, Troitsk, Tsentralnaya street, 7a.

Tsimbal Vladimir A. The honored worker of a science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor. The leading scientific employee. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Varlachev Valery A. Doctor of Technical Sciences, head of laboratory. National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk, Lenin Avenue, 30.

Vasiliev Alexander N. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. National Research Nuclear University, MEPhI. Moscow, Kashirskoe h., 31.

Vasilyev Valentin V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department G-11. Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4/

Vladyko Vladimir B. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. Head of Department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Volkov Gennadiy G. Doctor of physical and mathematical sciences, professor. The Petersburg Nuclear Physics Institute. Leningrad Oblast, Gatchina, Orlova roshcha, 1.

Voronov Yaroslav R. Graduate student. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Yeremin Boris G. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Senior Researcher. Institute of Engineering Physics. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a. Moscow reg., Serpukhov, Bolshoy Udarney I., 1a.

Zelenevsky Anatoly V. Candidate of Technical Sciences. Deputy Head of Department. CJSC «Firm of Scientific and Technical Center «KAMI». Moscow, Heroes Panfilovtsev st., 10.

Zelenevsky Vladimir V. Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation Doctor of Technical Sciences, Professor, professor of the department. Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow reg., Serpukhov, Brigadnaya st., 17.

Zelenevsky Yury V. Doctor of Technical Sciences, associate professor, researcher. Military Academy of the Strategic Missile Force. Moscow Reg., Balashikha, Karbysheva st., 8.



ЭТИКА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Редакционный совет и редакционная коллегия научно-технического журнала «Известия Института инженерной физики» придерживаются принятых международным сообществом принципов публикационной этики, отраженных, в частности, в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics).

Все статьи, предоставленные для публикации в журнале «Известия Института инженерной физики», проходят рецензирование на оригинальность, этичность и значимость. Соблюдение стандартов этического поведения важно для всех сторон, принимающих участие в публикации: авторов, редакторов журнала, рецензентов, издателя.

ОБЯЗАННОСТИ РЕДАКТОРА

Редактор в своей деятельности обязуется:

- постоянно совершенствовать журнал;
- следовать принципу свободы мнений;
- стремиться к удовлетворению потребностей читателей и авторов журнала;
- исключать влияние интересов бизнеса или политики на принятие решений об опубликовании материалов;
- принимать решения на основании принципа справедливости и беспристрастности, обеспечивать прозрачность редакционной деятельности на всех ее этапах;
- не раскрывать информацию о предоставленных материалах никому, кроме соответствующих авторов, рецензентов, других редакционных консультантов;
- оценивать рукописи исключительно по их научному содержанию;
- принимать решение о публикации материалов, руководствуясь следующими главными критериями: соответствие рукописи тематике журнала; актуальность, новизна и научная значимость представленной статьи; ясность изложения; достоверность результатов и законченность выводов. Качество исследования и его актуальность являются основой для решения о публикации;
- принимать меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов и защиты конфиденциальности персональной информации. При обнаружении содержательных, грамматических, стилистических и иных ошибок редакция обязуется предпринимать все меры для их устранения;
- обосновать свое решение в случае принятия или отклонения статьи;
- предоставить автору рецензируемого материала возможность для обоснования своей исследовательской позиции;
- поощрять дискуссии и предоставлять возможность для изложения точки зрения оппонентов;
- не использовать в собственных исследованиях информацию из неопубликованных материалов.

ОБЯЗАННОСТИ ЧЛЕНОВ РЕДСОВЕТА (РЕДКОЛЛЕГИИ)

Решение о публикации.

Редсовет (редколлегия) журнала «Известия Института инженерной физики» являются ответственными за принятие решения о том, какие статьи будут опубликованы в журнале. Решение принимается на основании представляемых на статью рецензий

Редсовет (редколлегия) придерживаются политики журнала и действуют в рамках законных требований, поскольку несут ответственность за нарушение авторских прав.

Конфиденциальность.

Рецензенты или кто-либо из сотрудников редакции не должны разглашать никакую информацию о предоставленной рукописи кому-либо, кроме самого автора, рецензентов, потенциальных рецензентов, членов редакционного совета (коллегии) и издателя, поскольку она является конфиденциальной.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Неопубликованные материалы, находящиеся в предоставленной статье, не должны быть использованы в собственном исследовании научного редактора и рецензентов без специального письменного разрешения автора.

ОБЯЗАННОСТИ РЕЦЕНЗЕНТОВ

Рецензенты оказывают помощь членам редакционного совета (редколлегии) при принятии редакционного решения, а также помогают автору усовершенствовать работу.

Конфиденциальность.

Любые рукописи, полученные для рецензирования, должны восприниматься как конфиденциальные документы. Они не могут быть показаны либо обговорены с другими лицами, кроме тех, которые уполномочены редакцией.

Подтверждение источников.

Рецензенты должны идентифицировать опубликованную работу, которая не была процитирована автором. Любое утверждение, что наблюдение, происхождение либо аргумент ранее были сообщены, необходимо сопровождать соответствующей ссылкой. Рецензент должен также донести до сведения редакции о любой существенной схожести или частичном совпадении между рукописью, которая рецензируется, и другой уже опубликованной работой, которая ему знакома.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Приватная информация или идеи, возникшие в процессе рецензирования, должны остаться конфиденциальными и не могут быть использованы в личных интересах. Рецензент не должен рассматривать рукопись, если имеет место конфликт интересов в результате его конкурентных, партнерских либо других отношений или связей с кем-либо из авторов, компаний или организаций, связанных с материалом публикации.

ОБЯЗАННОСТИ АВТОРОВ

Оригинальность и плагиат.

Авторы должны гарантировать, что они написали полностью оригинальную работу. Если авторы использовали работу и/или слова других авторов, это должно быть соответственно указано и процитировано.

Доступ к данным и сохранность.

Автор должен быть готов обеспечить доступ к данным, связанными с материалом публикации, если таковой возможен. Во всяком случае, автор должен быть готов сохранять такие данные на протяжении разумного периода времени после опубликования.

Многоразовая, избыточная или конкурирующая публикация.

Автор не должен публиковать работы, которые описывают по сути одно и то же исследование, более чем один раз или более чем в одном журнале.

Предоставление рукописи более чем в один журнал одновременно означает неэтичное издательское поведение и является недопустимым.

Подтверждение источников.

Необходимо предоставлять должное подтверждение работ других авторов. Авторы должны процитировать публикации, которые имели значение при создании заявленной работы.

Авторство материала.

Авторство необходимо ограничить теми лицами, которые внесли ощутимый вклад в концепцию, проект, исполнение или интерпретацию заявленной работы. Всех, кто внес ощутимый вклад, следует внести в список соавторов.

Автор должен гарантировать, что список авторов содержит только действительных авторов и в него не внесены те, кто не имеет отношения к данной работе, а также то, что все соавторы ознакомились и одобрили окончательную версию статьи и дали согласие на ее публикацию.

Раскрытие информации и конфликт интересов.

Все авторы должны сообщать, если в их работе имеется финансовый либо другой конфликт интересов, который может повлиять на результаты или интерпретацию их рукописи.

Ошибки в опубликованных работах.

Если автор обнаружит существенную ошибку или неточность в своей опубликованной работе, его обязанность – незамедлительно сообщить об этом в редакцию журнала или издателю и сотрудничать с редакцией при исправлении ошибок.

НАРУШЕНИЯ

При возникновении ситуации, связанной с нарушением публикационной этики со стороны редактора, автора или рецензента, требуется ее обязательное рассмотрение. Редакционный совет (редколлегия) обязана потребовать разъяснения, без привлечения лиц, которые могут иметь конфликт интересов с одной из сторон.

Если материал, содержащий значительные неточности, был опубликован, он должен быть незамедлительно исправлен в форме, доступной для читателей и систем индексирования.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ

Для публикации принимаются статьи на русском языке. Рекомендуемый объем статьи – 0,2–0,4 п.л. (8000–16000 знаков).

Тексты должны быть представлены:

- в электронном виде (Word 2003). Иллюстративный материал (сложные формулы, рисунки, фотографии и т.д.) кроме размещения в тексте обязательно должны предоставляться отдельными файлами!

- на бумажном носителе формата А4.

Текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала (гарнитура «Times New Roman»), кегль 14.

Простые символы и формулы не набирать в математическом редакторе!

Напечатанный текст должен иметь поля: верхнее и левое – 2,5 см, правое и нижнее – 2 см.

Вверху первой страницы статьи размещаются:

- рубрика журнала (см. Приложение 1);
- УДК;
- название статьи с переводом на английский язык;
- имя, отчество, фамилия автора (авторов), ученая степень, ученое звание, должность и место работы.

Список литературы (Литература) размещается в конце статьи.

После литературы помещаются:

- список ключевых слов, краткая аннотация (на русском и английском языках).

Завершает рукопись полная информация об авторе (авторах):

- ФИО;
- ученая степень, ученое звание, должность и место работы с переводом на английский язык;
- адрес места работы, контактные телефоны, электронный адрес (по желанию автора – домашний адрес и телефон).

Обращаем особое внимание на:

- точность и правильность библиографического оформления списка литературы (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008);
- выверенность статьи в компьютерном наборе;
- полное соответствие файла на электронном носителе и бумажного варианта.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей, при этом с точки зрения научного содержания авторский вариант сохраняется.

Статьи, не принятые к публикации, не возвращаются. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается!

Приложение 1

РУБРИКАЦИЯ ЖУРНАЛА

«Известия Института инженерной физики»

Постоянные рубрики

- **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.**
- **Радиотехника и связь.**
- **Информатика, вычислительная техника и управление.**

Разовые рубрики

- **Техника специального назначения.**
- **Инновационные проекты.**
- **Техническое регулирование.**
- **Профессиональное образование.**
- **Искусственный интеллект и робототехника.**
- **Медицина и фармацевтика.**
- **Диагностические системы.**
- **Научные обзоры. Научные рецензии. Отзывы.**

В соответствии с Решением Межведомственной комиссии РФ по защите государственной тайны №69 от 26 февраля 2001 г., требованиями законов №5485-1 «О государственной тайне» от 21 июля 1993 г., №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» от 27 июля 2006 г. статьи для публикации принимаются только при наличии экспертного заключения с разрешением на открытое опубликование.



CONTENTS

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

- Lapin D.G., Vladyko V.B., Kozhuryakin D.A.**
Reconstruction of the topology of integrated circuits using the focused ion beam method 2
- Ermakov A.M., Ermakova O.N., Shlektarev V.A.**
Installation of local generation of weak alternating magnetic fields for biological research 9
- Khizhnyak E.P., Maevskiy E.I., Khizhnyak L.N., Ivanitskiy G.R., Smurov S.V.**
Possibilities of adaptation of miniature infrared cameras of the new generation to the requirements of medical diagnostics 15
- Varlachev V.A., Drobyshevskiy Y.V., Stolbov S.N., Volkov G.G., Dunilin V.M., Smurov S.V.**
Effective management of flows of thermal neutrons: the direction and application 23
- Martynov S.V., Yeremin B.G., Nikitenko V.V., Butranov A.S.**
The method of using thermal dummy to assess the thermophysical properties of the evacuation means 32

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Zelenevsky V.V., Zelenevsky Y.V., Zelenevsky A.V., Shmyrin E.V., Durnov A.S., Ryzhenkov V.A.**
Cascading data encryption equidistant orthogonal nonbinary and binary codes 39
- Kosyakov E.N., Mitryaev G.A.**
The method of priority dispatching of orbital channel resource on the basis of non-Markov priority queuing systems 43
- Chipiga A.F., Shevchenko V.A., Pashincev V.P., Kostyuk D.V.**
Evaluation of the energy secrecy of a low-frequency satellite communication system with an arbitrary multiplicity of spatial diversity 49
- Tsimbal V.A., Toiskin V.E., Lyagin M.A.**
The method of optimizing speeds in the HF channels of the composite virtual connection during the delivery of multi-packet messages during a communication session 56

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING AND MANAGEMENT

- Kolombet V.A., Kolombet E.V., Lesnykh V.N.**
New perspectives for applications of the universal period-tripling system 62
- Smirnov D.V., Korotin A.M., Voronov Y.R.**
General provisions of the methodology for constructing integrity control systems for sensitive information in ALS systems based on a broadcasting radio channel 67

- Mukhin V.I., Samoilov S.V.**
Automated information system for predicting the state of fire-hazardous objects when exposed to shock waves generated by conventional means of destruction 73
- Smurov S.V., Maslikov A.A., Volkov G.G.**
On the ideas and methods of the solid spin-state qubit entanglement. Statistical ensemble and density matrix 86
- Popov A.N., Teterin D.P., Atakishchev O.I., Batraeva I.A.**
Matrix method of planning the trajectory of the unmanned aerial vehicle of variable mass 93
- Kukin N.S., Vasiliev A.N., Semionov P.A., Smurov S.V., Kargin N.I., Tarelkin S.A., Bormashov V.S., Troshiev S.Y., Golovanov A.V., Trofimov S.D., Korchevaya I.O., Muradova A.R., Nikitin A.K.**
Creating a single NV-center at the specified place of the synthetic diamond crystal 99

INNOVATIVE PROJECTS

- Vasilyev V.V., Sosnovsky E.N.**
The effect of ellipse on the mass characteristics of the fuselage 102

TECHNICAL REGULATION

- Smurova A.S.**
To the question of the mechanism of compulsory licensing as a way to limit the rights to intellectual property in the public interest 106

- EVENTS** 109
- AUTHORS** 111
- THE ETHICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS** 113
- REQUIREMENTS TO AUTHORS** 114



**Межрегиональное
общественное
учреждение**

**«Институт
инженерной
физики»**

(МОУ «ИИФ»)

**научное, образовательное
и производственное
учреждение**