

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

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-64098

от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»

(141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издаётся с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

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

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
2. Технические науки; 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.3. Информационные технологии и телекоммуникации [2,3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей]; 2.5. Машиностроение [2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов]; 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия; [2.6.17. Материаловедение]

Подписной индекс в каталоге «Почта России» ПП997

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

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

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

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, предоставленных авторами для публикации

Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Артюшенко В.М., Попова Е.С.

АНАЛИЗ РАБОТЫ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ ДАННЫХ.....3

Дорохин В.А., Теряев Л.Н., Нечаевский А.В.
ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ МЕТА-ПРОСТРАНСТВ РАСШИРЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ.....14

Семенов А.Б., Артюшенко В.М.
АНАЛИЗ СТРУКТУРИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СИСТЕМНОЙ ТОЧКЕ БИФУРКАЦИИ. СИСТЕМНЫЕ ВОПРОСЫ.....36

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Семенов А.Б., Сиднев С.А., Царенко В.А.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЦОД ПО СХЕМЕ «ПО ПОТРЕБНОСТИ».....49

Шайхутдинов А.А.
МЕТОДЫ И АСПЕКТЫ ПРОГНОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ.....66

Шульженко С.Н., Перепелица К.А.
МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С УЧАСТИЕМ ЭКСПЕРТОВ.....77

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Вокин Г.Г., Насибулин М.Ш.
КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ЗАПУСКА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....90

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Подписано в печать 24.06.2024

Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,2

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-02

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»

г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп. 2

Карнюшкин А.И., Кузьмин В.В., Елисеева Е.А.,
Смирнов А.Е.

СОВРЕМЕННЫЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ЗАЩИТЕ ОТ ОБЛЕДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....99

Мороз А.П., Полехин А.И., Полехина Г.Е.,
Полехина К.А.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЦИКЛОГРАММ ОПРОСА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ СИСТЕМ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....120

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Каргина А.В., Вернигоров Д.Д.

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО САМОЗАЦЕПЛЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА.....142

Семерич А.С.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЛОКА СОПЛА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ.....155

Спирина Б.Л., Фролов С.В., Шуляк Е.Ю.

ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНО-ПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИТОВ В ГРАЖДАНСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....162

УДК 004.89

Анализ работы модели машинного обучения искусственного интеллекта при реализации информационного поиска в большом объеме данных

Владимир Михайлович Артюшенко, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и управляющие системы»,

Екатерина Сергеевна Попова, специалист по учебно-методической работе,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

В статье, рассмотрена модель машинного обучения на примере автоматической классификации кода по товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности по естественному описанию товара. Статья будет интересна для специалистов в области нейронных сетей и искусственного интеллекта.

Машинное обучение, автоматическая классификация, искусственный интеллект.

Analysis of the functioning of machine learning and artificial intelligence in implementing information retrieval in large volumes of data

Vladimir Mikhailovich Artyushenko, Doctor of Technical Sciences,

Professor, head of the Department of «Information technologies and control systems»,

Ekaterina Sergeevna Popova, a specialist in educational and methodical work at the

Department of «Information technology and Control Systems»,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,

pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

The article presents a machine learning model using the example of automatic classification of codes based on the commodity nomenclature of foreign economic activity according to a natural product description. The article will be of interest to specialists in the field of neural networks and artificial intelligence.

Machine learning, automatic classification, artificial intelligence.

Введение. В последнее время, искусственный интеллект и машинное обучение стали весьма актуальной темой в индустрии высоких технологий. Искусственный интеллект находится повсюду – от игровых станций до хранения сложной информации на работе. Компьютерные инженеры и ученые прикладывают все усилия, чтобы создать машины с интеллектуальным поведением, способные мыслить и реагировать в режиме реального времени. В настоящее время

искусственный интеллект переходит от стадии исследований к ранней стадии внедрения на отечественных предприятиях. Следует отметить, что искусственный интеллект является наукой, подобно математике или биологии, исследующей способы создания интеллектуальных программ и машин, способных к творческому решению проблем, что всегда считалось прерогативой человека.

Машинное обучение является подмножеством искусственного интеллекта и предоставляет информационным системам возможность автоматического обучения и совершенствования на основе опыта без явного программирования. Одной из важнейших составляющих машинного обучения является информационный поиск.

Классификация документов в информационном поиске является основной задачей, которая заключается в присвоении каждого документа определенной категории в зависимости от его содержания.

Некоторое время назад информационный поиск был в основном ограничен научным и прикладным применением, в котором работали небольшое количество ученых. Однако в последнее время эта область активно развивается. Современные методы информационного поиска позволяют эффективно обрабатывать огромные объемы данных, которые генерируются каждый день.

Задача классификации в машинном обучении входит в раздел «обучение с учителем» [1]. Это метод обучения, при котором система проходит обязательное обучение на основе примеров. Для достижения эффективности классификационного алгоритма требуется обучающая выборка – набор разнообразных документов из каждой категории (的独特ного объекта). Однако в «обучении с учителем» все еще требуется предварительная подготовка данных [3], включающая их разметку вручную.

Процесс классификации документов

Процесс классификации документов начинается с очистки и предобработки данных. Затем этот набор данных кодируется различными методами представления текста, после чего можно приступить к построению модели машинного обучения. Структура такой модели представлена на рисунке 1.

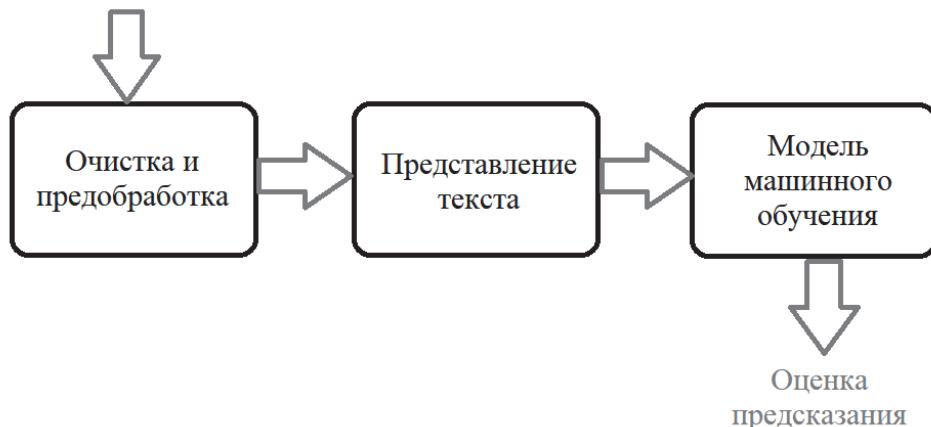


Рисунок 1 – Процесс классификации

Вариант очистки и предобработки теста, а также его представление был подробно рассмотрен в [3].

Рассмотрим и проанализируем модель машинного обучения и оценки предсказания кода на примере ТН ВЭД (товарной номенклатуры внешнеэкономической деятельности) по описанию товара.

Общая постановка задачи

Существует проблема – определение кода ТН ВЭД по описанию товара. Например, когда человек хочет что-то отправить, то ему необходимо заполнить таможенную декларацию, в которой нужно указать код товара. Подбор правильного кода может занять много времени, а за неверно указанный код грозит административная ответственность. Использование методов машинного обучения для автоматизации работы делает весь процесс очень быстрым и эффективным.

Математическая модель задачи классификации – это метод, который позволяет определить принадлежность объекта к одному из заданных классов на основе имеющихся данных. В задаче классификации мы имеем набор объектов, для которых известны значения признаков, и нужно определить, к какому классу они относятся.

Основная идея математической модели задачи классификации заключается в том, чтобы построить разделяющую поверхность в пространстве признаков, которая будет разделять объекты на классы. Для этого используются различные алгоритмы машинного обучения, такие как логистическая регрессия, метод опорных векторов, случайный лес, нейронные сети и другие.

В самом простом случае модель классификации может быть линейной, то есть объекты разделяются прямой линией или гиперплоскостью. В более сложных случаях можно использовать нелинейные модели, которые могут строить сложные нелинейные разделяющие поверхности.

Чтобы построить математическую модель задачи классификации, необходимо сначала обучить модель на обучающем наборе данных, где для каждого объекта известен правильный класс. Затем модель тестируется на тестовом наборе данных, чтобы оценить ее качество и точность предсказаний.

Оценка качества классификации играет важную роль в машинном обучении и анализе данных, так как позволяет определить, насколько хорошо работает модель классификации и насколько точно она предсказывает принадлежность объектов к различным классам. Оценка качества классификации помогает проверить эффективность модели, выявить ее сильные и слабые стороны, а также выбрать наиболее подходящий алгоритм для решения конкретной задачи.

Таким образом, математическая модель задачи классификации является основой для решения задач машинного обучения, позволяя точно и эффективно определять принадлежность объектов к различным классам.

Метрики для оценки качества классификации можно разделить на несколько больших групп, рассмотрим наиболее распространенные:

Метрики на основе матрицы ошибок (Confusion Matrix):

- Точность (Accuracy) – доля правильно классифицированных объектов от общего числа объектов;
- Полнота (Recall) – доля верно классифицированных объектов по-

- ложительного класса от всех объектов этого класса;
- Точность (Precision) – доля верно классифицированных объектов положительного класса от всех объектов, предсказанных как положительный класс;
- F1-мера (F1-score) – гармоническое среднее между точностью и полнотой.

Полнота и точность являются важными показателями эффективности классификации объектов. Полнота измеряет, насколько хорошо алгоритм классифицирует объекты данного класса, а точность определяет, насколько точно алгоритм определяет объекты, принадлежащие к данному классу. Для оценки идеальности классификационного алгоритма используются процентные значения, где 100% соответствует идеальному результату.

В задаче классификации, особенно с несколькими классами, может быть полезно использовать макро- и микро-усреднение для оценки качества модели. Оба метода позволяют учесть различные аспекты производительности модели в многоклассовой классификации.

1. Микро-усреднение:

Микро-усреднение, как правило, используется в задачах с дисбалансом классов, когда некоторые классы имеют небольшую долю от общей выборки. При микро-усреднении каждый предсказанный класс и его фактическое значение рассматриваются как отдельные события. Затем собираются все результаты для всех классов и рассчитываются метрики на основе общего количества правильно классифицированных и неправильно классифицированных объектов для всех классов. Микро-усреднение дает больший вес классам с большим количеством объектов.

2. Макро-усреднение:

Макро-усреднение рассматривает каждый класс независимо друг от друга и вычисляет метрики для каждого класса отдельно, затем усредняет результаты по всем классам. Макро-усреднение обрабатывает все классы как равнозначные при расчете метрик. Этот метод подходит для задач, когда важна независимость от дисбаланса классов и когда каждый класс должен быть рассмотрен отдельно.

Выбор между микро- и макро-усреднением зависит от специфики конкретной задачи классификации и целей анализа. Важно учитывать дисбаланс классов, предпочтения по рассмотрению каждого класса и того, какие аспекты производительности модели важнее для конкретного случая. Оба метода усреднения могут быть полезны в качестве дополнительных способов оценки работы модели и понимания ее обобщенности на различных классах.

Оценка качества классификации и выбор подходящих метрик играют важную роль в построении и улучшении моделей машинного обучения, так как помогают оценить и сравнить различные варианты моделей и оптимизировать их работу.

Стохастический градиентный спуск

Является моделью оптимизации целевой функции с гладкими свойствами. Он становится все более популярным алгоритмом в машинном обучении для задач классификации данных. В данной задаче мы представляем, что все объекты

могут быть классифицированы в два класса. Основная сложность заключается в определении, к какому классу относятся новые объекты.

Стохастический градиентный спуск является итерационным методом оптимизации, который заменяет фактический градиент на его оценку, рассчитанную на основе случайно выбранного подмножества данных. Это позволяет снизить вычислительную нагрузку при работе с большими объемами данных, обеспечивая более быстрые итерации.

Рассмотрим и проанализируем, как работает обычный градиентный спуск [2]. Предположим, что объекты n представляют собой числовые признаки $f_i : X \rightarrow R, j = 1..n$, и пространство признаковых описаний состоит из $X = R^n$.

Также есть конечное множество меток классов Y и обучающая выборка пар «объект-ответ» $\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$.

Предполагаем, что семейство алгоритмов $a(x, w)$ имеет параметр вектор весов w . Выбираем функцию потерь и обозначим ее как $\varphi_i(w)$ для i -го объекта выборки и алгоритма с весами w . Нашей целью является минимизация эмпирического риска:

$$Q(w) = \sum_{i=1}^l \varphi_i(w) \rightarrow \min$$

Если функция потерь принадлежит классу $C_1(X)$, то можно воспользоваться методом градиентного спуска.

Для того чтобы применить этот метод, выбираем начальное приближение $w^{(0)}$. Затем каждый следующий вектор параметров будет вычисляться с использованием градиентного шага – h :

$$w^{(t+1)} = w^{(t)} - h \sum_{i=1}^l \nabla \varphi_i(w^{(t)}),$$

Градиентный шаг определяет, насколько необходимо изменить вектор весов в направлении градиента. Остановка алгоритма будет зависеть от сходимости Q или w .

Стохастический градиентный спуск предлагает решение для проблемы, связанной с вычислением градиента для каждого элемента выборки в предыдущем алгоритме.

Можно использовать только одним элемент или некоторую подвыборку, чтобы вычислить нового приближения весов.

Вычисление нового приближения теперь будет выглядеть следующим образом:

$$w^{(t+1)} = w^{(t)} - h \nabla \varphi_i(w^{(t)}),$$

Где i – случайно выбранный индекс.

Так как направление изменения вектора w будет определяться по $Q(1)$, вычисление Q на каждом шаге будет слишком затратным процессом.

Чтобы ускорить оценку Q , мы можем использовать одну из приближенных рекуррентных формул:

- среднее арифметическое:

$$\bar{Q}_m = \frac{1}{m} \varepsilon_m + \frac{1}{m} \varepsilon_{m-1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m-2} + \dots = \frac{1}{m} \varepsilon_m + \left(1 - \frac{1}{m}\right) \bar{Q}_{m-1};$$

- экспоненциальное скользящее среднее:

$$\bar{Q}_m = \lambda \varepsilon_m + (1 - \lambda) \bar{Q}_{m-1} + (1 - \lambda)^2 \varepsilon_{m-2} + \dots = \lambda \varepsilon_m + (1 - \lambda) \bar{Q}_{m-1},$$

где λ является темпом забывания предыстории ряда; $\varepsilon_m = \varphi_i(w^{(t)})$ – потеря.

Процесс классификации данных

Код ТН ВЭД (Товарной Номенклатуры Внешнеэкономической Деятельности) или просто таможенный код представляет собой специальный код, используемый для классификации товаров при проведении внешнеэкономической деятельности (импорта, экспорта) и в таможенном деле.

Код ТН ВЭД состоит из нескольких цифр и букв, которые описывают товар с точностью до деталей, указывая на страну происхождения, вид товара, характеристики и другие важные детали. Этот код важен для правильного заполнения таможенных деклараций, определения таможенных пошлин и сборов, контроля за перемещением товаров через границы, статистического учета торговли и других таможенных процедур. Структура кода ТН ВЭД показана на рисунке 2.

Анализируя структуру кода, перейдем к обучению модели машинного обучения. Для этой цели был выбран язык программирования Python, который предлагает множество алгоритмов для предобработки текста, машинного обучения и нейронных сетей.

Исходными данными является пара код ТН ВЭД и значение, которое представляет описание исторического массива поданных деклараций за 2022 год.

Теперь можно приступить к анализу данных. Разобъем данные на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70/30, при этом количество записей составляет 191 682.

Метод стохастического градиентного спуска (SGDClassifier) реализуем в библиотеке Scikit-learn (sklearn).

Класс SGDClassifier реализует простую процедуру обучения стохастическим градиентным спуском, которая поддерживает различные функции потерь.

Для данной работы выберем функцию потерь «сглаженная потеря петли (или же плавная потеря петли)», так как она включает метод, позволяющий получить вектор оценок вероятности.



Рисунок 2 – Структура кода ТН ВЭД

Фрагмент реализации стохастического градиентного спуска представлен на рисунке 3.

```
from sklearn.linear_model import SGDClassifier
nb = Pipeline([('vect', CountVectorizer()),
               ('tfidf', TfidfTransformer()),
               ('clf', SGDClassifier(loss="modified_huber")),
               ])
```

Рисунок 3 – Фрагмент описания метода

Результат обучения. По окончании обучения модели, выполняется анализ ее точности, времени работы и сравнительный анализ полученных результатов.

Оценка точности производится с учётом F-меры, которая представляет собой гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall) (Рисунок 4):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

Рисунок 4 – Формула точности и полноты, где TP – истинно-положительное срабатывание; FP – ложно-положительное срабатывание; FN – ложно-отрицательное срабатывание

В конечном итоге, F -мера вычисляется по следующей формуле:

$$F = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Точность системы для каждого класса оценивает, насколько много положительных классификаций, сделанных моделью, действительно были верными.

Полнота системы измеряет, насколько много положительных экземпляров в данных было правильно классифицировано моделью.

Таким образом, точность и полнота работают в паре, предоставляя информацию о том, как хорошо модель правильно классифицирует объекты положительного класса и как много объектов этого класса модель упускает.

Когда классов много, изучение метрик каждого класса займет много времени. Поэтому для таких случаев существуют усредненные метрики.

Метрика *MacroAVG* – это среднее арифметическое значение.

$$MacroAVG = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n},$$

где M – метрика, по которой ищем усреднение.

Такую метрику обычно используют, когда класс имеет важность. При анализе результатов важно обратить внимание на то, чтобы метрика была не менее 40%, иначе модель считается посредственной по данной метрике.

На практике часто встречается ситуация, когда один класс содержит большое количество объектов, в то время как в другом классе их очень мало. Когда один из классов соответствует редко встречающимся явлениям, такую ситуацию называют дисбалансом классов. В таком случае используется метрика *WeightedAVG* – это взвешенное усредненное значение. Эта метрика схожа с *Macro*, но метрика берется каждого класса, и вместо среднего арифметического ищется взвешенное среднее, то есть для каждого класса используем вес

$$WeightedAVG = \sum_{i=1}^n M_i * m_i,$$

где t – вес, который рассчитается как количество объектов с целевым классом деленное на количество объектов в целом.

Эта метрику используется в случаях, когда имеется дисбаланс классов.

В результате проведенного эксперимента обучение модели *SGDClassifier* заняло 13 минут. Результаты обучения модели стохастическим градиентным спуском отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Результат обучения модели стохастического градиентного спуска

F-мера, %		Доля правильных ответов	Время
MacroAVG	WeightedAVG		
32%	59%	63%	13 мин

Результаты опыта свидетельствуют о том, что модель, оцениваемая по метрике макро (*MacroAVG*), является посредственной. В связи с несбалансированностью классов следует обратить внимание на взвешенное усредненное (*WeightedAVG*), которое должно составлять не менее 40%.

Для более подробного рассмотрения качества обучения модели стохастическим градиентным спуском приведены конкретные примеры. При запросе программы предлагает коды, соответствующие описанию товара с вероятностью более 10%. На рисунке 5 показан пример работы обученной модели *SGDClassifier*.

казан

7323910000 (73.57 %) изделия кухонные для бытовых нужд из чугунного литья...

3926909709 (25.16 %) изделия прочие из пластмасс и изделия из прочих материалов

Рисунок 5 – Пример работы обученной модели классификации

На вход подается описание товара: «казан». Программа выдает два наиболее подходящих кода. Исходя из вероятности соответствия кода описанию товара, выбирается код с наибольшей вероятностью – 73,57%.

Рассмотрим другой пример. На вход подается описание товара: «столешница деревянная». Программа выдает три наиболее подходящих кода с вероятностью более 10% (см. рисунок 6).

столешница деревянная

9403890000 (61.91 %) ЧАСТИ МЕБЕЛИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

9403910000 (12.79 %) ПРОЧАЯ МЕБЕЛЬ ИЗ ПРОЧИХ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЯ ТРОСТНИК

4412920000 (10.14 %) ФАНЕРА ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ С НАРУЖНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ ШПОНА ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД (БУКА)

Рисунок 6 – Пример работы обученной модели классификации

Возможность получения нескольких подходящих кодов позволяет пользователю самостоятельно выбирать код для товара.

Также можно убрать ограничение на вероятность и запросить все подходящие коды для заданного описания товара (см. рисунок 7).

7323910000 (73.7857967204138 %)
3926909709 (25.20350318970039 %)
6310100002 (0.178664563138552 %)
2933111000 (0.1763447202409497 %)
3605000000 (0.16343535887258612 %)
7016901000 (0.1560449699764956 %)
9303201000 (0.11796268686512623 %)
2804900000 (0.10076659682110783 %)
9405690009 (0.07145665707263804 %)
8517693100 (0.029174677160958847 %)
9015401000 (0.01684985973739462 %)

Рисунок 7 – Пример работы обученной модели классификации

Анализ данных, представленных на рисунке 6 показывает, что большая часть предложенных кодов имеет низкую вероятность. Очевидно, что пользователь не выберет кодировку с такой низкой процентностью, а значит, вышеуказанный выбор ограничения на вероятность является очень полезным.

Заключение. Таким образом, в статье была исследована модель машинного обучения для автоматического определения кода по товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности на основании естественного описания товара.

Был выполнен анализ работы модели машинного обучения, проведена оценка качества классификации. Проверка на примерах демонстрирует автоматическое определение кода товара по ТН ВЭД на основании естественного описания товаров.

Показано, что рассмотренный метод машинного обучения является оптимальным классификатором для прогнозирования и будет полезным для применения в задачах автоматической многоклассовой классификации текстовых данных. Данная разработка поможет пользователю в дальнейшем либо самому уточнить класс принадлежности товара, либо задать уточняющие признаки, которые

позволяют алгоритму определить подходящий код товара.

Литература

1. Бурков Андрей. Машинное обучение без лишних слов. СПб.: Питер, 2020. 192 с.
2. Лимановская О.В. Основы машинного обучения: учебное пособие / О.В. Лимановская, Т.И. Алферьева; Мин-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. 88 с.
3. Попова Е.С. Системный анализ задач при подготовке текста для машинного обучения // Современные информационные технологии. 2023. С. 176-185.

УДК 004.93

Технология создания мета-пространств расширенной реальности внутри помещений без предварительного сканирования

Виктор Александрович Дорохин, старший преподаватель

кафедры распределенных и вычислительных систем

института системного анализа и управления, ORCID 0000-0001-5283-614X,

Лев Николаевич Теряев, ассистент кафедры распределенных
и вычислительных систем института системного анализа и управления,

ORCID 0009-0008-3188-7616,

Андрей Васильевич Нечаевский, кандидат технических наук,

проректор по цифровому развитию, 0000-0001-6751-8195,

Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Московская область

Предлагается технология создания виртуальных пространств дополненной реальности на основе системы позиционирования. Описывается алгоритм построения трехмерных карт помещений на основе двухмерных поэтажных планов, что позволяет создавать виртуальные пространства без предварительного сканирования помещений. Предлагается формат обмена и формализации данных виртуального пространства. Проведен обзор возможных средств позиционирования внутри помещений. Представлена демонстрационная реализация описанной технологии с использованием среды разработки Unity3D. Помимо навигации, технология позволяет проводить позиционирование и трекинг виртуальных объектов, как следствие, может использоваться как основа для работы распределенной сети расширенной реальности внутри помещений. Проведена интеграция технологии в концепцию гео-распределенной сети расширенной реальности. Описана технология для разметки и формат обмена данными о мета-пространствах внутри помещений. Создан прототип мета-пространства и проведено тестирование полученной точности позиционирования пользователя и виртуальных объектов. Полученная технология может быть использована в информационных и рекламных задачах внутри помещений, навигации на больших площадях. На основе технологии есть возможность реализовывать бизнес-логику, связанную с реальным пространством, например – виртуальные панели мониторинга поверх объектов на производстве или мета-поддержку покупателей в магазине.

Расширенная реальность, навигация внутри помещений, дополненная реальность, гео-ориентированный AR-интернет, иммерсивные технологии, облако точек, позиционирование, мета-пространство.

Technology for indoor extended reality meta-spaces creation without pre-scan

Victor Alexandrovich Dorohin, Postgraduate student,
senior lecturer at the Department of Distributed and Computing Systems
of the Institute of System Analysis and Management, ORCID 0000-0001-5283-614X,
Lev Nikolayevich Teryaev, Postgraduate student of the Institute of System Analysis
and Management, ORCID 0009-0008-3188-7616,

Andrey Vasilevich Nechaevskiy, Ph.D., Vice-Rector for Digital Development,
Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies, 0000-0001-6751-8195,
The State University «Dubna», Dubna, Moscow region

A technology for creating augmented reality virtual spaces based on a positioning system is proposed. Described an algorithm for constructing three-dimensional indoor maps based on two-dimensional floor plans, which allows you to create virtual spaces without preliminary scanning of rooms. A format for exchanging and formalizing virtual space data is proposed. A review of possible indoor positioning means was carried out. Presented a demo implementation of the described technology using the Unity3D development environment. In addition to navigation, the technology will allow positioning and tracking of virtual objects, and as a result, it can be used as infrastructure for a distributed extended reality network indoors. The technology was integrated into the concept of a geo-distributed extended reality network. Described the marking technology and exchangee data format for indoor meta-spaces. A meta-space prototype was created and the resulting positioning accuracy was tested. The resulting technology can be used in information and advertising tasks indoors, navigation over large areas, marketing, etc. Using technology, it is possible to implement business logic associated with real space, for example, virtual monitoring panels on top of objects in production or meta-support for customers in a store.

Augmented reality, indoor navigation, geo-oriented AR internet, immersive technologies, point cloud, positioning, metaverses, meta-space.

Введение

Сегодня, в век информационных технологий проблема низкой пропускной способности существующих технологий человеко-машинного взаимодействия в совокупности с растущим объемом информации приводит к необходимости развития новых, более эффективных способов получения информации [1]. Использование высоко-иммерсивных технологий и их интеграции в повседневную жизнь человека является одним из возможных решений данной проблемы.

Для крупных компаний и владельцев помещений актуальной значится проблема предоставления пользователям различных услуг, основываясь на их

местоположении (Location-Based Service и Location-Based Advertising) [2]. Также актуальны и проблемы автоматизации логистических процессов в различных специализированных помещениях, таких как больницы, складские помещения. Активно применяются технологии расширения реальности в развлекательной и образовательной сферах, например, музеи [3], выставочные центры, университеты [4], и т.д. В условиях плотной застройки, ослабления или зашумления сигналов, возникают проблемы с использованием систем спутниковой навигации, как внутри зданий, так и на улице [5]. Что вынуждает к использованию внутри помещений отдельных технологий построения мета-пространств.

Мета-пространство – это виртуальная трехмерная среда, координаты которой привязаны к координатам реального мира. Мета пространство может содержать двумерные и трехмерные объекты, которые интегрируются в изображение реального мира и в некоторых случаях, вступают с ним во взаимодействие.

Мета-пространства внутри помещений могут стать универсальным решением многих существующих проблем и объединить способы их решения на базе единой платформы.

Для реализации гео-распределенных систем расширенной реальности и мета-пространств внутри помещений необходимы эффективные и быстровозводимые технологии навигации и позиционирования, не требующие специализированного оборудования или специфических знаний. Помимо технологий позиционирования необходимы способы формализации данных об помещениях и виртуальных объектах, а также технологии хранения, доставки и отображения данной информации на устройстве пользователя.

Авторами статьи предлагается технология построения мета-пространств внутри помещений на основе системы позиционирования и формата обмена данными об объектах и помещениях. Помимо решения основной задачи создания мета-пространства подобное объединение может положительно сказаться на качестве работы технологии позиционирования за счет наличия дополнительных средств уточнения позиции и сброса накопившейся погрешности. Предлагаемый формат описания виртуальных объектов, помещений и способов маршрутизации подходит для различных сфер применения и может комплексно решать описанные выше задачи.

Обзор технологий позиционирования внутри помещений

Навигация внутри помещений может использоваться в большом количестве различных задач. При чем, все эти задачи имеют разные требования к получаемому результату. За последние 10 лет сформировались различные технологии позиционирования и инструменты для решения этой задачи. Уже в 2017 году в обзорах насчитывали более 12 подвидов технологий позиционирования [6]. В основном можно разделить все решения на программно-аппаратные и чисто программные. К первым можно отнести технологии, которые так или иначе используют методы триангуляции сигнала для определения позиции пользователя относительно фиксированных в пространстве базовых станций Bluetooth-маяки [5]. В плане технической реализации Bluetooth-маяки представляют собой обычные

Bluetooth устройства, работающие по спецификации Bluetooth Low Energy (BLE) [7], таким образом, роль маяков могут выполнять и смартфоны на базе Android и iOS, ноутбуки и другие устройства, на которые устанавливается специальное программное обеспечение, работающее по протоколам BLE. Wi-Fi точки также могут использоваться для решения задачи позиционирования. В работе Ивенко Ф. и Маркса Ф. [8] описывается подход, совмещающий технологию Wi-Fi и инерциальные навигационные системы для позиционирования в помещениях. В статье Исмаила М.И.А. и Никулина В.В. [9] приводится концепция системы навигации внутри помещений на основе существующей Wi-Fi инфраструктуры. Плюс данной технологии позиционирования в том, что как правило помещения уже частично оборудованы нужными базовыми станциями. Примером системы с навигацией по магнитному полю является IndoorAtlas [10], которую используют магазины в Финляндии. Покупатели могут заранее составить список продуктов в специальном приложении для смартфона, и после того, как окажутся в магазине, приложение укажет самый короткий путь к нужным прилавкам. Подробный обзор программно-аппаратных систем позиционирования приведен в работе Shyam S, Juliet S and Ezra K [11], где проведен их сравнительный анализ с точки зрения применимости. Среди технологий позиционирования, не требующих внешних аппаратных устройств, можно выделить IMU, VLC, IR, Ultrasonic, Geomagnetic, LiDAR [12] и другие. Они объединены необходимостью использования дополнительных пространственных датчиков, за счет которых происходит ориентация в пространстве. Данный подход чаще всего используется в робототехнике. Подробное описание данных технологий представлено в обзоре Huang J.; Junginger S.; Liu H.; Thurrow [12]. Среди перспективных технологий можно выделить GNSS [13], 5G, LPWAN, а также другие [14].

Данные технологии позиционирования показывают стабильно высокую точность работы, но требуют дополнительного оборудования в помещении или специализированного оборудования на устройстве клиента. Поскольку, типичным клиентом сети стоит считать смартфон, как наиболее распространенный вид устройства, то для решения задачи организации мета-пространства стоит ориентироваться только на акселерометр и встроенную камеру. Из технологий позиционирования, использующих исключительно камеру устройства, можно выделить 2 основных: QR-коды (метки) и алгоритмы на основе облака точек.

QR-коды размещаются по всему периметру здания, позволяя мобильному устройству при сканировании кода точно определять текущее местоположение. Пример реализации системы навигации внутри помещений при помощи QR-кодов приводится в работе Абдрахмановой А.М. [15]. Располагать QR-коды можно на расстоянии до 50 метров, в зависимости от сложности планировки здания.

Облако точек – это набор точек в трехмерной системе координат. Существует одноименная технология позиционирования, которая определяет местоположение пользователя в пространстве на основе анализа и сравнения облака точек с трехмерной картой помещения. Технология использует комбинацию ка-

мер, датчиков и программного обеспечения для создания 3D-окружения, с которым можно взаимодействовать. Устройство при помощи специального программного обеспечения сканирует пространство и отмечает точки на контрастных поверхностях, тем самым давая виртуальную модель окружения [16]. Сканирование может проводиться как с помощью камер глубины, так и с применением фотограмметрии [17]. Пример отображения облака точек приведён на рисунке 1. Подробнее подобные технологии позиционирования описаны в статье Трунова А.А. и др. [18].

С точки зрения массового применения и порога вхождения данный подход проигрывает технологиям, которые позволяют проводить позиционирование в помещении без предварительного сканирования.



Рисунок 1 – Пример отображения облака точек в приложении дополненной реальности

Подобный результат достигается путем комбинирования технологии облака точек со специально сгенерированным виртуальным окружением, которое отражает физические ограничения для передвижения, и системой корректировки положения устройства. Таким образом, навигация полностью осуществляется в виртуальном окружении, и мы получаем, например, возможность использования классических алгоритмов поиска кратчайшего пути. Данный подход не требует активного вмешательства в окружающее пространство, использует в работе только камеру и может показывать относительно высокую точность. Единственным ограничением является необходимость создания трехмерной модели помещения вручную. Что предлагается проделать для последующего сравнения точности работы алгоритма на сгенерированной и отрисованной художником картах.

Реализация позиционирования на основе технологии облака точек в ручном режиме

Рассмотрим пример реализации приложения для навигации в закрытом пространстве и рендеринга контента при помощи средств дополненной реальности. В статье Фролова Д.А. [19] приводятся существующие библиотеки дополненной реальности, которые доступны на платформе .NET, в частности, фреймворк AR Foundation [19], который и предлагается использовать для получения облака точек.

В качестве инструмента для разработки был выбран программный комплекс Unity3D [19], он предоставляет широкий спектр возможностей для создания приложений с дополненной и виртуальной реальностью под разные платформы (Windows, IOS, Android). Существенным плюсом разработки на Unity3D является минимальное количество кода, требуемого для функционирования приложения.

Unity3D предоставляет разработчикам AR-приложений кроссплатформенный фреймворк, который предоставляет единый программный интерфейс, объединяющий возможности следующих AR систем: ARCore (для ОС Android), ARKit (для ОС IOS), MagicLeap и HoloLens (для шлемов виртуальной реальности) [19]. Основные возможности AR Foundation описаны в книге Майкла Ланэма [20], среди них:

- отслеживание позиционирования и ориентации девайса в физическом пространстве;
- рейкаст – используется для определения пересечения виртуального контента и объектов реального мира;
- определение поверхностей (стены, стол и т.д.);
- распознавание жестов;
- трекинг 2D и 3D объектов;
- создание виртуальных треугольных сеток, соответствующих физическому пространству, расширяющих возможности по взаимодействию с ним;
- сегментация частей человеческого тела.

Для реализации описанной задачи будут использованы первые 3 пункта, тем не менее в процессе развития мета-пространств остальные возможности также могут активно применяться. Выбор обусловлен тем, что данные технологии покрывают большую часть мобильных устройств, а используемая библиотека может в будущем быть адаптирована под отдельные носимые устройства, такие как шлем смешанной реальности Meta Quest 3 [21], разработчики фреймворка уже анонсировали его поддержку [22].

Трехмерная карта помещения была создана вручную, с использованием программных средств трехмерного моделирования. Далее были созданы тестовые конечные точки навигации, маршрут до которых и будет прокладывать алгоритм поиска путей. Пример расстановки навигационных точек отображен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пример конечных точек навигации

В Unity3D есть встроенная система интеллектуальной навигации в виртуальном пространстве, которая использует NavMesh, или навигационную сетку. Данный подход описан в работе Рональда Аркина [23] и известен в мире уже длительное время. Он применялся в робототехнике с 1980-х годов, где назывался «Луговой картой», но значительной популяризации добился за счёт видеоигр в начале 2000-х годов. Навигационная сетка представляет собой набор двумерных выпуклых полигонов, описывающих доступные для перемещения области среды. Соседние полигоны соединены друг с другом, образуя граф. Поиск пути внутри одного полигона выполняется тривиально по прямой линии, а поиск путей между полигонами выполняется при помощи одного из алгоритмов поиска кратчайшего пути по графу, обычно это алгоритм A* [24]. Представление проходимых областей в виде 2D полигонов упрощают вычисления, которые в противном случае выполнялись бы в трёхмерном окружении. Таким образом исключаются дорогостоящие вычислительные операции для проверок обнаружения столкновений с препятствиями.

В Unity3D для работы с этой системой доступны четыре компонента:

- NavMesh – основной компонент, структуры данных, которая описывает все поверхности виртуального окружения.

- NavMeshAgent – компонент, который закрепляется за объектами, которые должны передвигаться по виртуальному окружению.
- OffMeshLink – компонент, необходимый для создания особых путей в виртуальном окружении, например, подъём по лестнице.
- NavMeshObstacle – компонент, определяющий движущиеся препятствия, которые подвержены физике или могут изменять своё положение другим образом.

После обработки трёхмерного пространства, Unity3D предоставляет нам доступную для навигации область, она показана на рисунке 3.

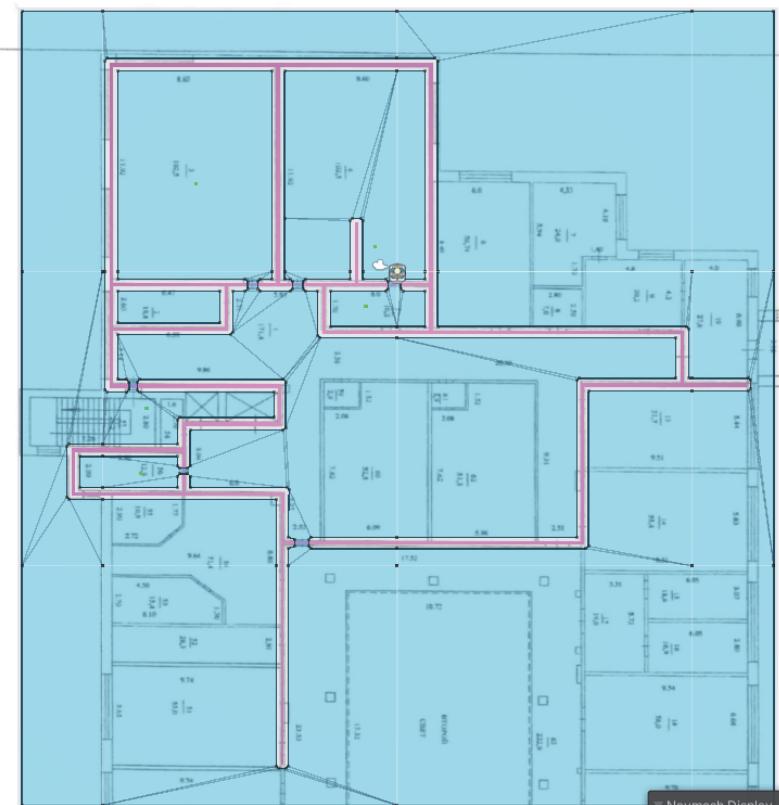


Рисунок 3 – Пример доступной для навигации области (выделена голубым цветом)

Далее, при помощи Unity3D, мы добавляем в полученное трёхмерное пространство, для которого уже создана доступная область для навигации, возможности дополненной реальности, доступные из фреймворка AR Foundation. Можно сказать, что произошло совмещение виртуального трехмерного цифрового двойника с реальным помещением. Смартфон пользователя закреплён за виртуальным агентом, который перемещается по созданному трёхмерному окружению, перемещение агента синхронизируется с перемещением пользователя в реальном помещении при помощи датчиков положения в пространстве и камеры смартфона. Некоторые виртуальные объекты, такие как стены, не отображаются

для пользователя ввиду ненадобности, в то же время, пользователь может видеть маркер навигации, который ведёт его к какой-либо конечной точке. Пример работы созданного приложения приведен на рисунке 4.

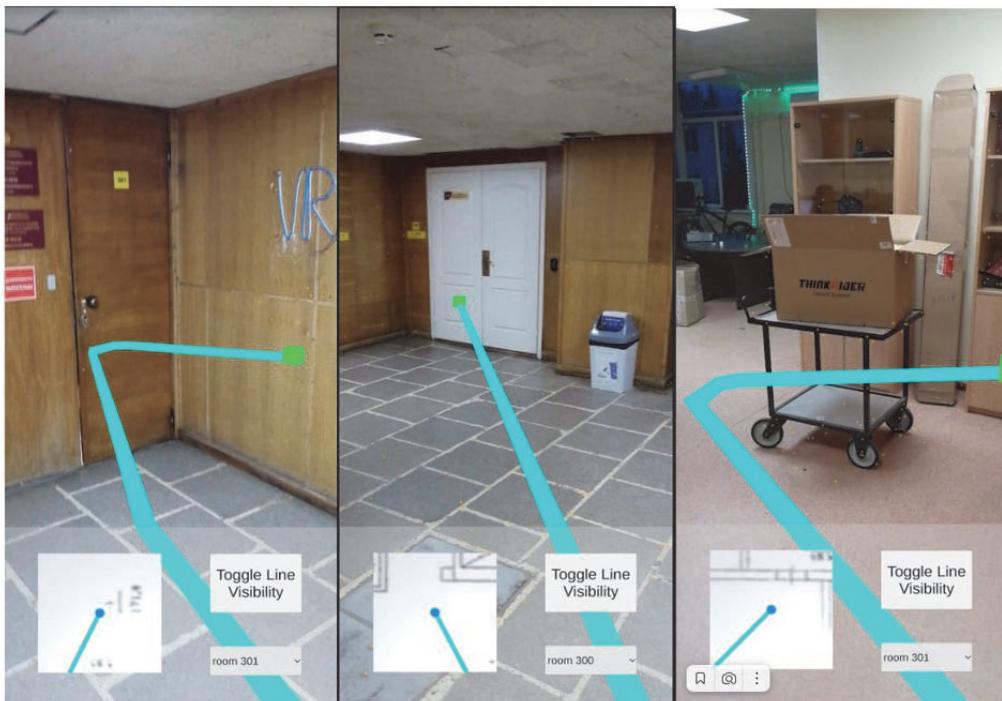


Рисунок 4 – Итоговый результат работы приложения

По итогам разработки были выявлены некоторые проблемы, которые, в основном, относятся к требованиям по техническому оснащению девайса, где запущено приложение:

- для работы фреймворка Ar foundation необходимо устройство, которое поддерживает сервисы расширенной реальности от Google, большинство современных смартфонов и планшетов поддерживает данный функционал;
- для стабильной работы приложения требуется смартфон с достаточно качественным модулем камер и производительной вычислительной системой (при тестировании использовался смартфон Google pixel 3, при работе приложения ощущалась нехватка вычислительной мощности);
- работа приложения в условиях недостаточной освещенности практически невозможна;
- необходим точный перенос реальных размеров в виртуальное пространство, что может быть достигнуто использованием высокоточных обмерных чертежей помещений;

- необходима дополнительная корректировка для сопоставления положения виртуального агента и реального окружения. один из вариантов решения этой проблемы – использование QR-кодов, содержащих определённые метаданные и соответствующие меткам в виртуальном пространстве, например, QR-код может быть размещен на табличке с номером кабинета;
- отображение путей и виртуальных объектов, которые находятся за стенами. необходимо разработать алгоритм отсечения виртуальных объектов, которые перекрываются объектами реального мира.

Алгоритм автоматического создания трехмерной карты помещения на основе плана помещения

Для удовлетворения требований к технологии позиционирования необходимо автоматизировать создание трехмерной карты помещения, для этого предлагается алгоритм, который создает трехмерную модель помещения на основе двумерной схемы помещения.

В качестве тестового окружения был выбран один из этажей Университета «Дубна», его размеры были перенесены на чертёж для дальнейшего использования в Unity3D.

Авторами предлагается следующий алгоритм генерации трехмерной карты помещения:

1. Загрузка двумерного чертежа помещения.
2. Выделение на чертеже стен помещения.
3. Выделение на чертеже окон и дверей.
4. Разметка помещений на чертеже.
5. Объединение объектов стен, построение общего полигона
6. Установка на карте помещения виртуальных объектов.
7. Установка на карте помещения объектов синхронизации.
8. Генерация трехмерных стен из двумерных объектов.
9. Удаление стен и окон из трехмерной модели стен.
10. Формирование полигонального файла карты.
11. Формирование метафайла виртуальных объектов карты помещения.

Входные сигналы алгоритма:

- массив объектов стен, объект состоит из набора двумерных координат;
- массив объектов окон, объект состоит из набора двумерных координат;
- массив объектов дверей, объект состоит из набора двумерных координат;
- массив объектов помещений, объект состоит из набора двумерных координат;

- массив объектов синхронизации, объект состоит из двумерных координат объекта и изображения объекта реального мира (qr код, изображение, вывески, и т.д.);
- массив виртуальных объектов, объект состоит из двумерной координаты объекта, кватерниона направления объекта и идентификатора виртуального объекта;

Выходные сигналы алгоритма:

- трехмерная карта помещения, состоит из набора трехмерных полигонов;
- метафайл с информацией о помещениях, объектов синхронизации положения и виртуальных объектах внутри помещения.

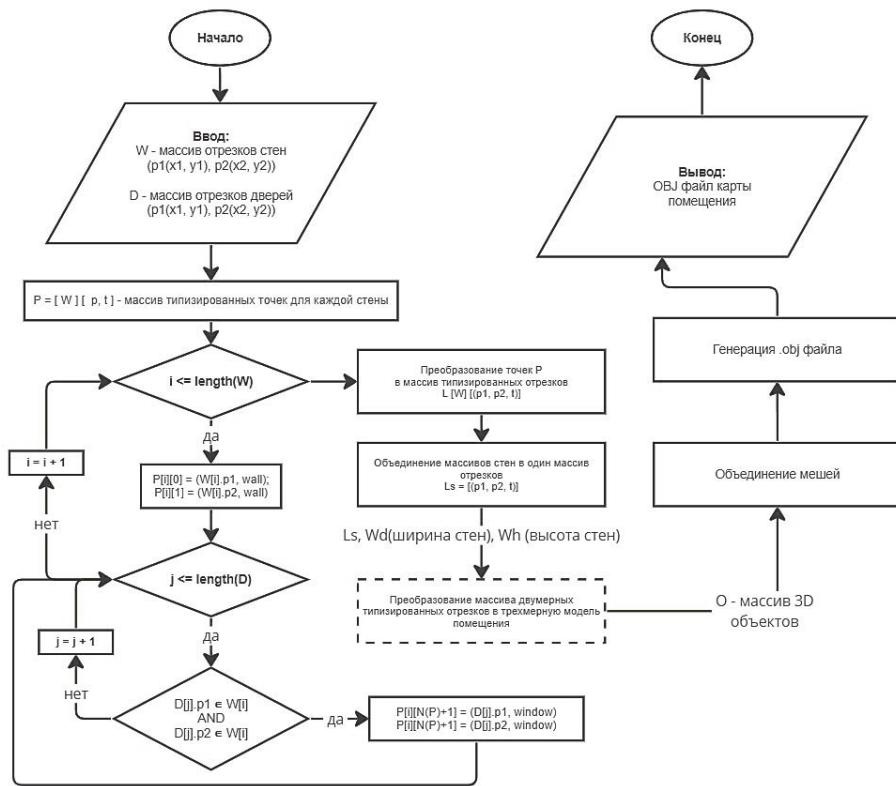


Рисунок 5 – Алгоритм генерации трехмерной карты на основе схемы помещения

На рисунке 5 изображен алгоритм преобразования двумерного чертежа помещения в трехмерную карту. Общий алгоритм состоит из ряда преобразователей и суб-алгоритма, который преобразовывает подготовленные отрезки типизированных стен в набор вершин трехмерных объектов стен. Алгоритм генерации вершин представлен на рисунке 6.

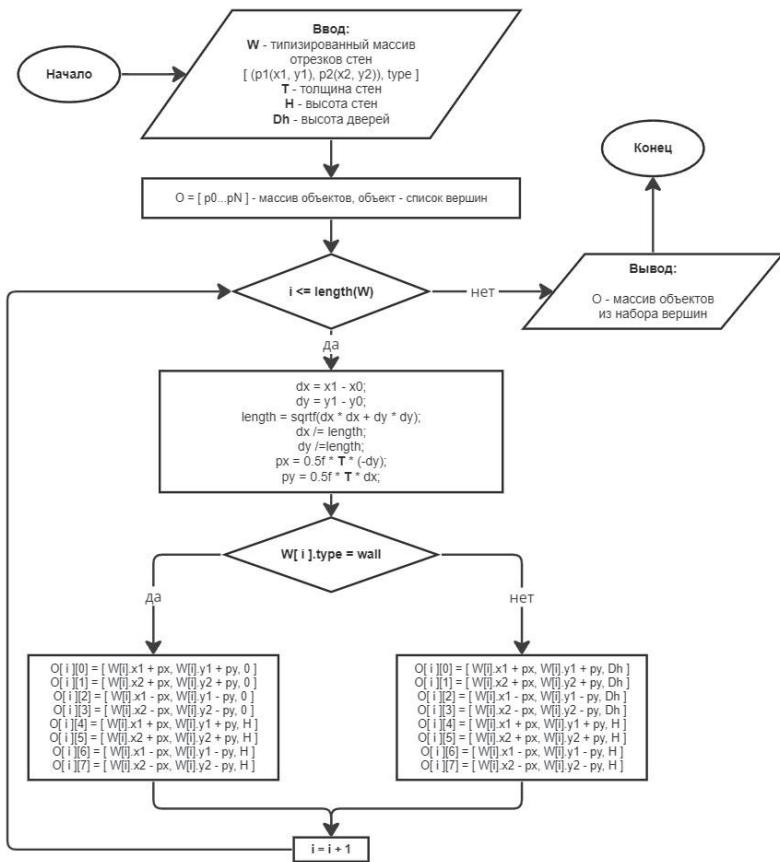


Рисунок 6 – Алгоритм преобразования участка стены в трехмерный объект

По полученному чертежу было создано виртуальное трёхмерное окружение, в котором и будет происходить отображение контента и навигация виртуального агента. Виртуальное трёхмерное окружение представлено на рисунке 7. Виртуальные стены в данном случае служат ограничением для агента, за которые он не сможет попасть, при работе приложения стены получают прозрачные текстуры и не отображаются при рендеринге контента. В данном эксперименте было опущено создание таких препятствий, как столы, стулья, кровати и прочая мебель, однако всё это можно учесть при генерации виртуального окружения по специально размеченному чертежу выставляя высоту для различных препятствий так, чтобы агент понимал, что в состоянии их преодолеть.

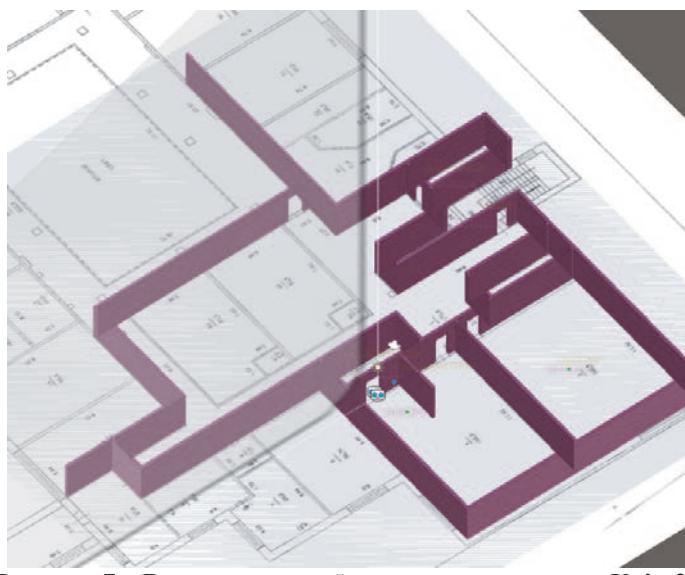


Рисунок 7 – Виртуальное трёхмерное окружение в Unity3D

Сравнение точности работы алгоритма на ручной и сгенерированной карте

Для проверки качества работы полученного алгоритма была выбрана тестовая площадка и созданы трехмерные карты данного помещения вручную и автоматически. Было разработано мобильное приложение для проведения экспериментов (рис. 13) и выработана методика тестирования качества его работы. Далее проводились замеры отклонений для выявления различий в работе алгоритма позиционирования на разных исходных данных о помещении.

Методика тестирования точности позиционирования в дополненной реальности будет включать в себя следующие шаги:

1. Определение и подготовка тестового окружения: выбор подходящего места для проведения тестирования, где есть достаточно свободного пространства и отсутствуют помехи, которые могут значительно повлиять на точность позиционирования. Перенос тестового окружения в формат трехмерной карты вручную и с использованием полученного алгоритма.

2. Установка тестовых точек замеров, расположенных на разном расстоянии друг от друга, на протяжении тестового маршрута. Точки устанавливаются как в реальном пространстве (силами тестировщика), так и в виртуальном (средствами редактора Unity3D).

3. Установка приложения на тестовое устройство и проведение настройки для корректной работы фреймворка AR Foundation.

4. Первый этап тестирования: измерение погрешности позиционирования без каких-либо средств дополнительной корректировки. Для этого в несколько подходов перемещаем устройство с приложением вдоль заранее определённого маршрута. В каждой тестовой точке собираются координаты в вирту-

альном пространстве и данные о реальном положении тестировщика. Такие замеры проводятся для сгенерированного 3D плана помещения и для отрисованного вручную.

5. Оценка результатов – на основе полученных замеров определяем зависимость погрешности точности позиционирования от времени, затраченного на преодоление маршрута для каждого типа исходных данных.

Первым этапом тестирования является выбор окружения для тестирования и его подготовка. Для оценки точности позиционирования и навигации была подготовлена 3D модель коридора третьего этажа Государственного университета «Дубна» (рис. 8). Для этого, в графическом редакторе был нарисован 2D план коридора. Далее данная 2D карта была переведена в полноценную 3D модель с помощью инструмента Autodesk 3Ds Max [25]. После чего производится экспорт данной модели в трехмерный движок Unity3D, выходным результатом этапа является полноценное виртуальное помещение, внутри которого будет осуществляться навигация.

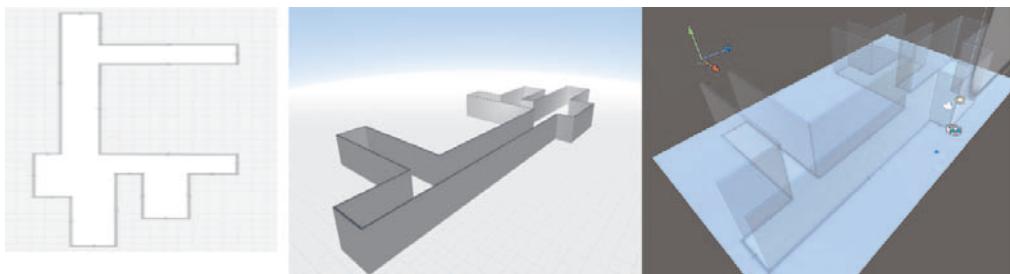


Рисунок 8 – Процесс генерации трехмерной модели помещения

Далее на плане помещения выделяется несколько ключевых точек (рис. 9), в которых будут проводиться замеры. В каждой точке проводится замер координат виртуального 3D пространства и данные о реальном положении человека. Такие замеры будут проводится для сгенерированного 3D плана, и отрисованного вручную. По итогу планируется установить то, насколько сильно растет погрешность определения реального положения от времени в процессе перемещения. В качестве измерительного прибора реального расстояния используется лазерный дальномер Leica DISTO D810 [26].

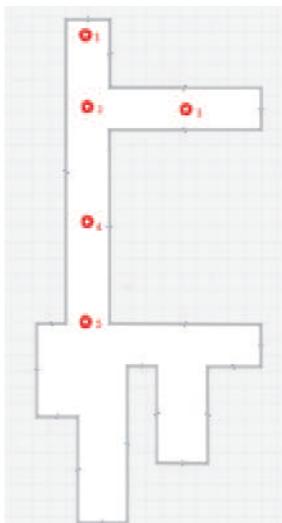


Рисунок 9 – Ключевые точки

В таблице 1 отображены результаты замеров, преобразованные в разницу расстояний между реальным положением пользователя и показаниями системы позиционирования. Замеры проводились последовательно для генерированной карты и созданной вручную, маршрут и устройство не менялись. Задача эксперимента – определить разницу в качестве позиционирования для вручную созданной карты помещения и сгенерированной по описанному алгоритму.

Таблица 1 – Показатели отклонений для автоматически сгенерированной карты и для карты, созданной вручную

Номер точки замера положения	Отклонение от автоматически сгенерированной карты (см)	Отклонение от созданной вручную карты (см)
1	20	21
2	23	24
3	20	45
4	50	31
5	25	23
4	47	35
3	40	44
2	69	65
1	70	72

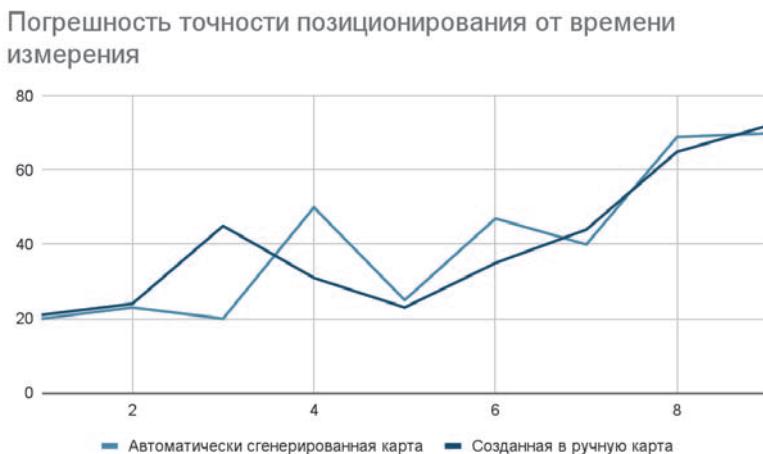


Рисунок 10 – График зависимости погрешности точности позиционирования от времени

На рисунке 10 видно, что погрешность определения положение пользователя растет со временем. Тем не менее, оба образца трехмерной карты выдают схожую точность, что говорит о возможности замены вручную отрисованных карт сгенерированными автоматически без существенных потерь в точности работы.

Разметка мета-пространства на основе карты помещения

Для создания мета-пространств внутри помещений был разработан редактор, в котором можно разметить стены, окна, двери. После чего на карте устанавливаются реперные объекты двух видов – QR-коды и изображения. Разделение необходимо, ввиду лучшей точности позиционирования с использованием кодов. Тем не менее, в качестве реперных точек могут выступать: обычные изображения – плакаты, баннеры, картины и другие реальные объекты не требуют размещения дополнительных объектов.

Также, в редакторе выставляются точки переходов, объекты в зоне действия которых выход за пределы размеченной карты определяется как переход в другое виртуальное пространство или выход из сети. Переход осуществляется переключением на другой файл помещения. Пример редактора виртуального пространства и полученный объект разметки отображены на рисунке 11.

Виртуальные объекты расставляются в помещении по двум технологиям: Location Based и Marker Based [27]. В случае первой задаются координаты объекта, во втором случае соответствующий объект реального мира (QR-код либо изображение). Сам объект в разметке помещения не содержится. Сцена хранится в отдельном файле типа «XRweb», который содержит HTML подобную разметку виртуального пространства и интерпретируется XR браузером.

Редактор проводит генерацию объекта помещения, OBJ файла с трехмерной картой помещения, приводит изображения реперных точек под требования

алгоритмов трекинга и распознавания. Ввиду того, что внутри помещения нет необходимости размещения общих объектов и только одно лицо является источником содержимого сети – нет и необходимости в механизме общедоступного размещения объектов. В случае такой необходимости владелец помещения может создавать отраслевые решения для кооперативного редактирования объекта помещения. За пределами помещений – будет работать общая система размещения объектов, посредством сервера маршрутизации объектов расширенной реальности.

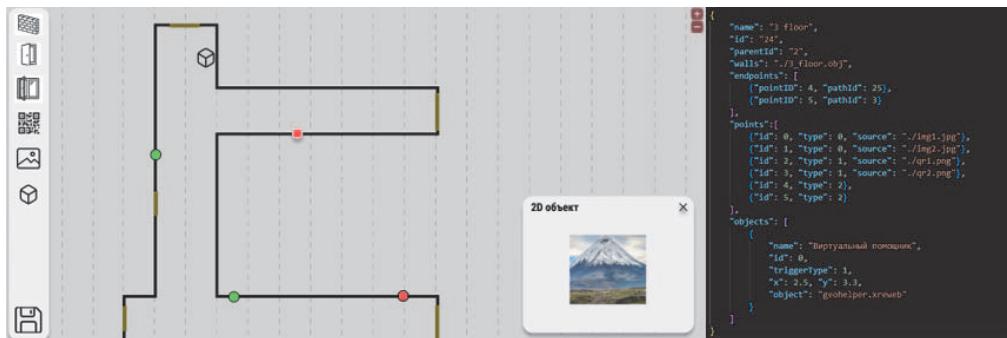


Рисунок 11 – Редактор помещения и полученный файл внутреннего XR пространства

Уменьшение погрешности позиционирования за счет уточняющих объектов

После внесения на карту помещения дополнительных объектов, точные координаты которых известны они могут быть использованы для уточнения позиции пользователя, там самым избегая накопления ошибки в процессе позиционирования. В данном случае для уточнения позиции будут использоваться QR-коды, размещенные на стенах помещения. Тем не менее, в качестве объектов уточнения могут выступать плакаты, картины, указатели, некоторые трехмерные объекты. Для замеров используется тоже помещение и те же трехмерные карты, которые были описаны ранее (рис. 8).

Таблица 2 – Показатели отклонений для автоматически сгенерированной карты и для карты, созданной вручную при использовании дополнительной корректировки положения пользователя

Номер точки замера положения	Отклонение от автоматически сгенерированной карты (см)	Отклонение от созданной вручную карты (см)
1	41	39
2	42	42
3	40	44

Номер точки замера положения	Отклонение от автоматически сгенерированной карты (см)	Отклонение от созданной вручную карты (см)
4 (QR-код)	44	42
5	36	38
6(QR-код)	44	42
3	32	37
2	42	41
1	45	44

Погрешность точности позиционирования от времени измерения

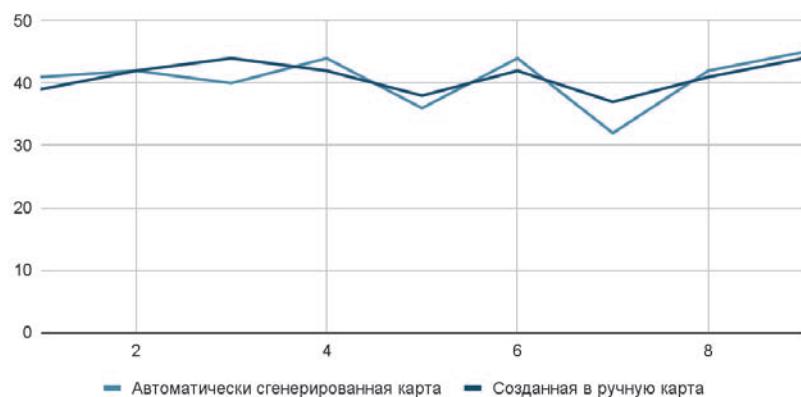


Рисунок 12 – График зависимости погрешности точности позиционирования от времени при использовании корректировки местоположения с помощью QR-кодов

На рисунке 12 видно, что точки замеров в зоне видимости которых находились уточняющие объекты снижают погрешность позиционирования, по сути, обнуляя погрешность. Размещение достаточного количества подобных объектов в помещении мета-пространства позволит эффективно поддерживать определенную точность определения местоположения пользователя и как следствие, относительно точно отображать виртуальные объекты, не имеющие трекингового объекта. На рисунке 13 отображено приложение, которое использовалось для замеров. Помимо навигации и вывода точек маршрута был реализован вывод расстояния до точек маршрута, что использовалось в расчетах.



Рисунок 13 – Пример работы приложения

На основании полученных результатов, можно сделать вывод о том, что ручное и автоматическое создание 3D модели помещения не оказывает существенного влияния на точность. Падение точности определения местоположения пользователя в дополненной реальности со временем также связано с накоплением ошибок как датчиков устройства, так и программного обеспечения. Кроме того, влияние внешних помех, таких как изменение освещённости помещения, может также сказываться на точности определения местоположения пользователя в дополненной реальности. Добавление QR-кода на маршруте движения позволяет повысить общую точность и не дает достигнуть критических погрешностей.

Заключение

Объем современного информационного потока, с которым сталкивается человек в повседневной жизни требует принципиально новых способов человека-машинного взаимодействия. Мета-пространства, привязанные к реальному миру, позволяют значительно упростить способы обмена некоторой информацией. Для реализации подобной системы внутри помещений, не имея доступа к сигналу спутниковой навигации, необходима технология сопоставления реального и мета-пространств. Существующие технологии позиционирования имеют различную природу, но в большинстве своем требуют предварительной подготовки перед внедрением. Предложенная в статье технология позволяет создавать мета-пространства на основе облака точек обычной камеры, имея только схему помещения. Предложен алгоритм генерации трехмерной навигационной карты помещения. Новизна предлагаемой технологии навигации состоит в отсутствии необходимости предварительного трехмерного сканирования либо отрисовки помещения. Экспериментально продемонстрировано отсутствие принципиальной

разницы в качестве позиционирования при использовании автоматически сгенерированной карты по отношению к созданной вручную. Погрешность позиционирования метода позволяет как реализовывать навигационные алгоритмы, так и отображать без-маркерные объекты. Дальнейшее развитие предложенного метода требует повышения точности, стабилизации во время использования и автоматизации процесса создания разметки мета-пространства. Предложенный инструмент разметки мета-пространств позволяет быстро и емко формализовать мета-пространства отдельных помещений, что является заделом для создания механизмов бесшовного перехода между различными мета и суб-мета пространствами.

Литература

1. Дорохин В.А., Теряев Л.Н., Зорин Р.А. Технологии расширенной реальности и перспективы их глобального применения в рамках концепции пространственно-ориентированного XR-интернета // Современные информационные технологии и ИТ-образование [S.I.]. Т. 19(2).
2. Хоффманн А., Маттила С. Патент № 2470485. Российская Федерация. МПК H04W 4/02. Способ и устройство для предоставления службы, основанной на местоположении: № 2010142364/07: 2012. С. 2.
3. Дополненная реальность в музеях: выход на новый уровень взаимодействия и вовлеченности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.arway.ai/post/augmented-reality-in-museums-reach-new-levels-of-interaction-and-engagement> (дата обращения: 15.12.2023).
4. Андри, Чайрил и Алькаваз, Мохаммед и Саллоу Амира. Внедрение мобильной дополненной реальности в качестве приложения для экскурсий по кампусу // Международный журнал инженерии и технологий (ОАЭ). 2018. С. 13.
5. Аникин А.Е., Ядута А.З., Гурьянова И.В. Решение проблемы навигации внутри помещений с помощью современных вычислительных систем // Высокие технологии и инновации в науке: сборник избранных статей Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 27 ноября 2020 года. Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ». 2020. С. 131-134.
6. Монгуш А.В., Кикин П.М. Обзор технологий indoor-навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. С. 119-123.
7. Фальков Е.В., Романов А.Ю. Применение маячков Beacon и технологии Bluetooth Low Energy для построения систем навигации в зданиях // № 18. 2015. С. 62-65.
8. Evennou F., Marx F. Advanced integration of Wi-Fi and Inertial Navigation Systems for Indoor Mobile Positioning // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. 2006. С. 1-11.
9. Ismail M.I.A., Nikulin V.V. NAVIGATION inside buildings (USING WI-FI points) // XLIV Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 частях, Саранск, 08-15 декабря 2015 года. Ответственный за выпуск П.В. Сенин.

- Vol. Часть 1 // Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва. 2016. С. 327-331.
10. Гуторова В.В., Дыдочкина А.А. Краткий анализ магнитных аномалий и их перспективы использования в области геомагнитного позиционирования // Молодежь и научно-технический прогресс: сборник докладов VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х томах, Старый оскол, 10 апреля 2014 года. Том 1 // Старый оскол: Общество с ограниченной ответственностью «Ассистент плюс». 2014. С. 315-319.
11. Shyam S., Juliet S. and Ezra K. Indoor Positioning Systems: A Blessing for Seamless Object Identification, Monitoring, and Tracking // Front. Public Health. 2022. C. 45-47.
12. Huang J.; Junginger S.; Liu H.; Thurow K. Indoor Positioning Systems of Mobile Robots: A Review. Robotics 2023, 12, 47 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/robotics12020047> (дата обращения: 24.11.2023).
13. Новиков П.А., Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л. Комплекс программ для навигации мобильных устройств внутри помещений с помощью нейронных сетей // Информационно-управляющие системы. 2016. С. 32-39.
14. El-Sheimy, N., Li, Y. Indoor navigation: state of the art and future trends. Satell Navig. 2021. С. 2-7.
15. Абдрахманова А.М. Использование двумерных штрихкодов для создания системы позиционирования и навигации в помещении // Прикладная информатика. 2013. С. 031-039.
16. Молородов Ю.И., Слепцов Е.А. Технологии смешанной реальности для пространственной модели Ботанического сада // Информационные технологии, системы и приборы в АПК. АГРОИНФО-2021: Материалы 8-й Международной научно-практической конференции, р.п. Краснообск, 21-22 октября 2021 года // Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук. 2021. С. 87-92.
17. Чибуничев А.Г. Фотограмметрия // Учебник для вузов – Москва: Московский государственный университет геодезии и картографии. 2022. С. 328.
18. Трунов А.А., Ульянова, Агаев Я. Инструменты разработки мобильных приложений с использованием технологий дополненной реальности // Информационные технологии в образовании. 2022. С. 243-247.
19. Фролов Д.А. Библиотеки дополненной реальности для платформы .NET // Решетневские чтения: Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 09-11 ноября 2022 года. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том Часть 2 // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева». 2022. С. 371-373.
20. Micheal Lanham Learn ARCore // Fundamentals of Google ARCore под. ред. Amarabha Banerjee. 2018. С. 32.

21. Meta Quest 3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.meta.com/quest/quest-3/> (дата обращения: 29.11.2023).
22. Get started developing mixed reality for Meta Quest 3 with Unity [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.unity.com/engine-platform/get-started-developing-for-quest-3-with-unity> (дата обращения: 13.12.2023).
23. Arkin R. «Path Planning for a Vision-based Mobile Robot», Mobile Robots, SPIE Proc. Vol. 757. 1986 // Also COINS Technical Report, Dept. of Computer and Information Science, Univ. of Mass. 1986. C. 48-86.
24. Brand S. Efficient obstacle avoidance using autonomously generated navigation meshes // Master's thesis, Delft University of Technology. 2009. C. 25-32.
25. Autodesk 3ds Max: Create massive worlds and high-quality designs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/3ds-max> (дата обращения: 21.10.2023).
26. Leica DISTO D810 touch [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://shop.leica-geosystems.com/global/measurement-tools/disto/leica-disto-d810-touch> (дата обращения: 02.10.2023).
27. Types of AR [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://digitalpromise.org/initiative/360-story-lab/360-production-guide/investigate/augmented-reality/getting-started-with-ar/types-of-ar/> (дата обращения: 17.11.2023).

УДК 004.05

Анализ структурированных кабельных систем в системной точке бифуркации. Системные вопросы

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук, профессор,

Национальный исследовательский университет

Московский государственный строительный университет

(НИУ МГСУ), г. Москва,

Владимир Михайлович Арtyушенко, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой информационных технологий и управляющих систем,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,

летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В рамках системного подхода проводится анализ основных современных технологических тенденций развития классических структурированных кабельных систем. Показана неизбежность их изменений как сложной технической системы и указаны наиболее значимые среди них.

Структурированные кабельные системы, технологическое совершенствование, скорость передачи, рабочий частотные диапазон, специализированные структурированные кабельные системы.

Analysis of modern technological trends in the development of classical structured cabling systems. Systemic issues

Andrey Borisovich Semenov, Doctor of Technical Sciences, professor,

National Research University Moscow State University of Civil Engineering

(NRU MGSU), Moscow,

Vladimir Mikhailovich Artyushenko, doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Information Technologies and Control Systems,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,

pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Within the framework of a systematic approach, the analysis of the main modern technological trends in the development of classical structured cabling systems is carried out. The inevitability of their changes as a complex technical system is shown and the most significant among them are indicated.

Structured cabling systems, technological improvement, transmission speed, operating frequency range, specialized structured cabling systems.

Введение. На современном объекте промышленного и гражданского строительства, на котором постоянно или длительное время находятся люди, наряду с освещением, кондиционированием, вентиляцией и прочими традиционными инженерными системами в реалиях сегодняшнего дня создается информационно-телекоммуникационная система (ИТС). Последняя предназначена для удовлетворения потребностей пользователей в услугах электросвязи и обеспечивает им доступ к различным видам электронных информационных ресурсов. Сама ИТС в абсолютном большинстве случаев строится согласно проверенной временем иерархической модели OSI взаимодействия открытых систем и модели TCP/IP как ее развития, а ее физический уровень реализуется в форме структурированной кабельной системы (СКС).

Под СКС понимают информационную кабельную систему, которая инсталлируется на территории заказчика и обеспечивает передачу любых слаботочных сигналов в пределах обслуживаемой ею области [2, 10]. В зависимости от типа объекта недвижимости СКС организуется в жилых, офисных зданиях, центрах обработки данных (ЦОД), учебных и лечебных заведениях и на промышленных предприятиях.

СКС даже среднего масштаба насчитывает в своем составе несколько тысяч компонентов и поэтому представляет собой типичную сложную техническую систему [1]. В процессе описания, анализа, и оптимизации по различным критериям создается соответствующая математическая модель, обычно сводимая к различным уравнениям или, чаще, к их системам. Результаты решения могут быть использованы в качестве исходных данных для CAD-систем автоматизированного проектирования и вводятся в BIM-модель объекта недвижимости [3]. Из-за большой размерности задачи точное решение даже в случае малой СКС затруднено [14], а на объектах среднего масштаба фактически невозможно или, как минимум, просто нецелесообразно при имеющихся вычислительных ресурсах и их стоимости.

С другой стороны, СКС является достаточно дорогостоящим компонентом ИТС в части капитальных затрат, а ее экономическая привлекательность для широкого круга заказчиков определяется предельно низкими эксплуатационными расходами.

Пара указанных обстоятельств практически исключает возможность замены информационной проводки в процессе эксплуатации, в т.ч. по причине морального устаревания. Значение этого фактора растет с учетом того, что средний срок эксплуатации офисного здания с начала 90-х гг. прошлого столетия вырос с 7 лет до примерно 17 лет (по данным компании Siemon).

При таких начальных условиях существенное значение приобретает правильное задание тех исходных посылок, которые определяют общую структуру системы и конкретное исполнение отдельных ее укрупненных составных частей. С учетом длительного срока эксплуатации СКС как необходимого условия ее экономической привлекательности для широкого круга заказчиков это приводит к росту значения прогнозной составляющей проекта на системной уровне в условиях тех существенных изменений, которые явно обозначились в последнее время СКС как в техническом направлении.

Причина возникновения системной бифуркации структурированной кабельной системы. По определению точкой бифуркации понимают критическое состояние системы в кризисных ситуациях, при котором она становится неустойчивой относительно флуктуаций [6]. В результате этого возникает неопределенность с последующим переходом по одной из возможных веток атракции на новый, более дифференцированный и высокий уровень упорядоченности. Данное положение справедливо, однако, только в случае изначально правильно-го исполнения проекта.

В общем случае допускается также хаотическое состояние системы. По физическому смыслу этот вариант развития в дальнейшем не рассматривается, так как означает создание исключительной информационной проводки с ее известными недостатками. Таким образом, он гарантированно будет отвергнут широким кругом пользователей и в дальнейшем не рассматривается.

Возникновение точки бифуркации определяется практически полным исчерпанием к середине второго десятилетия текущего века потенциала той исходной бизнес-идеи, которая была заложена в СКС. На уровне постулатов в нее было заложено формирование на объекте недвижимости универсальной и избыточной по ряду ключевых характеристик кабельной системы с близкими к нулю рисками морального устаревания в интервале времени ожидаемого межремон-тного срока службы объекта недвижимости. Иначе говоря, реализовывалась стратегия «Построил и забыл». В схематической форме сложившееся положение дел иллюстрирует рисунок 1.

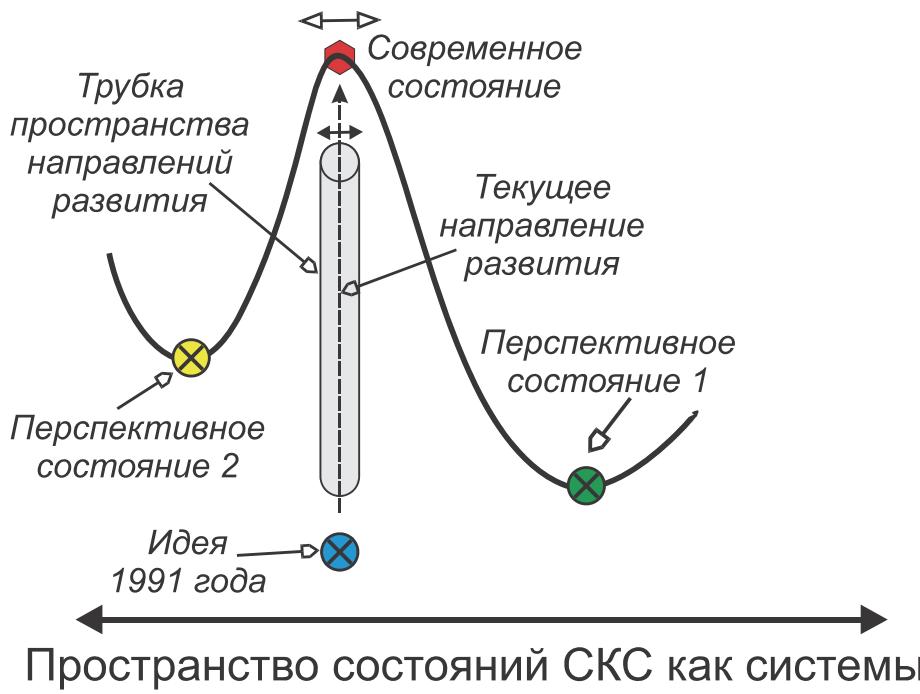


Рисунок 1 – Пространство состояний структурированной проводки на текущем этапе развития

Именно изначальная избыточность СКС на фоне кратного роста затрат на ее реализацию из-за увеличения капитальных затрат, вызванных ростом цен на медь и нефть как основных сырьевых материалов резко снизили экономическую привлекательность структурированной проводки как средства реализации физического уровня ИТС. Стремление к преодолению этого недостатка примерно с середины второго десятилетия текущего века привело к выдвижению большого количества различных предложений. Их полную совокупность можно разбить на три основные группы: простое совершенствование проводки, ускорение вертикальной интеграции с оборудованием более высокого уровня и горизонтальной интеграции с различными вспомогательными компонентами инженерной инфраструктуры, рисунок 2.



Рисунок 2 – Основные направления системного совершенствования СКС

Мероприятия по ее восстановлению, дополняемые предложениями по устранению некоторых неизбежных начальных технических недостатков, которые зачастую противоречат друг другу, привели СКС в состояние некоторой системной неустойчивости.

Заметим, что по физическому смыслу любое изменение системного плана будет воспринято массовой практикой реализации информационных кабельных систем только в том случае, если

а) даст значимый результирующий эффект системного плана, в качестве численной меры которого обычно используют приведенные затраты (стоимость владения) при заданном уровне технических характеристик, формализуемых отнесением системы к определенному классу;

б) заявленный эффект будет достаточно устойчивым даже при значительных вариациях исходных параметров, что в схематической форме иллюстрирует рисунок 3.

Дополнительно необходимо отсутствие значимого сопротивления внедрению нововведений ведущих игроков рынка. Последнее нередко возникает зачастую из обоснованных страхов появления существенных финансовых потерь или соображений захвата новой части рынка.

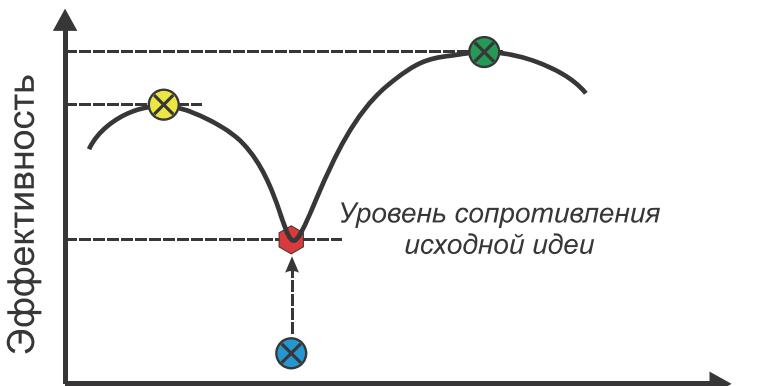


Рисунок 3 – График развития СКС в пространстве состояний и ее обобщенная эффективность

В качестве примера такого сопротивления можно сослаться на оптический дуплексный разъем LC, применение которого нормировано стандартами с 2000 года [11, 19]. По комплексу своих параметров LC значительно уступает своим функциональными аналогам: MU (Япония), F-3000 (Европа) и LX.5 (США), но был нормирован в качестве безальтернативного стандартного в оптической подсистеме СКС благодаря серьезным лоббистским возможностям компании AT&T.

Необходимость нового отечественного стандарта и принципы формирования его терминологии. Необходимость разработки нового отечественного стандарта обусловлена тем, что:

- СКС является крупным самостоятельным направлением кабельной техники;
- наиболее популярный в отрасли международный стандарт ISO/IEC 11801 действует на территории России не более чем формально и как любой документ международного уровня не учитывает национальной специфики;
- известные попытки создания нормативных документов, в т.ч. уровня ГОСТ Р имеют ряд серьёзных недостатков [8].

Собственно, создание нормативной и справочной частей нового документа проблем не вызывает: за основу берется ISO/IEC 11801:2017, в который вносятся незначительны изменения непринципиального характера. Сложности появляются при выборе подходящей терминологии. Необходимость ее введения обусловлена тем, что деятельность в области СКС как в самостоятельном направлении занимается большое количество специалистов, а само направление находится в точке бифуркации, что резко усиливает остроту вопроса одинакового понимания происходящих процессов. Кроме того, к подготовке специалистов активно подключились технические университеты и колледжи, что потребовало подготовки соответствующих учебников и пособий различного назначения.

В настоящее время вопрос терминологии СКС не урегулирован на нормативном уровне. В результате общение специалистов зачастую происходит на некотором «СКС-ном суржике» из-за того, что:

- обозначения отдельных компонентов и собранных на их основе комплексных объектов сложились стихийно как смесь из существовавших ранее определений, заимствований из смежных областей, калек и зачастую вольных трактований англоязычных терминов, в результате чего оказываются не всегда удачными, в т. ч. с системной точки зрения;
- некоторые параметры и эффекты, важные при построении СКС, не описываются существующей терминологией;
- в целом корректная и достаточно удачная терминология ГОСТ Р 54429, который ориентирован в первую очередь на кабельные заводы, в ряде случаев не соответствует потребностям СКС как самостоятельного технического направления под углом зрения практики создания и последующей эксплуатации проводки

Раздел «Термины и определения» проекта нового стандарта разработан практически с нуля. Часть определений из международного прототипа исключены как устаревшие и неактуальные, область действия некоторых скорректирована и т.д. В процессе выполнения этой работы использовался ряд принципов, классификация которых представлена на диаграмме рисунка 4.

Отдельно укажем на то, что особое внимание уделялось приближению к реальной практике построения и монтажа СКС, которые настоятельно требуют краткости. Неизбежно вызываемая этим возможность определенного расширенного толкования устраивалась через подробное определение конкретного термина.



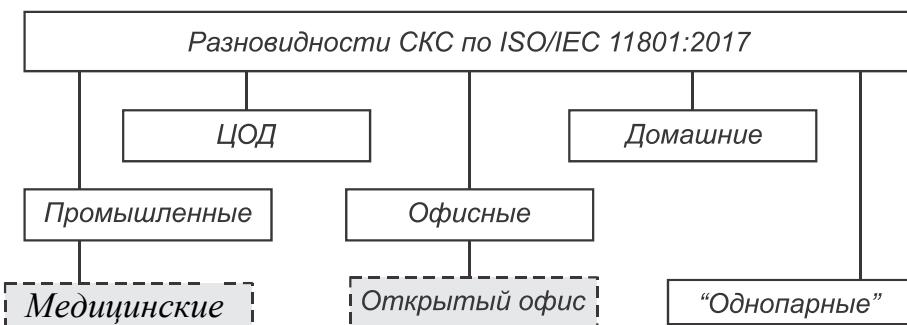
Рисунок 4 – Принципы формирования терминов нового стандарта

Специализация СКС по областям применения. Одной из причин падения системной эффективности СКС в исходной форме ее реализации стал тот уровень универсальности, который был заложен в неё изначально. Очевидным направлением исправления сложившейся ситуации стало разделение кабельных

систем по областям использования и их специализация.

Впервые вопрос о специализации СКС с целью максимально полного учета особенностей конкретных областей использования был поднят в середине нулевых [16]. Универсальность сохранялась только на уровнях максимально полного использования общей элементной базы. Такой подход, наряду со снижением издержек, был выгоден тем, что давал также возможность «бесшовной»стыковки информационной проводки, созданной в различных частях объекта недвижимости.

Сильная сторона имеющейся системы стандартизации заключается в том, что перечень различных СКС является открытым и при необходимости может быть расширен (см. рисунок 5).



Так, например, в отдельную разновидность СКС иногда выделяют кабельные системы для открытого офиса, для которых характерно массовое применение консолидационных точек [7]. Дополнительно укажем на то, что реализация последних в активном варианте фактически открывает перспективное направление системной оптимизации нижнего уровня ИТС с явно выраженным результирующим эффектом [15].

Из аналогичных соображений целесообразно рассматривать СКС лечебных учреждений как отдельный самостоятельный подкласс промышленных СКС. В данном случае объединяющим фактором становятся, хоть и существенно различные, но предельно жесткие, в ряде случаев, условия эксплуатации.

Приведенные два примера указывают на то, что на текущем этапе появляется не только общая специализация СКС, но и четко обозначилась ее внутригрупповая составляющая.

Целесообразность специализации как средства наращивания системной эффективности структурированной проводки дополнительность подчеркивается разработкой отдельных стандартов. Они концентрированно отражают опыт, накопленный отраслью, и нормируют характеристики СКС применительно к объектам недвижимости определенной группы.

Частичный или полный отказ от классических принципов. Базовые постулаты СКС как системы были выработаны в конкретных экономических ус-

ловиях середины-конца 80-х гг. прошлого века, которые радикально изменились за прошедшие три с половиной десятилетия. Отсюда появляется целесообразность целенаправленного восстановления исходной технико-экономической привлекательности СКС не только через адаптацию к конкретным областям. Значимый эффект в этом направлении может дать частичный отказ от базовых принципов в рамках эволюционного развития или же революционного перехода через обращение к полностью новому подходу. В последнем случае все равно предполагается некоторая унификация на основе максимально полного использования ранее созданной элементной базы.

Направление развития техники структурированного кабелирования, в основу которой положен более или менее глубокий отказ от базовых принципов, реализуется через специализацию. Таковая как средство достижения поставленной цели дополнительно делится на

- вынужденную (сверхвысокие скорости передачи);
- технологическую (длинный Ethernet);
- структурно-компонентную (однопарный Ethernet).

При таких условиях сохранение универсальности как главного «конька» СКС возможна в части

- более или менее глубокого сохранения принципов построения проводки (ЦОД, длинный и однопарный Ethernet);
- исключительно на уровне применяемой элементной базы (системы PoLAN).

Вынужденная специализация характерна для ЦОД с его сверхвысокими скоростями передачи. Внешне это проявляется в массовом применении параллельной оптики, использовании модульно-кассетной коммутационной техники, доработанной с учетом специфики области использования [12], нормировании только двухконтакторных трактов, задании максимально допустимой протяженности тракта с опорой на конкретное приложение и категорию волокна (см. рисунок 6).

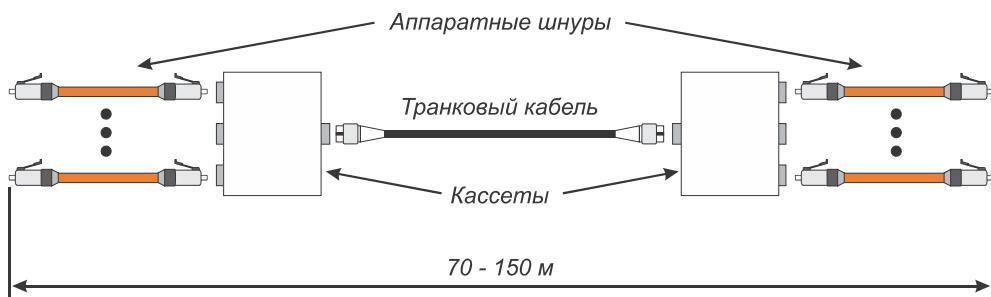


Рисунок 6 – Модульно-кассетный кабельный тракт

Исключительная схема наращивания эффективности получила наибольшее развитие в технологии PoLAN, которая основана на адаптации на уровень внутри объектовых ИТС технических решений, отработанных при построении

сетей доступа [4, 9]. Поставленная цель в данном случае достигается применением полноценного комплекса из активного и пассивного оборудования, причем последнее, за исключением сплиттера, полностью заимствуется из СКС, рисунок 7. Немаловажное значение приобретает также то, что технология PoLAN может быть внедрена в ранее построенные ИТС методом наложения на имеющуюся СКС [17].

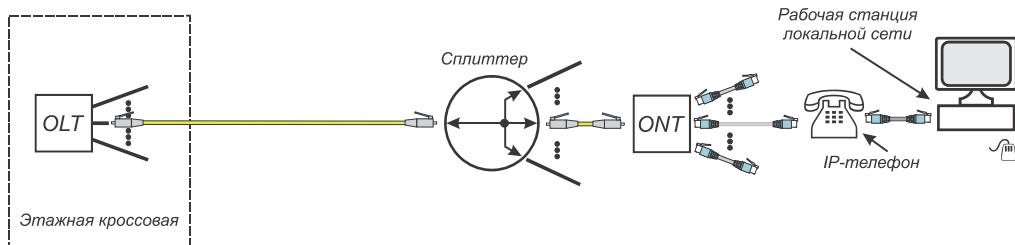


Рисунок 7 – Реализация нижнего уровня внутриобъектовой ИТС на основе технологии PoLAN

Дробление поддерживаемых скоростей передачи. Дробление скоростей передачи вместо привычного для технологии Ethernet 10-кратного увеличения темпа передачи при переходе к аппаратуре следующей ступени иерархии применяется как средство более точного согласования параметров сетевых интерфейсов и скоростных возможностей кабельных линий и трактов. Задействуется как в медножильной, так и в волоконно-оптической подсистеме.

Возможности данного технологического приема усиливаются его применением в комбинации с уменьшением предельной протяженности кабельных трактов. Это позволяет компенсировать отрицательное воздействие расширенного рабочего частотного диапазона на качество передачи информации.

На уровне электропроводных линий дробление задействуется сразу в двухскоростных поддиапазонах, но с различной целью:

- в диапазоне 1-10 Гбит/с – для поддержки точек Wi-Fi беспроводного доступа;
- в диапазоне 25-40 Гбит/с – для увеличения скорости передачи в офисах нового поколения (европейский подход).

В волоконно-оптической подсистеме необходимость дробления скоростей определяется ограниченными тактовыми частотами современной электроники. Целесообразность применения этого приема проявляется как некоторое замедление темпов роста скоростей передачи данных в информационной системе машинного зала ЦОД, что хорошо иллюстрирует рисунок 8.

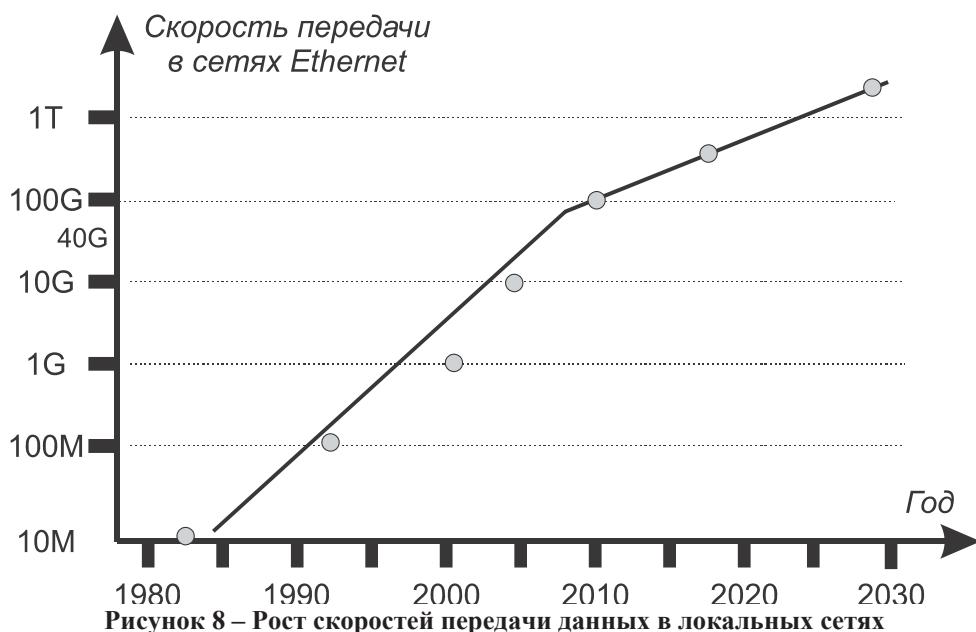


Рисунок 8 – Рост скоростей передачи данных в локальных сетях

Дробление скорости в сочетании с ограничением предельной протяженности линии выгодно тем, что позволяет перейти к офисам следующего поколения в части обеспечиваемой для пользователя скорости доступа к ресурсам ИТС. Данный эффект достигается за счет сокращения общей площади офисного пространства, обслуживаемого этажной кроссовой, примерно на треть. В результате максимальная длина линии сокращается до 50 м, т.е. на всей площади офиса достигается скорость 25 Гбит/с, а на 50% – скорость 40 Гбит/с. (см. рисунок 9). Немаловажное значение имеет то, что скорости 25 и 40 Гбит/с уже нормированы международным стандартом ISO/IEC 11801:2017 [20].

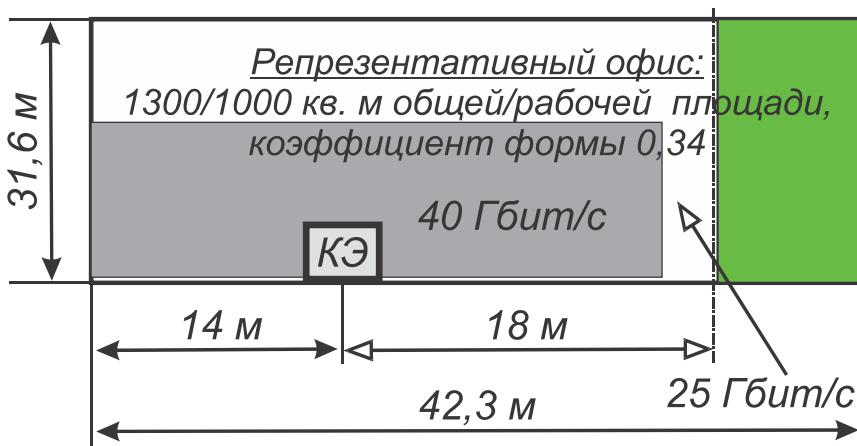


Рисунок 9 – Структура скоростного покрытия площади офисного пространства при реализации в нем СКС категории 8, где КЭ – кроссовая этажа

Расширение рабочего частотного диапазона. Наибольшая рабочая частота кабелей из витых пар составляет 2 ГГц, что соответствует технике категории 8 [13, 18]. Дальнейшее расширение рабочего частотного диапазона ограничено двумя нежелательными фундаментальными эффектами (рисунок 10):

- неизбежный рост затухания из-за поверхностного эффекта, эффекта близости и потерь в диэлектрике;
- рост рисков перехода витой пары как открытой направляющей системы электромагнитных колебаний в излучательный режим, что вызывает дополнительный значимый рост потерь.

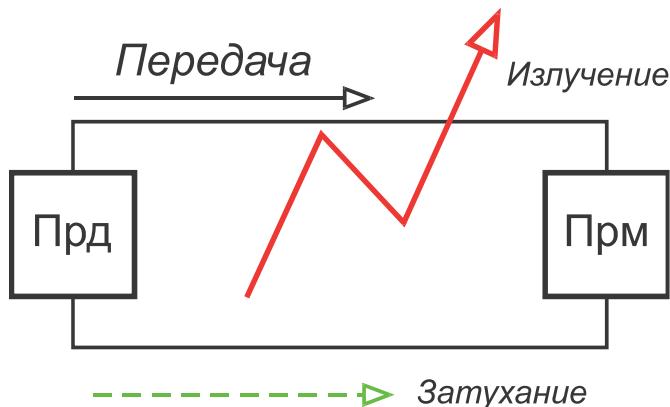


Рисунок 10 – Схема возникновения нежелательных фундаментальных эффектов с ростом частоты при передаче по витой паре

Известно [5], что критическая частота неэкранированной витой пары, при которой она переходит в излучательный режим, составляет $f_0 = c/\tau$, где c – скорость света, а τ – расстоянием между осями проводников витых пар. Для конструкций кабелей СКС высоких категорий для них $\tau = 1,5$ мм этот параметр составляет 150 ГГц. Верхнюю граничную частоту, при которой еще возможна нормальная передача, можно оценить, как 1/6 от критической и равной 25 ГГц.

Таким образом, для кабелей из витых пар имеется определенный запас в части расширения рабочего частотного диапазона, например, до 5-6 ГГц. Его полноценное использование затруднено резким ростом затухания и связанным с этим ограничением по дальности связи. Тем не менее, он может быть направлен на создание пассивных DAC-кабелей максимальной длиной до нескольких метров. Они выгодны тем, что позволяют решить задачу прямого соединения высокоскоростного сетевого оборудования в пределах одного технического помещения с несколько меньшей задержкой по сравнению с передачей через классические интерфейсы Ethernet.

Формально DAC-кабели не входят в состав СКС, не описываются действующими и не упоминаются перспективными редакциями стандартов СКС. Однако, при необходимости могут быть включены в компонентный состав СКС как

аналог Е2Е-тракта, отличаясь от него

- меньшей предельной протяженностью, что определяется в первую очередь малой мощностью передатчика;
- применением разъема, отличного от модульного и не предусмотренного стандартами СКС.

Формального нарушения стандартов СКС при этом не происходит, т.к. DAC-кабели предназначены для технических помещений, в которых модульный разъем не является безусловно обязательным к применению.

При этом техническая составляющая технико-экономического анализа проблем не вызывает, а вопрос массового использования переходит исключительно в экономическую плоскость.

Заключение.

1. Необходимость серьезных изменения в идеологии построения СКС как сложной технической системе в настоящее время назрела и эти изменения вполне реализуемы с технической точки зрения, но перечень главных направлений развития СКС по состоянию на сегодняшний день не обозначился.
2. Явно ускорился процесс «размывания» строгости соблюдения принципа универсальности СКС.
3. Современная техника позволяет реализовывать офисы следующего скоростного диапазона 25-40 Гбит/с без перехода на волоконно-оптическую элементную базу.
4. Резервы для дальнейшего расширения рабочего частотного диапазона электропроводной техники далеко не исчерпаны, а его освоение неизбежно приведет к расширению компонентного состава СКС.

Литература

1. Абрамкин Р.В., Винограденко А.М., Слепов С.Н., Дросс В.А. Оптимизация профилактических допусков в сложных технических системах // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 6. С. 18-25.
2. Артюшенко В.М., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Пути наращивания эффективности инфокоммуникационных систем: монография / под науч. ред. док. техн. наук, проф. А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант», 2019. 126 с.
3. Ваннусов Д.А., Семенов А.Б., Аббасова Т.С. Фактор неопределенности процесса проектирования структурированных кабельных систем для наземной структуры космодрома // Информационно-технологический вестник. 2022. № 4 (34). С. 106-118.
4. Васюнов Е.И., Меркулов П.А. Анализ сетей абонентского доступа на основе технологии PoLAN по показателю стоимости // В сборнике: Современная наука: Актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей XVII Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Пенза, 2021. С. 51-55.
5. Гроднев И.И., Верник С.М., Кочановский Л.Н. Линии связи: Учебник для вузов связи. 6-е изд., перераб. и доп. М.; Радио и связь, 1995. 488 с.

6. Казьмин А.Г. Налоговая система в точках бифуркации // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2015. № 8(242). С. 38-43.
7. Кардиган Р. Точка консолидации и тестирование // Журнал сетевых решений LAN. 2001. № 1. С. 44.
8. Мацкевич Д. Есть российский стандарт на СКС ... // Журнал сетевых решений LAN. 2010. № 1. С. 34-37.
9. Михайлов А.В. Анализ компьютерных сетей и выявление их особенностей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 6-2(62). С. 86-92.
10. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Основы проектирования, монтажа и тестирования структурированных кабельных систем: учебное пособие / под ред. д.т.н., профессора Семенова А.Б. М.: Издательство «Научный консультант», 2019. 232 с.
11. Семенов А.Б., Артюшенко В.М., Аббасова Т.С. Разъемный соединитель LC и измерение параметров волоконно-оптических линий внутри объектовых информационных систем / под науч. ред. док. техн. наук, проф. А.Б. Семенова. М.: Издательство «Научный консультант», 2021. 222 с.
12. Семенов А.Б., Журавлева М., Сидоркина И. Модульно-кассетные волоконно-оптические решения с улучшенными параметрами // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 3. С. 49.
13. Семенов А.Б., Макуев А.Ю., Фомичев Б.Н. Структурированные кабельные системы категории 8 // Первая миля. 2016. № 5(58). С. 58-62.
14. Скуднев Д.М., Шибанов А.П. Генетический алгоритм оптимизации структурированной кабельной системы // Вестник РГРТУ. № 3 (выпуск 29). Рязань. 2009. С. 3-6.
15. Семенов А.Б. Активная консолидационная точка для офисных информационных систем // Вестник связи. 2020. № 8. С. 20-24.
16. Семенов А.Б. Обязана ли СКС быть универсальной? // Вестник связи. 2006. № 10. С. 37-41.
17. Семенов А. Реализация сетей PoLAN на существующей кабельной инфраструктуре // Первая миля. 2021. № 7(99). С. 38-43.
18. Семенов А.Б. СКС категории 8 // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 5. С. 52-57.
19. Семенов А.Б. 25-летие оптического разъема LC. Уйдет ли ветеран на заслуженный отдых? // Вестник связи. 2019. № 11. С. 9-12.
20. Семенов А.Б. 25 Gigabit Ethernet и структурированная проводка // Журнал сетевых решений LAN. 2018. № 2. С. 44.

УДК 621.315.235

**Математическая модель процесса технической эксплуатации
информационной кабельной системы ЦОД по схеме «по потребности»**

Андрей Борисович Семенов, доктор технических наук,
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва,

Сергей Анатольевич Сиднев, кандидат технических наук,
Владимир Анатольевич Царенко, старший преподаватель,

Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), г. Москва

Рассмотрен вариант технической эксплуатации информационной кабельной системы машинного зала ЦОД, основанный на постепенном наращивании ее ресурсов в процессе выхода объекта на проектную мощность («по потребности»). Продемонстрирована перспективность применения данной стратегии как в части общей экономии финансовых ресурсов, так и возможности распределения капитальных вложений во времени и применения единого типа элементной базы в линейной части СКС. Отдельно указано на необходимость применения соответствующих проектных решений в части кабельных трасс как необходимое условие реализации стратегии.

Капитальные затраты, центры обработки данных, транковый волоконно-оптический кабель, структурированная кабельная система, техническая эксплуатация.

A mathematical model of the process of technical operation of the data center information cable system according to the «on demand» scheme

Andrey Borisovich Semenov, Doctor of Technical Sciences,
National Research Moscow State University of Civil Engineering
(NRU MGSU), Moscow,

Sergey Anatolyevich Sidnev, Candidate of Technical Sciences,

Vladimir Anatolyevich Tsarenko, Senior Lecturer,
Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow

A variant of technical operation of the data center's information cable system is considered, based on a gradual increase in its resources in the process of reaching the facility's design capacity («on demand»). The prospects of applying this strategy are shown both in terms of the overall saving of financial resources and the possibility of allocating capital investments over time. Separately, it is indicated the need to apply appropriate design solutions in terms of cable routes as a necessary condition for the implementation of the strategy.

Capital expenditures, data centers, trunk fiber optic cable, structured cabling system,

technical operation.

Уровень жизни современного человека во многом определяется объемом и качеством того сервиса, который предоставляют в его распоряжение информационные технологии. Для удовлетворения потребности в информационной поддержке создаются информационно-телекоммуникационные системы, которые на текущем этапе развития техники реализуются по централизованной схеме [4]. Функции опорного элемента соответствующих структур берут на себя центры обработки данных (ЦОД).

Сам ЦОД, в свою очередь, представляет собой сложную сетевую структуру. Качество его функционирования, в перечне ключевых критериев которого вне зависимости от выбранной классификации всегда присутствует время отклика и глубина обработки поступающего пользовательского запроса, фактически форсированно требуют организации параллельных вычислений. Данное обстоятельство немедленно приводит к интенсивному информационному обмену уже в пределах машинного зала самого центра. Для иллюстрации справедливости последнего утверждения можно сослаться на [5], согласно которой на каждый бит информации, поступающей извне в ЦОД, приходится четыре бита, передающихся по его внутренней инфраструктуре.

Еще одна характерная черта современных ЦОД – «подвижность данных», которые строго не закреплены за конкретными серверами. При необходимости как сама информация, так и процессы ее обработки могут перемещаться от сервера к серверу [8]. Данные процессы происходят внутри ЦОД и между отдельными ЦОД соответствующей сетевой структуры [9, 18].

При таких начальных условиях сокращение времени формирования ответа на поступающий пользовательский запрос и наращивание его качества достигается комплексом мероприятий, например, переходом на архитектуру spine-leaf [6] и увеличением быстродействия каналов связи, физически организующих информационный обмен между отдельными серверами. На современном этапе развития техники промышленность не только производит массовые поставки серийных 200- и 400-гигабитных сетевых интерфейсов, но и приступила к освоению следующей скоростной ступени: 800 Гбит/с. Выход на скорость 1,6 Тбит/с ожидается к концу текущего десятилетия. Столь высокое быстродействие безальтернативно предполагает применение волоконно-оптической техники.

ЦОД как объект отличается высокой сложностью и, соответственно, стоимостью. Поэтому задача снижения расходов всех видов, необходимых для строительства и последующей технической эксплуатации объекта в целом и отдельных его составляющих, относится к одной из первостепенных [17].

Законченный строительством ЦОД выходит на проектную мощность далеко не сразу. Эта особенность потенциально позволяет применить в процессе технической эксплуатации на этом временном интервале стратегию наращивания его ресурсов «по потребности». Данное положение полноценно распространяется также на СКС. Необходимое условие внедрения подобной схемы технической эксплуатации – экономическая привлекательность ее применения. Данный в-

прос, а тем более, оценка достигаемого экономического выигрыша от выбора такой стратегии не описан в известных источниках.

Цель работы – устранить имеющийся пробел и создать математическую модель, описывающую различные варианты стратегии эксплуатации физического уровня информационной инфраструктуры машинного зала ЦОД, сравнить их количественно и оценить эффективность по критерию приведенных капитальных затрат.

Возможность наращивания ресурсов СКС машинного зала ЦОД в процессе технической эксплуатации. Физический уровень канала межмашинной связи в пределах машинного зала ЦОД формируется на основе структурированной кабельной системы (СКС), которая в части применяемой элементной базы демонстрирует высокую степень преемственности с классической СКС офисного назначения. В принципе подобную преемственность по крайней мере на первый взгляд вполне можно распространить также на процесс создания информационной проводки на объекте ее эксплуатации.

В концепцию классической СКС заложен принцип однократного создания ее стационарной части, к которой затем по мере возникновения такой необходимости в процессе текущей эксплуатации подключаются различные активные сетевые устройства. При всех удобствах подобной стратегии построения и последующей технической эксплуатации информационной проводки приходится констатировать, что в момент построения СКС происходит неизбежное омертвление значительных финансовых средств. Последние направляются на создание тех стационарных линий, потребность в которых возникает только в отдаленной перспективе. Общая коммерческая привлекательность структурированной проводки обеспечивается за счет предельно низких эксплуатационных расходов.

СКС машинного зала ЦОД, которая реализуется в соответствии с требованиями профильных стандартов (ISO/IEC 11801-5:2017, ANSI/TIA-942B, ГОСТ Р 54486-2021) значимо отличается от своего офисного аналога как технически, так и с эксплуатационной точки зрения. Подобное положение дел связано с тем, что

- согласно данным Ассоциации участников отрасли ЦОД в момент запуска ЦОД в эксплуатацию используется максимум четверть его потенциальных возможностей (в офисе в два-три раза больше), потребность в которых растет во времени по закону, близкому к линейному, и достигает проектной только к концу четвертого года эксплуатации объекта;
- в машинном зале ЦОД отсутствует «белковый» пользователь, непосредственно потребляющий ресурсы СКС, в результате чего проблема его простоя из-за недостатка точек подключения и связанное с этим ухудшение экономических параметров информационной системы не возникает;
- отсутствие «белковых» пользователей означает отсутствие проблемы остановки нормальной работы отдельных отделов и секторов организации, которая происходит при прокладке новых линий кабельной связи

- непосредственно в той части офисного пространства, в которой находятся рабочие места пользователей;
- формирование линейной части новых стационарных линий СКС занимает минимальное время из-за примерно на треть меньшей по сравнению с офисами протяженности, а также использования транковых кабелей (претерминированных сборок) заводского изготовления, которые прокладываются по созданным ранее кабельным трассам [1, 10] и подключаются к коммутационным панелям без выполнения сложных монтажных работ;
 - опасность нарушения функционирования системы кондиционирования из-за перераспределения воздушных потоков эффективно устраняется построением коммутационного поля кроссов различного уровня на модульно-кассетных оптических полках с выдвижным корпусом [11], для которых подключение кабеля сборки к кассете занимает порядка минуты.

Для построения линейной части стационарных линий доступны серийно производимые промышленностью транковые кабели с различным количеством волокон, рисунок 1. После прокладки их вилки подключают к линейным розеткам кассеты, а последнюю устанавливают в корпус оптической полки слотового типа для формирования пользовательского интерфейса, к розеткам которого с помощью соответствующих коммутационных шнуров подключается активное сетевое оборудование. Данная схема реализации структурированной информационной проводки известна как модульно-кассетное решение.

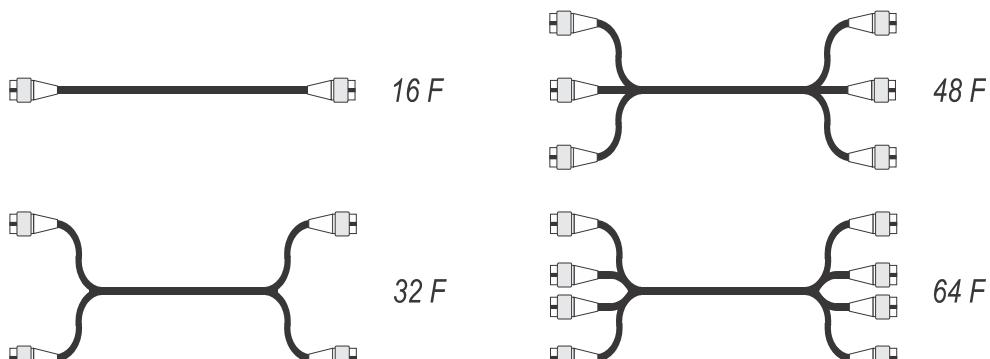


Рисунок 1 – Структура транковых кабелей (претерминированных сборок)
с различным количеством волокон

В дальнейшем рассматриваются максимум 64-волоконные транковые кабели, т.к. дальнейшее наращивание числа волокон ограничено конструктивной плотностью кассет с пользовательской стороны. Данное ограничение не снимается даже в случае применения в них новейших дуплексных разъемов из группы VSFF [12].

Простота формирования стационарных линий СКС непосредственно в

процессе текущей эксплуатации определяет техническую возможность наращивания доступных ресурсов физического уровня информационной системы машинного зала. Суть реализующей ее стратегии состоит в том, что дополнительные транковые кабели прокладываются по заранее подготовленным трассам с последующим подключением к кассетам по мере возникновения такой необходимости. Наличие такой возможности открывает перспективы распределения во времени тех немалых финансовых ресурсов, которые необходимы для создания кабельной системы ЦОД.

Особенности топологии машинного зала ЦОД и реализуемой в нем СКС. Математическая модель, используемая в процессе дальнейшего анализа, формируется на основе следующих положений.

Рассматривается одиночный типовой кабельный тракт со средней длиной 30 м, созданный по типовой для ЦОД модульно-кассетной схеме, структура которого изображена на рисунке 2. Полная совокупность таких трактов образует информационную кабельную систему ЦОД.

В качестве обоснования именно такого типового кабельного тракта обратимся к следующим соображениям.

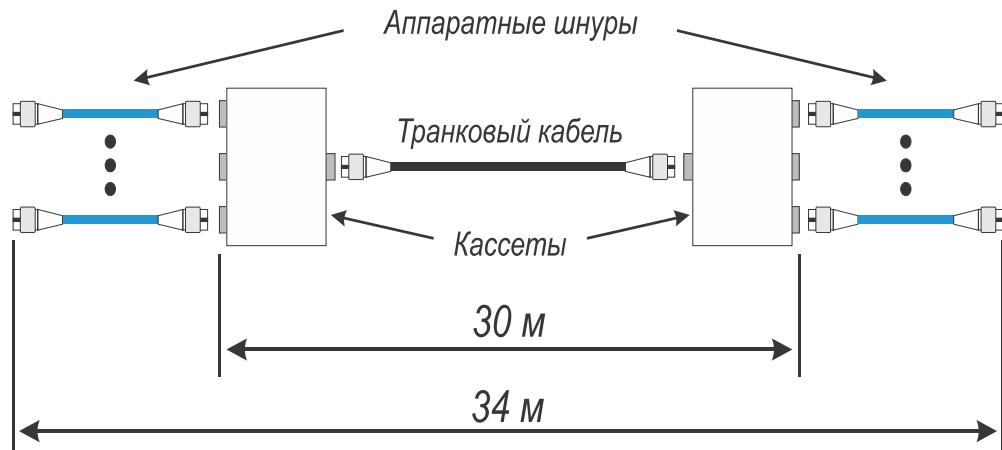


Рисунок 2 – Структура типового кабельного тракта на схеме параллельной оптической передачи, реализуемого в машинном зале ЦОД

Известно, что размеры машинного зала ЦОД ограничены сверху из-за особенностей функционирования системы воздушного охлаждения, с помощью которой утилизируются те большие объемы тепла, выделяемые при работе различного активного оборудования и, в первую очередь, серверов. Схема такого машинного зала максимальных размеров показана на рисунке 3.

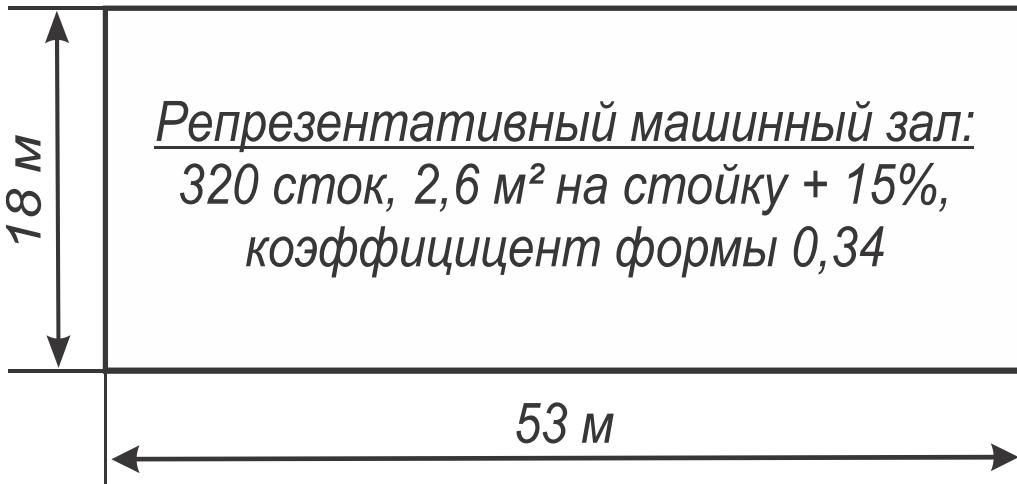


Рисунок 3 – Размеры репрезентативного машинного зала
максимальных габаритов современного ЦОД

Из представленной модели вытекают два основных положения.

Во-первых, на основании известного факта о том, что максимальная протяженность стационарной линии информационной проводки может быть определена в виде оценки сверху с примерно 15-процентной погрешностью через полупериметр области развертывания СКС. В данном случае она составляет

$$(53 + 18) - 15\% = 60 \text{ м.}$$

Во-вторых, функция плотности вероятности распределения длин стационарных линий для машинного зала вида (рисунок 3) определяется в виде свертки двух независимых случайных величин a и b , меняющихся на интервале $[0;18]$ и $[0;53]$, соответственно:

$$\varphi_{a+b}(x) = \int_0^{a+b} \varphi_a(\tau) \cdot \varphi_b(x-\tau) d\tau.$$

В результате она имеет вид, изображенный на рисунке 4, близка к симметричной (асимметрия данного распределения близка к нулю), что позволяет принять за среднее значение половину от указанного значения.

Как результат, с учетом конкретных численных значений верхних границ изменения a и b выходим на 30-метровую протяженность стационарной линии, что подтверждается статистикой реальных объектов.

В случае превышения количества стоек значения 320 объект проектируют по многозальной схеме, а каждый зал в этом случае из-за независимости создаваемых в нем информационных кабельных систем можно рассматривать отдельно.

Отметим, что основная масса ЦОД не относится к крупным согласно той классификации, которая сложилась в отрасли по состоянию на сегодняшний день [13].

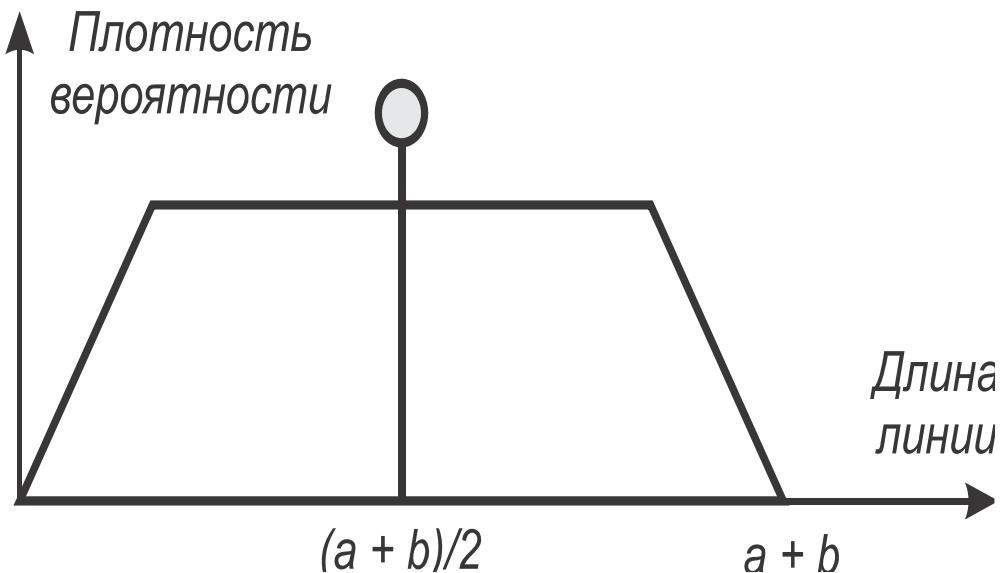


Рисунок 4 – Функция плотности вероятности распределения длин стационарных линий СКС машинного зала ЦОД

Соответствующее эмпирическое распределение по проектам, реализованным на территории России, приведено на рисунке 5, и демонстрирует зависимость, довольно близкую к экспоненциальной.

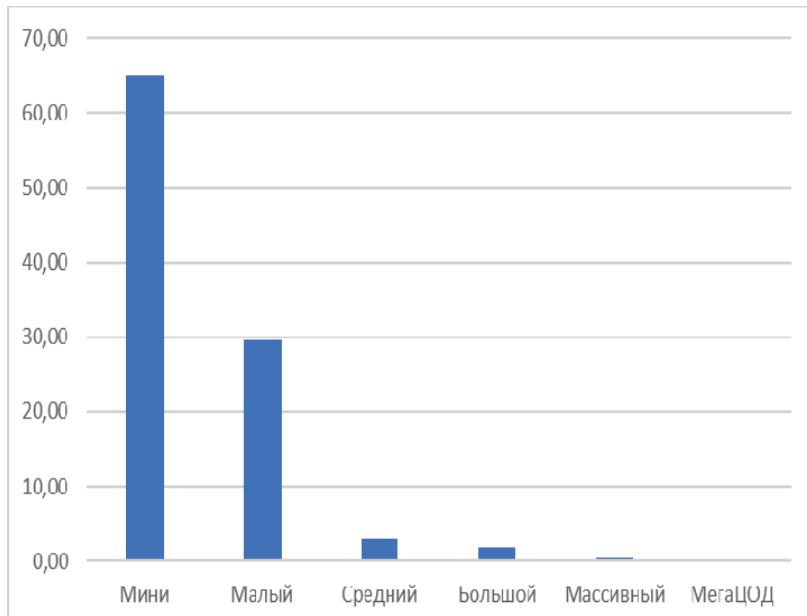


Рисунок 5 – Статистика распределения ЦОД по отдельным группам в зависимости от количества стоек в машинном зале

Количество стоек, которое рассматривается как главный классификационный признак отнесения объекта к одной из разновидностей, представлено в таблице 1.

Заметим, в этой связи, что сокращение средней протяженности стационарной линии лишь усилит те выводы в части предпочтительного количества волокон применяемого транкового кабеля, которые будут сделаны по результатам анализа рассматриваемой далее математической модели.

Таблица 1 – Количество стоек в ЦОД различных размеров

Тип ЦОД	Мега	Массивный	Крупный	Средний	Малый	Мини
Количество стоек	>9000	3000-9000	800-3000	200-800	11-20	1-10

Качественно этот эффект объясняется тем, что относительная доля затрат на претерминированную сборку в общем объеме средств, привлекаемых для формирования кабельного тракта СКС, падает по мере сокращения ее длины за счет того, что затраты на коммутационные шнуры и панели оптических кроссов не зависят от протяженности кабельного тракта и остаются неизменными. Последнее означает, что дальнейший анализ целесообразно выполнять для ЦОД с максимальным размером машинного зала.

Считаем, что возможность прокладки дополнительных транковых кабелей непосредственно в процессе эксплуатации ЦОД, а также удобство их подключения к кассетам обеспечено соответствующими техническими мероприятиями еще на стадии проектирования объекта.

Стандарты допускают реализацию СКС машинного зала в одномодовом и многомодовом вариантах [14]. В основной массе случаев используются многомодовые решения [2]. Целесообразность их применения определяется тем, что таковые при равных функциональных возможностях с одномодовыми:

- имеют меньшую стоимость при тех небольших расстояниях, которые характерны для машинного зала ЦОД;
- отличаются заметно меньшей капризностью с эксплуатационной точки зрения.

Реально при построении линейной части СКС машинного зала применяются транковые кабели с волокнами категорий ОМ3 – ОМ5. Отдельно укажем на то, что по мере роста категории создаваемой СКС, т.е. использования в конструкции сборки более современных волокон техническая эффективность кабельного тракта увеличивается [15].

Дополнительно принимается во внимание, что СКС создается по перспективной схеме Base16. Целесообразность обращения именно к такому решению определяется тем, что данная схема

- поддерживает как свое естественное подмножество популярную на современном этапе схему Base8;

- позволяет при необходимости штатно осуществлять передачу информационных потоков со скоростями как минимум 1,6 Тбит/с вне зависимости от применяемой для этого технологии [16].

Динамика выделения затрат, необходимых для реализации СКС.

Процесс наращивания ресурсов СКС на этапе вывода ЦОД на проектную мощность и требуемых для этого финансовых ресурсов называется в дальнейшем стратегией «по потребности». Сильной стороной обращения к такому подходу становится то, что она не требует разработки новых типов элементной базы кабельной системы. Физически она реализуется соответствующим выбором сроков прокладки и числом волокон вновь инсталлируемых транковых кабелей.

В процессе роста нагрузки на ЦОД и на кабельную систему, как его часть, количество волокон и транковых кабелей вместе с кассетами оптических кроссов наращивают организацией новых линий в плановом порядке так, чтобы общее количество цепей передачи или волокон удовлетворяло потребности сети на всем планируемом периоде эксплуатации ЦОД, рисунок 6.

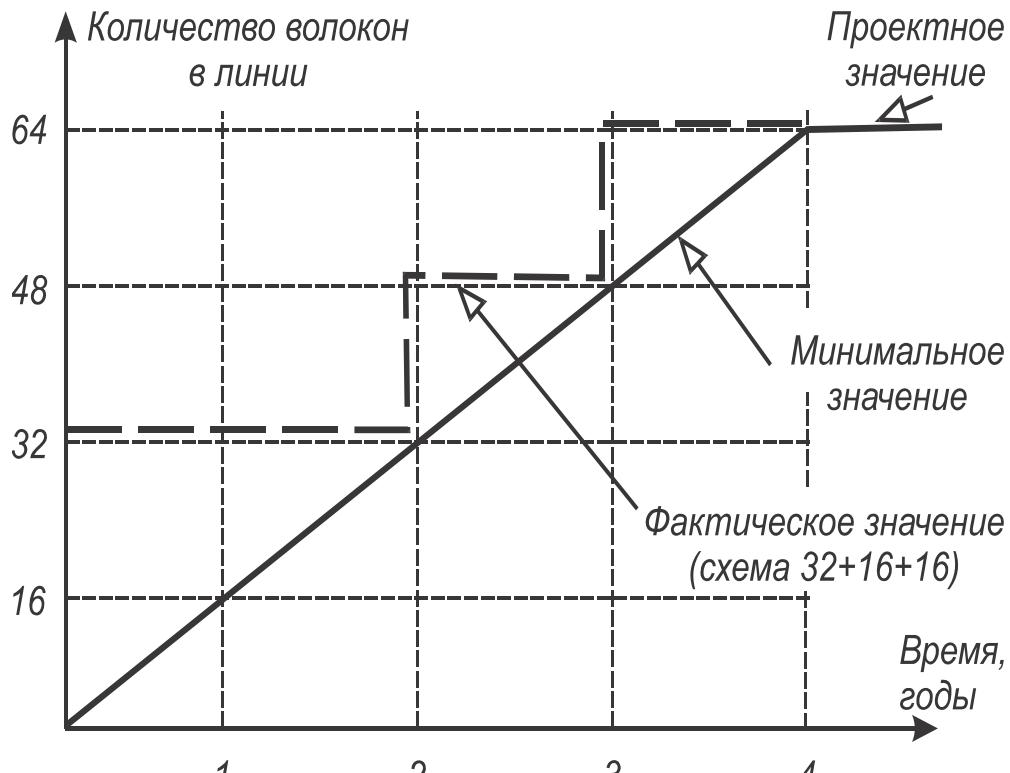


Рисунок 6 – Изменение количества волокон в типовой линии во времени в случае применения схемы 32 + 16 +16 эксплуатации и ее сопоставление с ожидаемой потребностью информационной инфраструктуры машинного зала ЦОД в кабельных трактах

Иначе говоря, точка, отображающая количество волокон в типовой линии

кабельной системы, в любой наперед заданный момент времени должна находиться не ниже прямой, задающей минимальное значение этого параметра в системе координат время – количество волокон.

В качестве реперного значения в процессе определения целесообразности обращения к стратегии «по потребности» берется «классический» вариант, предполагающий создание полноценной СКС уже в момент строительства ЦОД. Применительно к данному случаю это означает создание 64-волоконных стационарных линий и установку соответствующий оптических кроссов. Обращение к обсуждаемой стратегии целесообразно только в том случае, если затраты на реализацию хотя бы одной из схем постепенного наращивания волокон в конкретной линии меньше базового варианта.

В этой области имеем два действующих одновременно и примерно равнозначных, но противоречивых фактора.

Первый из этих факторов состоит в том, для получения минимальных разовых затрат необходимо стремиться использовать транковые кабели с максимально возможным количеством волокон, для которых характерно снижение удельных затрат на одно волокно, таблица 2.

Таблица 2 – Относительная стоимость ξ_n типовой 16-волоконной линии СКС при ее реализации на транковых кабелях с различным количеством волокон

Число волокон транкового кабеля	16	32	48	64
Параметр ξ_n	1	0,959	0,945	0,938

Отметим, что достаточно небольшое отличие параметра ξ_n от единицы (порядка 5-6%) вне зависимости от количества $n > 16$ волокон транкового кабеля объясняется тем, что:

- транковые кабели содержат большое количество волокон, в результате чего доля стоимости защитных оболочек, которую в рассматриваемом диапазоне изменения $n = 16 - 64$ можно считать постоянной q , в отпускной цене достаточно мала;
- стоимость вилок оптических разъемов и работ по их установке на кабель (16-волоконное изделие) или его отводы (кабели с большим количеством волокон), а также кассет оптической панели в пересчете на 16-волоконную группу постоянна;
- стоимость кассет и коммутационных шнуров для подключения активного сетевого оборудования к стационарным линиям СКС пропорционально растет по мере наращивания количества волокон в линии.

Суть второго фактора заключается в том, что с точки зрения минимизации общих затрат, выгодно прокладывать транковые кабели и формировать на их основе стационарные линии СКС только в тот момент, когда в них возникает соответствующая потребность, т.е. реализация в части технической эксплуатации

кабельной системы стратегии «по потребности». Допустимо также небольшое опережение по срокам. Это соображение форсированно приводит к необходимости работы с кабелями меньшей емкости.

Рассматриваемая стратегия предполагает распределенное по времени выделение финансовых ресурсов, номинальная стоимость которых меняется с течением времени. Для сравнения вариантов необходимо привести общие затраты к одному моменту. Для выполнения этой процедуры часто привлекают дисконтирование [19]. В данном случае воспользуемся приведением к моменту выхода ЦОД на проектную мощность, т.е. к концу четвертого года эксплуатации объекта.

Примем во внимание следующие два факта:

- затраты на инсталляцию модульно-кассетной техники, используемые для формирования СКС машинного зала ЦОД, малы на фоне стоимости самой элементной базы.
- СКС вообще, а СКС в ЦОД в особенности, из-за характерного для него статичности конфигурации информационной системы машинного зала отличается крайне низкими эксплуатационными расходами.

Все перечисленные выше факторы действуют совместно, а их наличие сводит долю эксплуатационных расходов к минимуму. В результате приходим к тому, что в процессе дальнейшего анализа допустимо ограничиться учетом только капитальных затрат.

Математическая модель. Рассматриваются четыре основных стратегии достижения величины 64 волокна в типовой линии к концу четвертого года эксплуатации. Их условно можно записать и обозначить через значение n количества волокон как

$$16 + 16 + 16 + 16 \quad (n = 16);$$

$$32 + 16 + 16 \quad (n = 32);$$

$$48 + 16 \quad (n = 48);$$

$$64 \quad (n = 64).$$

В графической форме данные варианты стратегий демонстрирует рисунок 7.

Рисунок 6 и рисунок 7 де-факто являются взаимосвязанными. В частности, изменение во времени количества волокон типовой линии при обращении к стратегии $32 + 16 + 16$ в качестве примера показано также на рисунке 5.

Параметр n дискретен и численно равен количеству волокон в составе простого тракта. На основании исходных предположений такой тракт считается сформированным на основе модульно-кассетной техники уже в момент запуска ЦОД в эксплуатацию, т.е. сразу же по окончании его строительства.

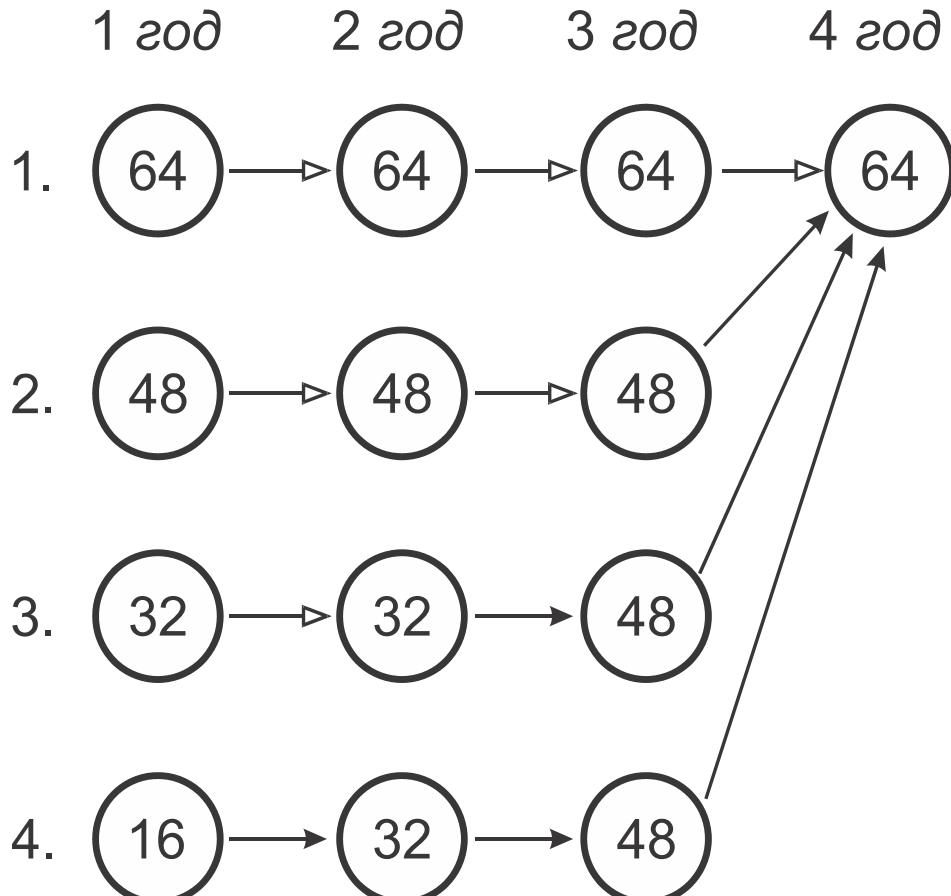


Рисунок 7 – Основные варианты наращивания количества волокон для получения типовой 64-волоконной линии СКС машинного зала ЦОД в зависимости от выбранной стратегии

Капитальные затраты на создание 64-волоконного кабельного тракта СКС, которые в данном случае приводятся к концу четвертого года эксплуатации ЦОД, зависят от выбранной стратегии, т.е. от параметра n . При условии обращения к формуле сложных процентов они вычисляются следующим образом:

$$\Psi(n)=G\left[\xi \frac{n}{16}(1+r)^4 + \sum_{j=0}^{4-n/16} (1+r)^j - 1\right], \quad (1)$$

r – коэффициент (ставка) дисконтирования [7];

где:

G – стоимость одиночного 16-волоконного кабельного тракта на момент строительства ЦОД.

Параметр G , который использован для записи (1), в данном случае с формальной точки зрения является простым коэффициентом пропорциональности. С

учетом этой особенности значение G не влияет на конечный результат. Поэтому для простоты его можно положить равным единице.

При записи соотношения (1) и в процессе дальнейшего анализа предполагается, что n всегда кратно 16.

Ставка r дисконтирования при расчетах считается постоянной. Основанием для такого предположения является довольно жесткая связь этого параметра с текущим значением инфляции в России, которая за последние несколько лет только один раз демонстрировала значение выше 10%, а также проводимая Центральным банком РФ политика ее жесткого таргетирования [3]. Фиксация r на постоянном значении заметно упрощает дальнейший анализ.

Результаты расчетов по (1) для случая $G = 1$ при разных значениях r приведены в таблице 3.

**Таблица 3 – Приведенная к концу четвертого года эксплуатации
удельная стоимость 30-метровой типовой 64-волоконной
модульно-кассетной кабельной линии**

Стратегия построения линии	16+16+16+16	32+16+16	48+16	64
$r = 0,1$	5,105	5,118	5,251	5,493
$r = 0,15$	5,742	5,827	6,108	6,562

Анализ модели. Дальнейший анализ стратегии «по потребности» построения СКС машинного зала ЦОД проведем с привлечением вспомогательной функции

$$\Lambda(n) = \frac{\Psi(n) - \Psi(16)}{G}. \quad (2)$$

Входящие в (1) и, соответственно, использованные для записи (2) суммы неудобны для практических расчетов. Поэтому выполним их упрощение, в процессе которых примем во внимание следующее тождество

$$\sum_{j=0}^{4-n/16} (1+r)^j - \sum_{j=0}^3 (1+r)^j = \sum_{j=1}^{4-n/16} (1+r)^j - \sum_{j=1}^3 (1+r)^j.$$

Это позволяет рассматривать сумму, входящую в (1), как геометрическую прогрессию с первым членом $1 + r$ и аналогичным знаменателем. Кроме того, с учетом малости r допустимо использовать приближение $(1+r)^\eta \approx 1 + \eta r + \frac{\eta(\eta-1)}{2} r^2$. В данном случае для упрощения записи используется следующее сокращение $\eta = 4 - 16/n$.

Преобразование выражения (2) в окончательном виде дает следующую формулу, пригодную для выполнения инженерных расчетов:

$$\Lambda(n) = (1+r) \left[(\xi_n \cdot n/16 - 1) \cdot (1+r)^3 + (4 - n/16) \cdot \left(1 + \frac{3-n/16}{2} r \right) - 3 \cdot (1+r) \right]. \quad (3)$$

Результаты расчетов по выражению (3) представлены в таблица 4. Там же для сравнения представлены точные значения для $\Lambda(n)$.

**Таблица 4 – Приведенные к концу четвертого года эксплуатации
разность в удельной стоимости типовой 64-волоконной
модульно-кассетной кабельной линии**

Стратегия построения линии	16+16+16+16	32+16+16	48+16	64
Приближенная формула (3)				
r = 0,1	0	0,024	0,157	0,399
r = 0,15	0	0,111	0,392	0,846
Точное выражение				
r = 0,1	0	0,013	0,146	0,388
r = 0,15	0	0,085	0,366	0,820

Отдельно укажем на то, что стратегия $32 + 16 + 16$ по своим стоимостным параметрам довольно близка к оптимальной стратегии $16 + 16 + 16 + 16$. Об этом, в частности, косвенно свидетельствует довольно большая относительная ошибка, которую дает приближенная формула (3) по сравнению с истинным значением при оценке удельной стоимости 64-волоконной модульно-кассетной кабельной линии.

Тем не менее, этот вариант технической эксплуатации информационной кабельной системы на этапе вывода ЦОД на проектную мощность оказывается заметно менее конкурентоспособным. Сказывается то, что в данном случае нарушается такое важное с эксплуатационной точки зрения условие как единство элементной базы, используемой при построении СКС машинного зала ЦОД.

Численное дифференцирование (3), выполненное в среде MathCad свидетельствует о том, что $\frac{\partial \Lambda(n)}{\partial r} > 0$ для любого n при r , отличном от 0. Это означает, что линейную часть информационной кабельной системы целесообразно строить с использованием претерминированных сборок с минимально возможным количеством волокон, т.е. в данном случае 16.

Введем параметр критического ξ_{n_kp} , т.е. такого ξ_n , при котором $\Lambda(n) = 0$. Оно находится из (3) и составляет

$$\xi_{n_kp} = \frac{16}{n} \left\{ 1 - \frac{(4 - n/16) \cdot [1 + (3 - n/16) \cdot (r/2)] - 3 \cdot (1+r)}{(1+r)^3} \right\}. \quad (4)$$

Результаты расчетов по (4) вместе с фактическими значениями ξ_n в зависимости от количества n волокон транковых кабелей представлены в таблице 5 и

свидетельствуют об устойчивом характере рекомендации применения в качестве основного типа линейного транкового кабеля 16-волоконных претерминированных сборок.

Таблица 5 – Сопоставление критического и фактического значений параметра ξ_n в зависимости от выбранной стратегии наращивания количества волокон в стационарных линиях СКС

Стратегия построения линии	Коэффициент дисконтирования	32+16+16	48+16	64
Критическое значение ξ_{n_kp}	r = 0,1	0,951	0,909	0,870
	r = 0,15	0,927	0,870	0,817
Фактическое значение ξ_n	-	0,959	0,945	0,938

Экономически практически идентичная реализация линейной части кабельной системы с привлечением для этого 32-волоконных сборок (величины расчетной удельной стоимости сборок 5,105 и 5,118 или около 0,3%) невыгодна под углом зрения расширения номенклатуры типов транковых кабелей, используемых в проекте.

Заключение

1. Применение стратегии «по потребности» в процессе технической эксплуатации структурированной кабельной системы машинного зала ЦОД при ставках дисконтирования порядка 10% и более позволяет значительно улучшить финансовые параметры проекта.
2. Наиболее существенный выигрыш от внедрения рассматриваемой стратегии наращивания ресурсов СКС заключается в возможности близкого к равномерному распределению на 4-летний срок тех больших объемов финансовых средств, которые направляются на реализацию физического уровня информационной инфраструктуры машинного зала.
3. Прямая экономия капитальных затрат на СКС в случае обращения к стратегии «по потребности» носит умеренный характер и не превышает примерно 3-5%.
4. В качестве основного типа транкового кабеля информационной кабельной системы ЦОД следует использовать 16-волоконную претерминированную сборку.
5. Возможность реализации стратегии «по потребности» технической эксплуатации СКС машинного зала ЦОД должна быть предусмотрена еще на стадии проектирования объекта за счет применения соответствующего типа кабельных трасс и использования для построения оптических кроссов всех уровней модульно-кассетного коммутационного оборудования с полками слотового типа.

Литература

1. Аббасова Т.С. Оптимизация и стандартизация оптической среды взаимодействия вычислительных комплексов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 1. С. 86-97.
2. Зубилевич А.Л., Семенов А.Б., Сиднев С.А., Царенко В.А. Экономические аспекты применения одномодовой волоконно-оптической техники в информационной системе машинного зала ЦОД // Электросвязь. 2022. № 7. С. 67-70.
3. Канунникова Н.И., Малькова Ю.В., Кротенко Т.Ю. Инфляционное таргетирование: взгляд на проблему // Инновационная экономика: Перспективы развития и совершенствования. 2022. № 6(64). С. 19-23.
4. Лисецкий Ю.М. Построение современного территориально-распределенного центра обработки данных // Программные продукты и системы. 2008. № 2. С. 14-16.
5. Маззарез Д. Влияние увеличения пропускной способности на структуру оптоволоконной сети // Первая миля. № 6. 2016. С. 72-74.
6. Макуев А.Ю., Семенов А.Б. Влияние spine-leaf-архитектуры современных ЦОД на принципы построения волоконно-оптической подсистемы физического уровня информационной инфраструктуры аппаратного зала ЦОД // Фотон-экспресс. 2021. № 1(169). С. 8-11.
7. Орлов А.И. Характеризация моделей с дисконтированием // Научный журнал КубГАУ. 2019. № 153(09). С. 1-4.
8. Ромасевич П.В. Оценка средних задержек телекоммуникационных инфраструктур и каналов межсоединения Центров обработки данных в архитектуре Web Scale // Современные информационные технологии и ИТ образование. № 3. 2017. Т. 13. С. 24-30.
9. Семенов А. Линии параллельной многомодовой оптической передачи перспективных ЦОДов // Первая миля. № 5. 2017. С. 12-16.
10. Семенов А.Б. Волоконные сборки для транковых кабелей систем параллельной передачи // Вестник связи. 2018. № 2. С. 15-17.
11. Семенов А., Журавлева М., Сидоркина И. Модульно-кассетные волоконно-оптические решения с улучшенными параметрами // Журнал сетевых решений LAN. 2014. № 3. С. 49.
12. Семенов А.Б. Малогабаритные оптические разъемы следующего поколения для внутриобъектовых кабельных систем // Первая миля. 2023. № 4(112). С. 28-33.
13. Семенов А.Б., Артюшенко В.М. Анализ дополнительных направлений технологического развития структурированных кабельных систем // Информационно-технологический вестник. 2023. № 3(37). С. 65-77.
14. Семенов А.Б. Одномодовая техника в параллельной передаче // Вестник связи. 2017. № 10. С. 25-28.
15. Семенов А.Б., Былина М.С. Техническая эффективность параллельных многомодовых оптических кабельных трактов категории OM5 для ЦОД // Информационно-технологический вестник. 2017. № 4(14). С. 91-101.

16. Семенов А.Б., Портнов Э.Л., Колесников О.В. Технология BiDi для терабитных скоростей – первые шаги // Фотон-экспресс. 2023. № 7(191). С. 8-12.
17. Снытко А.С., Терников А.А. Особенности модернизации центра обработки данных и космоцентра // Программные продукты и системы. 2015. № 4. С. 22-27.
18. Шавкунов С.В. Цифровая экономика и необходимость модернизации магистральных волоконно-оптических сетей России в период 2020-2030 годов // Кабели и провода. № 3. 2021. С. 11-18.
19. Эффективность ВОЛС. Оценка и пути повышения / С.А. Сиднев, А.Л. Зубилевич, О.В. Колесников, В.А. Царенко. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 128 с.

УДК 519.216.3, 519.715, 517.977

Методы и аспекты прогнозного моделирования нелинейных нестационарных процессов

Артур Анисович Шайхутдинов, руководитель проекта,

ООО «Феникс», г. Москва,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)», г. Москва

В статье рассматривается актуальная проблематика прогнозирования нелинейных нестационарных процессов в различных областях, дан обзор основных теоретических подходов к их прогнозированию. Проанализированы современные подходы к моделированию таких процессов и предложена информационная технология на основе интеллектуального анализа данных для повышения точности прогнозирования, приведен список конкретных примеров использования предложенной технологии.

Временной ряд, прогнозирование, нелинейный нестационарный процесс, нелинейность, нестационарность, информационная технология.

Methods and aspects of predictive modeling of non-linear non-stationary processes

Artur Anisovich Shaikhutdinov, project manager, Fenix LLC, Moscow,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman
Moscow State Technical University (National Research University)», Moscow

The article discusses the current issues of non-linear non-stationary processes forecasting in various industries, and provides an overview of the general theoretical approaches to their predictive modeling. Modern approaches to modeling such processes are analyzed and an information technology based on intelligent data mining is proposed to improve the accuracy of forecasting, a list of specific examples of the use of the proposed technology is given.

Time series, forecasting, non-linear non-stationary process, non-linearity, non-stationarity, information technology.

Введение

Прогнозирование нелинейных нестационарных процессов представляет собой актуальную и сложную задачу, обладающую высокой степенью значимости в современном мире, где динамичные и непредсказуемые изменения играют

важную роль в различных сферах деятельности. Эти процессы охватывают широкий спектр областей, включая климатологию, биологию, медицину, эпидемиологию, экономику, финансы, и другие, где надежные и точные прогнозы имеют решающее значение для принятия рациональных решений [1-2] и успешного управления.

Современные динамические системы и процессы, часто обладая нелинейной и нестационарной природой, представляют собой сложную палитру явлений, которые нельзя охарактеризовать традиционными линейными методами. Взаимодействия между переменными, возможные смены режимов, внешние воздействия и стохастические факторы делают эти процессы непредсказуемыми и представляют вызов даже для современных методов анализа.

Целью данного исследования является синтез методов прогнозного моделирования, которые способны эффективно учитывать нелинейные и нестационарные характеристики процессов.

Основными задачами исследования являются:

1. Изучение специфики процессов. Анализ особенностей различных типов нелинейных нестационарных процессов, выявление взаимосвязей между переменными и определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на их динамику.

2. Разработка моделей прогнозирования. Создание математических моделей, способных учитывать сложные нелинейные зависимости и изменения во времени. Это включает как выбор подходящей функциональной формы, так и определение влияния различных факторов на модель.

3. Интеграция современных методов. Исследование возможности применения современных методов машинного обучения, временных рядов и анализа больших данных для повышения точности и гибкости прогнозов.

4. Анализ неопределенностей. Оценка влияния различных видов неопределенности (ситуационной, статистической, структурной, вероятностной) на точность прогнозов и разработка методов её учета.

В данной работе рассматривается сложная и важная проблема прогнозирования нелинейных нестационарных процессов. Основываясь на анализе особенностей таких процессов и использовании современных методов анализа данных, наука системного анализа и теория управления стремятся к разработке более точных и адаптивных моделей прогнозирования, способных учитывать различные виды неопределенности и повышать качество принимаемых решений.

Обзор основных теоретических подходов к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов

Прогнозирование нелинейных нестационарных процессов является важной задачей в различных областях, таких как экономика, финансы, климатология, медицина и другие [3]. Основной сложностью при прогнозировании таких процессов является их непредсказуемая и динамичная природа. Для эффективного прогнозирования необходимо учитывать нелинейные взаимосвязи между переменными и изменения в структуре данных со временем [4].

Нелинейность – это свойство системы или процесса проявлять нелиней-

ные зависимости между входными и выходными данными. Отличие нелинейных зависимостей от линейных проявляется в виде разнообразия функций: кривых, сигмоидальных, экспоненциальных и других, которые нельзя точно формализовать с помощью линейных моделей. Под нестационарностью подразумеваются изменение статистических характеристик процессов в течение времени, в том числе изменение дисперсии, среднего значения или же корреляции переменных.

Причинами возникновения нестационарности может быть как внешнее воздействие, так и внутренние динамические процессы или сезонные изменения.

К классическим методам прогнозирования относятся:

1. Методы сглаживания, к которым относится скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание и другие методы, учитывающие предыдущие значения ряда для формирования прогноза. Эти способы эффективны при оценке стационарных процессов, но для обработки нелинейных и нестационарных процессов не всегда подходят.

2. Модели авторегрессии произвольного порядка, которые обычно считаются стационарными процессами второго порядка. Автоковариационная последовательность (autocovariance sequence, ACVS) с задержкой τ для процесса авторегрессии определяется как:

$$\gamma_\tau = E \{ [Z_t - \mu][Z_{t-\tau} - \mu] \}, \quad (1)$$

где $\{Z_t\}$ – процесс авторегрессии, μ – математическое ожидание процесса $\{Z_t\}$, а задержка $\tau = 0, 1, \dots, N-1$.

3. Методология Бокса-Дженкинса или авторегрессионное интегрированное скользящее среднее (autoregressive integrated moving average, сокр. ARIMA) – статистический метод, учитывающий автокорреляцию данных. Применяется в математическом моделировании и прогнозировании временных рядов. Среди недостатков модели ARIMA присутствуют ограничения в обработке нелинейных процессов.

4. Анализ Фурье или спектральный (гармонический) анализ, используемый для работы с данными циклических и сезонных изменений. Широко применяется для вычислений в процессах с сильными сезонными колебаниями, но для работы с нелинейными изменениями не всегда подходит.

5. Многооконный спектральный анализ с использованием ортонормированных дискретных вытянутых сфероидальных последовательностей (discrete prolate spheroidal sequence, DPSS), также известных как последовательности Слепиана [18], в качестве оконных функций. При использовании последовательностей Слепиана выбирается параметр пропускной способности времени (ширины полосы пропускания), который, в свою очередь, определяет эффективную полосу пропускания [19].

6. Форсайт-модель X11 – метод моделирования временных рядов, который применяется для прогнозирования, анализа данных, выявления паттернов и тенденций, особенно в области экономики и статистики. Этот метод разработан для декомпозиции временных рядов на отдельные компоненты (сезонность, тренд и случайные изменения), что позволяет более точно прогнозировать буду-

щие значения ряда:

$$Y_t = T_t \times S_t \times R_t , \quad (2)$$

где Y_t – это наблюдаемое значение временного ряда в момент времени t ,

T_t – трендовая компонента, представляющая общий характер изменения временного ряда в момент времени t ,

S_t – сезонная компонента, отражающая сезонные колебания или циклические эффекты в момент времени t ,

R_t – случайная компонента, представляющая остаточные или случайные изменения в момент времени t .

Недостатки применения классических методов:

1. В основе большинства классических методов лежат линейные предположения, которые не учитывают при вычислениях сложные нелинейные зависимости, характерные для некоторых процессов.

2. Стационарность данных, которая не всегда подходит реальным процессам, особенно если речь идет о долгосрочной перспективе.

3. Классические методы не подходят для моделирования сложных динамических процессов. К ним относятся смена режимов, периодическая нестационарность и ряд других нелинейных изменений.

Важно понимать отличие нестационарности и нелинейности для достоверного прогнозирования динамических процессов. Классические методы подходят для прикладного применения далеко не для всех сложных процессов, поэтому необходимо разрабатывать более универсальные подходы прогнозного моделирования. К ним можно отнести машинное обучение, сингулярный спектральный анализ, численное размножение наблюдаемых выборок или бутстреп. Применять для анализа следует и нейронные сети, а также другие информационные технологии, позволяющие более точно обрабатывать нелинейные и нестационарные свойства процессов.

Анализ различных типов неопределенности в прогнозировании нелинейных нестационарных процессов

В прогнозировании нелинейных нестационарных процессов ключевую роль играет неопределенность. Существенный недостаток этих процессов состоит в том, что условия не позволяют рассчитать точное развитие событий. Ситуационная, структурная, статистическая и вероятностная неопределенности существенно влияют на точность расчетов и надежность полученных прогнозов.

Можно отметить следующие особенности каждого из перечисленных типов:

1. Ситуационная неопределенность тесно связана с внешними факторами, влияющими на процесс. Сюда относится политическая обстановка, социальные и экономические изменения и ряд других событий. Верно спрогнозировать нелинейные нестационарные процессы непросто в случае, если ситуационная неопределенность вносит изменения в динамику процесса. К примеру, изменение политики государства или мира в целом, природные катастрофы вызывают рез-

кие изменения данных, которые трудно заранее учесть при построении модели.

2. Статистическая неопределенность, которая тесно связана с недостатком данных и статистической случайностью. Данные в нелинейных нестационарных процессах имеют высокую вариативность и сложные корреляции, что в итоге приводит в лучшем случае к неточным, а в худшем – неверным прогнозам. Недостаток данных или непрепрезентативность выборки существенно усложняют моделирование процессов.

3. Непонимание внутренней структуры процесса приводит к структурной неопределенности. В нелинейных нестационарных процессах со сложными взаимодействиями с переменным, изменяемыми во времени, структурная неопределенность приводит к недостаточной адекватности созданных моделей. Если внутренние связи были представлены неправильно, то и полученные прогнозы будут ошибочны.

4. Влияние случайных событий на прогнозируемый процесс приводит к вероятностной неопределенности. Вероятностные факторы влияют на развитие событий в нелинейных стационарных процессах. К примеру, стохастическая природа финансовых рынков в дальнейшем может привести к появлению ошибок при долгосрочном прогнозировании.

Все описанные выше типы неопределенности тесно взаимодействуют между собой и могут усиливать друг друга при том или ином стечении обстоятельств. Таким образом прогнозирование процессов становится непростой задачей.

Учет и дальнейший анализ неопределенностей – критический в разработке точных и надежных моделей прогнозирования. Исходя из этого, можно отметить важность использования адаптивных, гибких методов, к которым, как уже отмечалось, относится машинное обучение и анализ больших массивов данных, при которых можно учитывать сложные взаимосвязи между процессами и вероятность изменчивости полученных данных.

Информационная технология на основе интеллектуального анализа данных для прогнозирования ННП

Современная наука требует использования точных и гибких методов прогнозирования нелинейных нестационарных процессов. Применение инновационных информационных технологий и новых методов анализа данных позволяет разработать подходы к решению поставленных задач. В основе предлагаемой информационной технологии – интеллектуальный анализ больших массивов данных, что позволяет получить более точные результаты.

Среди основных шагов применения информационной технологии на основе интеллектуального анализа данных для прогнозирования ННП следует выделить:

1. Подготовку и сбор необходимых данных. Необходимую информацию следует получать из различных источников, в том числе современных рядов, учитывать социальные и экономические факторы и показатели. Данные могут быть представлены как в виде таблиц, баз данных, так и в виде текстов, видео или аудиоматериалов, структурных схем. Собранные данные необходимо пред-

варительно обработать и преобразовать в удобный для анализа вид.

2. Анализ данных и последующее моделирование. Сначала проводится анализ данных с использованием ряда методов: статистического анализа, использования временных рядов, машинного обучения. После на основе полученных данных создаются математические модели, учитывающие нелинейность и нестационарность изучаемых процессов.

На данном этапе происходит выбор функциональной формы модели, определяются параметры и происходит оценка влияющих на процесс факторов [5].

3. Учет всех возможных горизонтов прогнозирования. Данная технология позволяет разрабатывать модели для различных горизонтов прогнозирования: от краткосрочных до долгосрочных. Для каждого выбранного горизонта выбирается наиболее подходящая модель и методы анализа.

4. Учет тенденций развития процессов играет не последнюю роль в прогнозировании. Предлагаемая информационная технология позволяет учитывать и моделировать долгосрочные изменения в изучаемых процессах. Сюда относится анализ как внешних, так и внутренних факторов, влияющих на долгосрочность развития процесса.

5. Генератор возможных сценариев позволяет повысить надежность прогнозов и учесть их гибкость и изменчивость. Технология позволяет создавать и рассматривать разнообразные варианты развития событий с учетом изменения внешней среды.

Предлагаемая схема информационной технологии прогнозирования ННП с использованием интеллектуального анализа данных показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема структурной информационной технологии на основе интеллектуального анализа данных для прогнозирования нелинейных нестационарных процессов

Методы, используемые в предложенной информационной технологии:

- Машинное обучение применяется для классификации данных и распределения их по кластерам [6], выявления скрытых зависимостей в моделируемых процессах [13-14], а также создания адаптивных прогнозных моделей.
- Для анализа дискретных временных зависимостей используются многомерные временные ряды.
- С помощью анализа больших массивов данных происходит быстрый анализ как структурированной, так и неструктурной информации.
- К экспертным методам относится оценка специалистами полученных знаний для уточнения и адаптации моделей.

Информационные технологии, основанные на интеллектуальном анализе данных, представляют инновационный подход к прогнозированию процессов. К основным преимуществам предлагаемой информационной технологии относится ее адаптивность к изменчивости внешней среды, способность анализировать данные и создавать разнообразные сценарии развития. Это позволяет получить более точные и надежные прогнозы в условиях сложной динамической среды.

Применение информационной технологии на основе интеллектуального анализа данных к прогнозированию ННП

Информационная технология на основе интеллектуального анализа данных находит широкое применение в различных областях, где нелинейные нестационарные процессы играют ключевую роль. Ниже приведен список конкретных примеров использования этой технологии.

1. Финансы и инвестиции:

- Прогнозирование курсов валют. Анализ данных о валютных курсах, экономических показателях стран и мировых событиях позволяет строить прогнозы курсов валют, учитывая сложные зависимости и влияние нестабильных факторов.
- Прогнозирование динамики фондовых рынков. Использование временных рядов и глубокого обучения для прогнозирования биржевых индексов и котировок акций, учитывая нелинейность и нестационарность процессов.
- Прогнозирование доходности банковского портфеля ипотечных кредитов. Автор данной работы управляет цифровым продуктом ипотечного конвейера компании ООО «Феникс» [7] и в настоящее время исследует прогнозирование финансовых показателей портфеля ипотечных кредитов с учетом неопределенности их погашения (просрочки платежей, дефолты по кредитам, частичное досрочное погашение и полное досрочное погашение).

2. Экономика и бизнес:

- Прогнозирование спроса. Анализ данных о покупках и потребительских предпочтениях позволяет предсказывать будущий спрос на товары и услуги, учитывая влияние сезонности, трендов и маркетинговых акций.
- Управление логистикой и снабжением. Прогнозирование поставок и запасов с учетом нестационарности спроса, изменений в производственных мощностях и сезонных факторов.

3. Технологии и инновации:

- Прогнозирование технологических трендов. Использование текстового анализа и машинного обучения для анализа новостей, статей и публикаций [6], позволяющее прогнозировать будущие технологические тренды и инновации.
- Прогнозирование развития индустрий. Анализ данных о развитии отраслей и экономических факторах помогает прогнозировать долгосрочные изменения и сдвиги в структуре производства.

4. Здравоохранение и медицина:

- Прогнозирование эпидемий. Анализ данных о заболеваемости, пациентах и клинических исследованиях [15] позволяет прогнозировать распространение инфекционных заболеваний и эпидемий.
- Прогнозирование пациентских потоков. Использование данных о приемах пациентов, медицинских диагнозах и требованиях к медицинским услугам помогает прогнозировать нагрузку на медицинские учреждения.

5. Энергетика и экология:

- Прогнозирование энергопотребления. Анализ данных о потреблении энергии [17], погодных условиях и динамике производства позволяет прогнозировать будущие потребности в энергии.
- Прогнозирование рисков экологических событий. Анализ данных о загрязнении окружающей среды, климатических изменениях и погодных факторах позволяет прогнозировать возможные экологические кризисы и события.

6. Сельское хозяйство и агропромышленный комплекс:

- Точное земледелие [8-9]. Применение мягких датчиков (Soft Sensors), основанных на интеллектуальном анализе текущих и исторических данных, позволяет прогнозировать урожайность для отдельных участков полей [10].
- Прогнозирование удоев и мясной продуктивности. Использование методов селекционной оценки крупного рогатого скота по мясной и молочной продуктивности, обеспечивающих надёжный отбор генотипов с высокой племенной ценностью и способствующих увеличению живой массы и удоев стада [11].

7. Оборонные технологии и военно-промышленный комплекс:

- Прогнозирование динамики боевых действий. Определение оптимальных стратегий военного управления и адаптация тактики к изменяющимся условиям требуют усовершенствованных методов анализа данных, которые учитывают сложность и динамическую природу современных боевых сценариев.
- Прогнозирование маршрутов целей радиолокации [16]. Анализ исторических данных о движении вражеских объектов, таких как воздушные и морские суда, а также использование современных методов машинного обучения для построения моделей, которые могут предсказывать будущие маршруты на основе текущих данных и обновляться в режиме реального времени с учетом новой информации.

Выводы

Информационные технологии, основанные на интеллектуальном анализе данных, обладают высоким потенциалом в разнообразных областях для прогно-

зирования нелинейных нестационарных процессов. Благодаря способности адаптироваться к сложной динамике с учетом неопределенности, возможности генерировать разнообразные условия развития, предлагаемая информационная технология становится в ряд наиболее эффективных инструментов для принятия решений в условиях быстро изменяющейся среды.

Исследование прогнозирования с применением информационной технологии на основе интеллектуального анализа данных, подтвердило, что описанные методы представляют собой значительный инструментарий для анализа и прогнозирования сложных динамических процессов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данная технология успешно решает широкий круг проблем нелинейности и нестационарности, возникающих в разнообразных областях.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в представлении нового подхода к прогнозированию ННП. Разработанная методика может в дальнейшем применяться в разнообразных сферах деятельности – экономике, технологиях, финансах.

Эффективность рассматриваемой технологии состоит в способности адаптации к сложным изменениям в среде с учетом неопределенности, возможностью генерации альтернативных сценариев развития. Все это делает ее надежным инструментом, на который можно опираться при принятии решений для дальнейшего планирования.

Последующие исследования в области интеллектуального анализа имеют значительный потенциал для развития и совершенствования методологии прогнозирования нелинейных процессов:

1. Расширение спектра данных, используемых для анализа. Это не только структурированные данные, но и тексты, изображения, видеоматериалы, что позволяет учитывать многогранность процессов.
2. Интеграция с новейшими технологиями, такими как анализ графов, использование искусственного интеллекта, что усиливает предсказательные способности модели.
3. Учет при моделировании внешних воздействий и трендов, что позволяет разработать более точные методы для учета внешних факторов, долгосрочных трендов.
4. Возможность применения в комплексных системах управления – интеграция технологии в системы управления, что позволит в дальнейшем принимать решения на основе полученных прогнозов в режиме реального времени [12].

Информационные технологии, основанные на интеллектуальном анализе данных – перспективный инструмент для прогнозирования нелинейных нестационарных процессов. Развитие технологии и ее внедрение в практические приложения в дальнейшем принесет значимый вклад в улучшение качества прогнозов и принятия решений в сложных и динамических средах.

Литература

1. Minitaeva A.M. Analysis of the multi-criteria decision-making problem under conditions of heterogeneous interval uncertainty // Proceedings of the 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: IEEE. 2022. P. 42-45.
2. Минитаева А.М. Принятие решений в условиях интервального задания предпочтений лиц, принимающих решений // Сборник материалов конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2022): 15-я мультиконференция по проблемам управления. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 197-200.
3. Минитаева А.М. Многомодельный подход к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов в задачах оптимального управления // Необратимые процессы в природе и технике: труды 12 Всероссийской конференции, Москва, 31 января-3 февраля 2023 г.: в 2 т. 2023. Т. 1. С. 438-447.
4. Минитаева А.М., Шайтура С.В. Системный анализ и разработка методики моделирования нелинейных нестационарных процессов в системе поддержки принятия решений // Информационно-технологический вестник. 2023. Т. 37. № 3. С. 54-64.
5. Minitaeva A.M. Coefficient estimation of simultaneous equations in the case of stochasticity of exogenous variables // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2543. № 1. P. 012005. DOI 10.1088/1742-6596/2543/1/012005.
6. Минитаева А.М. Языковая модель машинного обучения в социально-политических коммуникациях для кластеризации и обработки публичных обращений граждан в сети Интернет // Искусственный интеллект. Теория и практика. 2024. Т. 5. № 1. С. 14-18.
7. Fenix ипотека: офиц. сайт [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fenix-ipoteka.ru> (дата обращения: 28.04.2023).
8. Шайтура С.В., Коломейцев А.В., Позняк И.И., Минитаева А.М., Прохоров Ю.Н. Точное земледелие как один из аспектов цифровизации сельского хозяйства // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 161-166.
9. Шайтура С.В., Швед Е.В., Неделькин А.А., Сивченко С.В., Минитаева А.М. Управление процессом развития систем точного земледелия в сельском хозяйстве // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 5. С. 28-34.
10. Бахтадзе Н.Н., Максимов Е.М., Дончан Д.М., Лотоцкий А.В., Захаров Э.А. Системы интеллектуального прогнозирования для точного земледелия // Информационные технологии и математическое моделирование систем 2018: Труды международной научно-технической конференции, Одинцово, 19-21 ноября 2018 года. Одинцово: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, 2018. С. 71-74.
11. Джуламанов К.М., Герасимов Н.П., Колпаков В.И., Урынбаева Г.Н. Способ прогнозирования и оценки мясной продуктивности герефордов // Животноводство. 2022. № 1. С. 10-14.

- водство и кормопроизводство. 2015. Т. 92. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposob-prognozirovaniya-i-otsenki-myasnoy-produktivnosti-gerefordov> (дата обращения: 28.04.2023).
12. Минитаева А.М. Многомодельный подход к прогнозированию нелинейных нестационарных процессов в задачах оптимального управления // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 12-14 декабря 2022 года. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2023. С. 1564-1571.
13. Гаврилова Е.Ю., Кузнецов В.И., Попов А.Ю. Алгоритм балансировки нагрузки в распределённых системах, основанный на универсальной величине вычислительной сложности задач // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей Всероссийской научной конференции. В 2-х томах, Москва, 27-28 апреля 2022 года. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. Т. 1. С. 301-309.
14. Гаврилова Е.Ю. Имитационная модель виртуальной инфраструктуры для исследования задач балансировки нагрузки в распределённой системе на базе одноплатных компьютеров Raspberry Pi // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей Всероссийской научной конференции. В 2-х томах, Москва, 27-28 апреля 2022 года. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. Т. 1. С. 294-300.
15. Данилюк Ю.М., Селезнев Д.В., Данилюк С.С. Нейроимплант для трекинга эмоционального состояния человека // Технологии инженерных и информационных систем. 2023. № 2. С. 96-101.
16. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ математических моделей информационных параметров сигналов, обрабатываемых радиолокационными устройствами наблюдения ближнего действия // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 14-20.
17. Артюшенко В.М., Самаров Е.К. Применение алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси в задачах анализа качества электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2006. Т. 2. № 1. С. 17-23.
18. Slepian D. Prolate Spheroidal Wave Functions, Fourier Analysis and Uncertainty // V: The Discrete Case. Bell System Technical Journal. 1978. Vol. 57. P. 1371-1430. DOI 10.1002/j.1538-7305.1978.tb02104.x.
19. Thomson D.J. Spectrum Estimation and Harmonic Analysis // Proceedings of the IEEE. 1982. Vol. 70. P. 1055-1096. DOI 10.1109/PROC.1982.12433.

УДК 004.056.55, 003.26

Методика управления рисками в информационных системах с участием экспертов

Сергей Николаевич Шульженко, доктор технических наук,
профессор кафедры «Информационных технологий и управляемых систем»,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

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

Кирилл Алексеевич Перепелица, аналитик, ПАО Банк ВТБ,
г. Королев, Московская область

В статье рассматривается методика управления рисками при помощи экспертизы оценки риска от конечных пользователей информационной системы, а также некоторые требования к информационной системе для работы с данным методом. Также описывается использования процессного подхода для реализации данной методики.

Эксперты, управления рисками, регистрация рисков, обнаружение рисков, обратная связь.

Methodology for risk management in information systems with the participation of experts

Sergey Nikolaevich Shulzhenko, doctor of technical sciences,
professor of the department of information technologies and control systems,

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

Kirill Alekseevich Perepelitsa, analyst, Bank VTB, Korolev, Moscow region

The article discusses the methodology of risk management using expert risk assessment from end users of the information system, as well as some requirements for the information system to work with this method. The use of a process approach to implement this technique is also described.

Experts, risk management, risk registration, risk detection, feedback.

Эффективное функционирование организации обусловлено всесторонним изучением всех аспектов экономической безопасности, выявлением рисков и угроз, а также принятием мер по их снижению.

Риски организаций можно классифицировать по разным критериям:

- 1) Согласно источнику происхождения (внутренние и внешние);
- 2) В зависимости от вероятности реализации (реальные и потенциальные);

- 3) В соответствии с характером возникновения (политические, конкурентные и другие);
- 4) По степени ожидаемого ущерба (катастрофические, значительные и вызывающие трудности);
- 5) В зависимости от возможности прогнозирования (прогнозируемые и непрогнозируемые);
- 6) По объекту атаки (персонал, информация, финансы, деловая репутация) [3].

При создании информационной системы не всегда возможно предусмотреть все возможные риски и выстроить грамотно процесс по их предотвращению, борьбе с ними, или их обнаружении. Как правило в компании регистрацией и поиском новых рисков занимаются отдельные люди, которые не являются конечными пользователями информационной системы, или людьми которые напрямую взаимодействуют с конечными пользователями. До них может так и не дойти своевременна информация, о таком риске, а получить её только в момент реализации. Поэтому разумно будет подключать и конечных пользователей информационной системы, которые будут передавать запрос для регистрации или оценки обнаруженного риска.

Данный метод управления рисками позволяет своевременно получать информацию о новом потенциальном риске, но он требует подготовки, как информационной системы, так и её пользователей. А также необходимо выработать регламенты передачи риска, его первичной оценки, провести обучения персонала для работы с новым функционалом.

1) Подготовка регламента

Для использования данного метода компания должна подготовить регламент, позволяющий сотрудникам самостоятельно первично оценивать обнаруженный риск. Сформировать критерии, которые должен заполнять конечный пользователь, а также вес каждого из них. Также необходимо учитывать вес самого пользователя. Для подсчета риска удобно использовать простой инструмент, который называется карта рисков. Пример такой карты представлен на рисунке 1.

УРОВНИ ВЕРОЯТНОСТИ	УРОВНИ СЕРЬЕЗНОСТИ ПОСЛЕДСТВИЙ (УЩЕРБА)				
	Незначительный	Умеренный	Значительный	Высокий	Критический
Часто					
Возможно					
Маловероятно					
Редко					
Очень редко					

Рисунок 1 – Пример реализации карты рисков

В контексте карты рисков, критерии представляют собой стандарты или факторы, которые используются для оценки и характеристики рисков. Они предоставляют основу для измерения вероятности возникновения определенных событий и оценки возможного воздействия этих событий на организацию или проект.

Использование критериев обеспечивает систематизацию процесса анализа рисков и предоставляет структурированный подход к оценке вероятности и воздействия рисков, что в свою очередь помогает принимать информированные решения по управлению рисками. Следующим шагом будет создания карты риска. Использованием карты рисков предоставляется возможность тщательного исследования обнаруженных потенциальных угроз с более детальной оценкой как вероятности их возникновения, так и силы их воздействия. Дополнительно этот анализ предоставляет возможность более глубокого выявления, какие риски стоит выделить для приоритетного устранения в первую очередь. Этот этап является неотъемлемой частью более обширного процесса разработки стратегии мероприятий, направленной на обеспечение стабильности компании. Важным аспектом данного подхода является не только выявление ключевых рисков, но и разработка оптимальных шагов для их эффективного управления, что играет фундаментальную роль в создании устойчивого плана по стабилизации финансового положения компании [5]. Критерии, созданные в этой карте, должны быть заложены в требования для добавления функционала информационной системы для возможности пользователей проводить быструю оценку. Также в требования должна быть описана процедура как создания новой записи, так и сортировка опасности риска и его передачи. Сотрудники, отвечающие за регистрацию новых и рисков, и противодействия им, должны получать приоритетно на анализ более опасные риски, этот же подход также позволит более эффективно обрабатывать поступающую к ним информацию и снизит опасность «перегрузки» отдела маловажными событиями. Схему такой реализации представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема процесса создания регламента

1) Добавление нового функционала в информационную систему

Усовершенствование информационной системы, направленное на внедрение дополнительного функционала для учета новых рисков, предполагает ряд ключевых этапов:

a) Анализ Текущей Системы:

Проведение детального обзора текущего функционала системы.

Идентификация пробелов в системе, связанных с учетом и регистрацией

рисков.

b) Определение Требований:

Сбор требований от конечных пользователей и ответственных за управление рисками.

Определение основных характеристик и функционала, необходимых для эффективной регистрации новых рисков.

c) Разработка Нового Функционала:

Проектирование интерфейса для регистрации рисков с учетом удобства использования.

Разработка механизмов для классификации и описания рисков.

Внедрение функционала мониторинга и отслеживания изменений в рисках.

d) Интеграция с Существующей ИС:

Гармоничное внедрение нового функционала в текущую информационную систему.

Проверка на возможные конфликты и взаимодействие с уже существующими модулями.

e) Обучение Пользователей:

Проведение обучающих сессий для сотрудников, ответственных за регистрацию рисков.

Создание руководств по использованию нового функционала.

f) Тестирование:

Проведение тщательного тестирования для обеспечения стабильности и безопасности системы.

Выявление и устранение возможных ошибок и неполадок.

g) Запуск и Мониторинг:

После успешного завершения тестирования запуск нового функционала в режиме реального времени.

Постоянный мониторинг и обратная связь для дальнейшего усовершенствования системы.

h) Документация:

Создание подробной документации, описывающей новый функционал и процессы работы с ним.

i) Поддержка и Обновление:

Постоянная поддержка пользователей и оперативное реагирование на обратную связь. Регулярные обновления системы с учетом новых потребностей и изменений в требованиях к учету рисков. Данный процесс обеспечивает систематичное и эффективное внедрение нового функционала для регистрации рисков сотрудниками компании в информационной системе.

Схема реализации одного цикла добавления нового функционала представлена на рисунке 3.

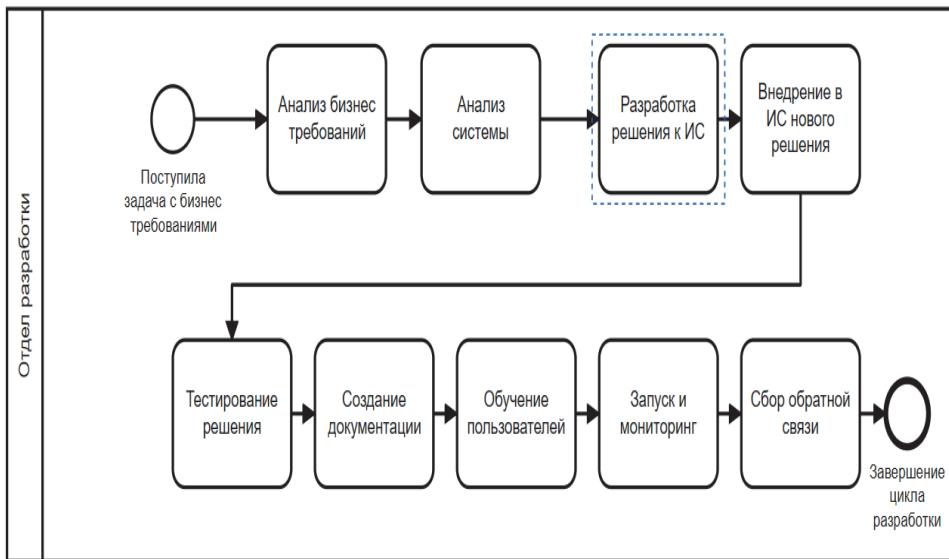


Рисунок 3 – Схема процесса разработки нового функционала
для информационной системы

При доработки информационной системы необходимо учесть все требования нового регламента, вес пользователя, сделать интерфейс максимально удобным, а также для уменьшения потока дублирующихся записей, систему проверки, был ли такой риск уже зарегистрирован, подробнее об этом указано ниже.

2.1) Учет в системе новых данных.

Для регистрации рисков необходимо будет доработать функционал, существующий информационной системы так, чтобы пользователь мог из заранее готовых критериев заполнять форму регистрации риска. Она должна учитывать тип риска, экспертную оценку частоты возникновения, последствий (финансовые, не финансовые), тяжести последствий. Также должно быть поле, в котором сотрудник будет указывать, кем, когда и при каких обстоятельствах был обнаружен риск. Система должна проверять вес пользователя.

Пример. Сотрудник отдела первой линии поддержки в ходе консультации клиента, заметил возможный риск, поскольку клиент пожаловался, что он смог зайти в приложение, не вводя пароль, и принял решение его зарегистрировать для дальнейшей передачи его в профильный отдел. Он заходит в профильный интерфейс и начинает заполнять его: Вид риска, тип риска, с чем связанный. Далее система показывает ему уже зарегистрированные риски, если такой риск уже был найден, но еще не был обработан, он его может открыть и при необходимости дополнить. Если уже обработан, оставить инцидент для дополнительного разбора. Если такой риск не обнаружен, сотрудник регистрирует его самостоятельно, где прикладывает дополнительно описание риска, при каких событиях он произошел, каким образом был обнаружен, и даёт свою экспертную оценку, насколько этот риск часто может произойти, и какова будет тяжесть последствий, и отправляет обнаруженный риск в профильный отдел. При этом, если сотрудник

не прошел все обучающие курсы в соответствии с внутренними регламентами компании, его оценка риска умножается на определенный коэффициент, и проводится сравнение с картой рисков. Если риск попадает в красную зону, то с наивысшим приоритетом отправляется в профильный отдел, если в желтую или зеленую, то с меньшим приоритетом.

Также возможен механизм, где риски, попавшие в зеленую или желтую зону, сначала отправляются руководителю сотрудника, для проверки их релевантности, и после согласования и возможных правок оценки, передаются в профильный отдел или отменяются, в случае не прохождения согласования с руководителем.

3) Обучение сотрудников.

Для эффективного использования данного метода, необходимо разработать обучающие курсы для сотрудников, а также создать регламент оценки их компетенции после прохождения обучения. Здесь также появляется кадровый риск, связанный с качеством обучения персонала, затрат на его обучение, и последующую эффективность персонала. Риски в процессе обучения персонала присутствуют неизбежно. Важно учитывать дуализм риска, где более высокая цель соответствует более серьезному риску. Необходимо осознавать, что риск потери и риск достижения поставленной цели имеют одинаковую вероятность возникновения. Отличие заключается в том, что при благоприятном ходе событий риск приобретения желаемого результата обычно не оценивается заранее.

В контексте обучения персонала, подразумевается вероятность достижения желаемого результата как в процессе обучения, так и после его завершения. Помимо этого также имеется ввиду нанесения организации материального ущерба, связанного с действиями ее сотрудников в процессе обучения или обновления их компетенций. Таким образом необходимо, чтоб финансовые вложения в обучение персонала должны создавать благоприятные навыки позволившие повысить производительности труда или во время разработки новых товаров и услуг, а также усовершенствовать рабочие процессы.

Образовательная функция в развитии персонала несет в себе значительные кадровые риски. В условиях нестабильной экономической обстановки, постоянных изменений методик и технологий, а также многообразия образовательных программ, не все из которых соответствуют стандартам качества, кадровые риски в обучении персонала сильно усиливаются [2].

Исходя из вышеописанного необходимо подходить к созданию курса и применять методы управления рисками, а именно:

1) Стремиться ликвидировать риск.

1.1) Если вы подаете заявку на обучение в сторонние компании, необходимо исключить из выборки компании, вызывающие сомнения в их компетентности. Для минимизации такого риска, нужно собрать больше информации об организации и ее образовательной деятельности, а именно кто преподаватель, какие методы используются для обучения.

1.2) Добавьте в учебный курс больше материала от других авторитетных компаний и, а также привлеките внутренних экспертов для обновления и расши-

рения программы обучения, а также её оценки качества.

2) Снижение рисков.

2.1) Для снижения риска, требуется провести анализ на сколько эффективно обучения по текущей методологии, на сколько оно доступно к восприятию. В качестве теста, можно взять небольшую часть курса для теста.

2.2) Проведение предварительного тестирования как со стороны обучающихся, так и со стороны преподавателей, для оценки их компетенций. Для оценки компетенций преподавателей можно привлечь сторонние компании, для совершения оценки.

3) Компенсаций рисков.

3.1) Проведения массового обучения, позволит создать выборку участников обучения, на основе которой можно оценить эффективность от внедрения обучения. В случае если результаты будут низкие, это будет говорить, что данная методика не эффективна.

3.2) Для снижения не определенности и выбора лучшей программы обучения, нужно проводить обучение разных групп, разными методиками. Также можно использовать комбинированные методики для замера их эффективности. Для повышения эффективности данного метода, необходимо сделать предварительное тестирование, для понимания, какой метод предварительно больше подходит для каждого сотрудника.

4) Страхование риска.

4.1) С точки зрения снижения рисков и страхования, целесообразно было бы при заключении договора с посторонними организациями получить от них гарантии успешности обучения, а также разработать систему качества обучения.

4.2) Если учебный персонал не отвечает требованиям организации, они вправе его изменить.

Идентификация и анализ рисков в процессе обучения работников позволяет создать комплекс мероприятий по их предотвращению и снижению. Использование эффективной системы управления рисками предотвращает потенциальный материальный ущерб или иные убытки организации [4].

4) Использования зацикленного процессного подхода.

Использование этого метода требует большего, чем просто создание одноразовой системы. Требуются постоянные обновления. Разумно использовать методы обслуживания для повышения производительности. Однако он имеет следующие недостатки:

1) Добиться этого при нынешней организационной структуре сложно. Внедрение стратегических процессов в организации или отдельных процессов означает улучшение системы, но также приносит некоторые проблемы, которые требуют тщательного и профессионального решения.

Во-первых, это требует много времени, поскольку изменения, связанные с процессами управления, необходимо вводить поэтапно, чтобы минимизировать влияние на текущую деятельность организации. Это может означать пересмотр процессов, обучение сотрудников новым методам работы и постепенное внесение изменений.

Это также требует значительных ресурсов, включая финансовые, человеческие и знания. Если вам необходимо внести изменения в структуры и процессы вашей организации, для обеспечения успеха изменений может потребоваться дополнительное финансирование и ресурсы.

Однако, пожалуй, самым трудным аспектом принятия такого способа работы является вероятность сопротивления со стороны сотрудников. Изменения в организационной структуре и стилях работы могут вызвать беспокойство и страх у сотрудников. Поэтому важно не только проводить обучение новым мерам, но также оказывать поддержку и общение для обеспечения плавного перехода. Поэтому важно предоставить не только обучение новым процессам, но и обеспечить поддержку и коммуникацию, чтобы смягчить переходный процесс [5].

2) Требует постоянное улучшение и обновление.

Один из самых важных стратегических элементов в управление бизнес-процессами, является поддержка эффективности и соответствуию актуальным современным вызовам процессного подхода. Процессный подход обязан постоянно обновляться и адаптироваться под новые вводные максимально оперативно. Имеется ввиду что, организация для повышения собственной эффективности обязана разрабатывать механизмы, позволяющие ей оперативно реагировать на все изменения рынка, законодательства, новых методик разработки и других не менее важных факторов. Для соответствия этой модели нужно создавать систему мониторинга окружающей её среды, проводить анализ полученных данных, и непременно брать в учет еще и обратную связь как от клиентов, так и от самих сотрудников организации.

Другие не менее важные характеристики любой успешной и эффективной, это гибкость и умение быстро изменяться. Все бизнес процессы в организации должны иметь возможность не только при необходимости изменяться, но и быть заменены на другие. Для этого организации необходимо закладывать этот фактор, еще на этапе проектирования бизнес процесса. Нельзя и забывать про обучение сотрудников, они должны быть готовы быстро переходить с одного процесса на другой. В этом может помочь создание корпоративной культуры, в которой неотъемлемой частью будет постоянное развитие и изучение новых методов. На основе выше сказанного организация должна создать непрерывный конвейер обучения для своих сотрудников, что позволит сотрудникам и всей организации в целом быстро адаптироваться к новым изменениям.

Благодаря созданию и интеграции в процессы организации системы непрерывных улучшений и адаптаций бизнес-процессов, повышается общая операционная эффективность организации, поскольку более эффективные бизнес процессы, повышают конкурентную способность компаний, что позволяет занимать и удерживать более большую нишу на рынке. Но для внедрения такой системы, организация должна обеспечить всеми необходимыми средствами сотрудников, постоянно оценивать и при необходимости пересматривать механизмы управления, не забывая о самой корпоративной культуре. Сотрудники должны понимать, что каналы обратной связи работают, и что их вклад через эти каналы также значим для компаний.

Фактор развития сотрудников, в том числе и через их обучение, также не менее важен, поскольку благодаря нему сотрудники будут быстро и успешно адаптироваться к новым изменениям или новым процессам. Обучающие программы должны быть непрерывными, сотрудники должны постоянно не только получать, но и закреплять новые навыки, быть готовыми ко всем изменениям. При этом эмоциональный фон к обучению нужно создавать позитивным, доносить до сотрудников важность проводимых обучающих программ, не сводить это в рутину. Они должны понимать, для чего оно проводится, какой вклад обучения вносит, в их эффективность и соответственно эффективность всей компании. Обучение должно быть закреплено и на уровне корпоративной культуры.

Другой важный аспект, вносящий общий вклад в эффективность организации, это система контроля качества управления бизнес процессов. Грамотно настроенная система позволит если не заблаговременно, то своевременно выявить проблемные зоны бизнес процессов, подсветить их неэффективность. В системе контроля качества должно быть уделено внимание к постоянному изучению новых идей, их анализу, а также отслеживанию всех результатов нововведений. Оценка должна производиться, как внутри компании, так и за её пределами, в зависимости от того, на какие метрики повлияло данной изменение.

На основе выше сказанного, можно подвести итог, что непрерывное изменение процессов – это в первую очередь гибкий и динамичный процесс, требующий от организации готовности к изменениям, умение понять когда они требуются, а также является непрерывным процессом. Компания которая готова отвечать на все вызовы рынка должна быть готова ко всем этим изменениям. При этом процесс инноваций сопровождается рисками потери гибкости.

Опираясь на процессный подход, организация может излишне стандартизировать процессы, с целью повысить свою эффективности и снизить риски. Цель получать более предсказуемый результат может быть оправдано, но важно не забывать, что слишком строгая политика ведения операционной деятельности может серьезно снизить гибкость организации, что повлечет за собой невозможность к быстрой адаптации, к новым вызовам на рынке.

Хоть стандартизация и помогает сделать процессы более предсказуемые, а метрики более повторяемые, её нельзя называть универсальным решением для всех процессов. В современном мире, излишняя стандартизация легко может привести к тому, что на любой новый вызов компания не будет успевать адаптироваться. Особенно осторожно нужно подходить к процессам, которые сильно зависят от внешних изменчивых факторов.

Но нельзя сказать, что стандартизация несет только минусы. Гибкость организации важна, она позволяет компании не только выходить на новые рынки, но отвечать вызовам тех, на которых присутствует, но в отсутствие стандартизации управления процессами будет затруднительно обеспечивать их безопасность, да и их поддержка будет сильно осложнена.

Говоря о процессном подходе, нельзя делить мир только на черное и белое. Необходим баланс между стандартизацией и гибкостью. Организация должна разрабатывать правила и регламенты взаимодействия не только внутри ко-

манд, но и между ними таким образом, чтобы компания не теряла гибкости, при этом был порядок внутри её. Одним из способов, как этого можно добиться, это периодическая оценка и при необходимости обновления текущих регламентов. Благодаря этому компания сможет найти компромисс, между стандартизацией и гибкостью.

Современные организации все чаще стали отходить от традиционных жестких форм управления бизнес процессами. Все меньше становится стандартизации, все больше отдает предпочтение гибким методологиям. Рынок требует от организаций быть более гибкими и адаптивными к новым изменениям. Неспроста Agile становится все более популярным. Agile позволяет создавать компании более адаптивные структуры, которые могут отвечать новым вызовам в кратчайшие сроки. При грамотном использовании процессного подхода получается найти баланс между стандартизацией, обеспечивающей надежность и безопасность процессов и гибкостью, позволяющей более быструю эффективность и адаптивность под новые решения. Также контроль за процессами становится более простым и эффективным, благодаря применению такого гибридного подхода.

Реализация такого подхода внутри организаций, позволяет ей получить конкурентное преимущество за счет того, что компания будет лучше использовать возможности роста и лучше удовлетворять запросы клиента. Говоря о изменениях внутри организаций, нельзя не отметить, что благодаря такому подходу и сотрудники становятся более вовлеченными в процессы компании, поскольку многие сотрудники могут внести вклад даже в сложные процессы, за счет предложенных идей своих инноваций.

Основные преимущества процессного подхода это:

1) Ориентирован на результат

Процессный подход в аспекте управления бизнес процессами сосредоточен путем пристального внимания к процессам организации на финальный результат. Он предполагает выделение как основных задач и целей в достижение краткосрочных задач в локальных процессов, так и в контексте всей организации. Особо важная часть использования процессного подхода, это структурирование и описание всех процессов организации, при этом тщательно анализируется и описывается не только сам процесс, но и его взаимодействие с другими процессами, их связи и влияние друг на друга, а также их зависимости. Помимо этого оценивается и их эффективность, выделяются ключевые метрики. Они и позволяют оценить на сколько процесс в полной мере соответствуют поставленным целям и задачам

Процессный подход – это постоянное совершенствование. Нельзя улучшить единоразово процесс, он должен постоянно оцениваться, анализироваться на слабые места и на основе этого оптимизироваться. Эти изменения оцениваются на сколько они соответствуют динамике рынка и запросам клиентов.

Но не только на процессы ориентирован сам процессный подход, он также ориентирован и на клиента. Процессы в организации разрабатываются с конечной целью покрыть запросы клиента, предоставить ему качественные подруги и услуги. Процессный подход, это про внимание к деталям, для максимально

эффективного управления ресурсами. И для этого требуется управление изменениями, требуется тщательно контролировать все изменения которые происходят, и какой эффект они несут.

Благодаря этим принципам управления организация становится не только более конкурентной, за счет покрытия запросов клиентов, но и более эффективной с точки зрения управления ресурсами.

2) Гибкость и адаптивность как принцип

Хоть ранее и упоминалось, что при стандартизации процессов есть риск потери гибкости, процессный подход позволяет, не потеряв управление над процессами, сохранить гибкость в управлении. Разбив деятельность организации на управляемые и взаимодействующие бизнес процессы между собой, можно более четко определять цели, этапы и доступные ресурсы для достижения конечных целей.

Особенно ярко гибкость процессного подхода проявляется в:

а) Быстрой адаптации к изменениям, появившихся от рынков и их условий. В отличии от продуктового подхода, процессный подход в управлении бизнес процессами позволяет более детально настраивать процессы, под новые реалии.

б) Менее затратное и более эффективное изменений, в бизнес процессы, поскольку проведя декомпозицию бизнес процессов до необходимого минимума, можно быстро вносит изменения как в небольшие, так и в глобальные процессы.

в) Более легкий контроль за каждым этапом за счет того, что легче делать проверки и точечный надзор, за счет декомпозиции. Таким образом, облегчается выявление недостатков и их последующее исправление. Поскольку процессный подход даёт возможность следить за каждой частью процесса, может возникнуть ситуация, что компании дешевле принять риск, чем принимать меры к его обходу, но за счет размеров процесса риски становятся менее значимы.

г) За счет того, что гибкие и часто изменяющие процессы требуют от сотрудников постоянное повышение своей квалификации, данный подход позволяет создать систему постоянного обучения, поддерживающий уровень компетенции сотрудников на высоком уровне. При этом обучение можно создавать даже точечное и за счет этого простое, что уменьшает сроки подготовки к новым изменениям своих.

Помимо выше перечисленных преимуществ, процессный подход позволяет сделать максимально эффективной подотчетности внутри организации. За счет того, что каждый бизнес процесс четко определен, как и его цели, а также роли сотрудников, собирать отчетность становится проще. При грамотно созданной системе документации и распределению ответственных, сам процесс становится более прозрачным и простым.

3) Улучшение коммуникации и сотрудничества

Процессный подход также повышает эффективность взаимодействия между командами. В первую очередь это достигается за счет того, что процессы четко поделены и взаимосвязаны между собой. Различные команды взаимодействуют друг с другом, лучше понимают, чем занимается каждая из них, на каком

этапе они находятся и что планируют изменять. Это устраниет непрозрачность взаимодействия друг с другом и позволяет более точно планировать изменения, которые затрагивают сразу несколько команд или отделов.

Помимо того, поскольку процессный подход отражает под собой постоянное улучшение процессов и всей организации в целом, он и улучшает корпоративную культуру, за счет более тесного общения между сотрудниками. Это создает благоприятную атмосферу на стабильное и долгосрочное взаимодействие.

Таким образом, данный подход позволяет создать в организации такую структуру взаимодействия, которая обеспечит прозрачное и эффективное взаимодействие между сотрудниками в организации, они будут более погружены не только в свои обязанности и задачи, но смежных подразделений, что неприменно скажется на общем эффективности при планирование и решение задач.

Нельзя не отметить, что вышеописанные преимущества процессного подхода, способствуют более эффективно управлять рисками, за счет того, что бизнес процессы декомпозированы и четко определены, владельцы этих процессов могут четко определять риски в зоне их ответственности и предпринимать меры для борьбы с ними. Для большей наглядности на рисунке 4 приведен пример использования предложенной методики по управлению рисками с использованием процессного подхода.

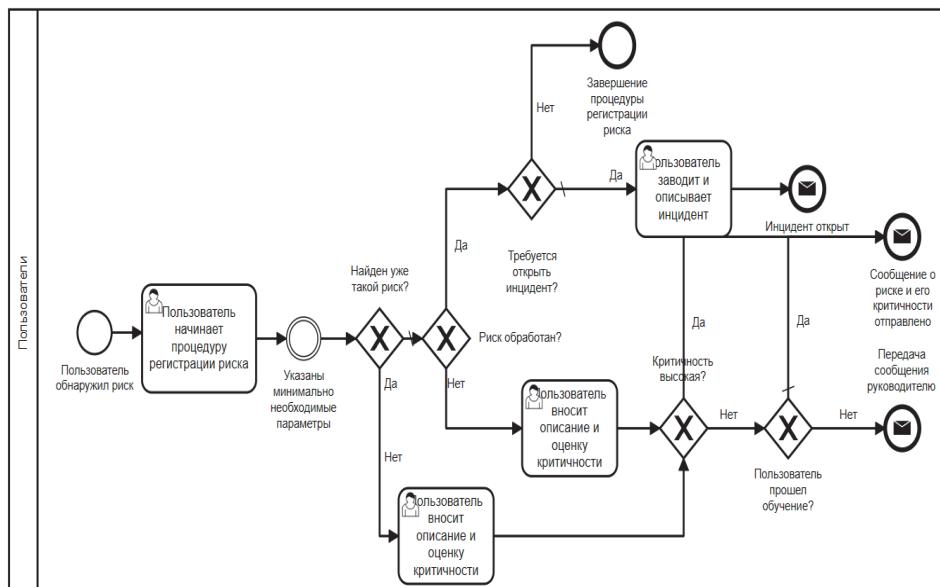


Рисунок 4 – Схема взаимодействия пользователя с информационной системой при регистрации рисков

В заключение данной научной статьи представлен новый способ управления рисками, который демонстрирует потенциал для существенного улучшения эффективности и устойчивости организаций. Используя новую методику совместно с процессным подходом, предложенным в данной статье, организаций

могут не только четко идентифицировать потенциальные риски, но и превентивно их обнаруживать, что дает преимущество в борьбе с ними.

Важным элементом предложенного способа управления рисками является также повышение коммуникации внутри организации и обучение персонала. Четкость в определении ролей и ответственности, а также структурированный подход к обучению, содействуют формированию высококвалифицированных и ответственных команд.

Процессный подход, выделенный в данной статье, не только обеспечивает более эффективное управление рисками, но и создает благоприятные условия для инноваций и постоянного улучшения. Эта методика представляет собой важный вклад в область управления рисками и может стать фундаментом для дальнейших исследований и разработок в этой области.

Литература

1. Кононов А.А. В сборнике: Математика, информатика, естествознание в экономике и обществе (МИЕСЭКО – 2015). Труды Всероссийской научной конференции: в 2-х томах. 2015. С. 65-68.
2. Кузнецова М.Е., Никитенко Е.А. Управление кадровыми рисками в процессе обучения персонала организации // Materials of the XI international research and practice conference. Vol. I.-April 6th-7th, Munich. 2016. С. 195-199 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eusciene.de/ru/archive.php> (дата обращения: 31.12.23 г.).
3. Тупицина Е.А. Карта рисков как один из инструментов определения основных угроз безопасности организации [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elib.utmn.ru/jspui/bitstream/ru-tsu/9127/1/ebs2021_456_462.pdf (дата обращения: 16.11.23 г.).
4. Федосеев В.Н., Цирлин С.Э. Минимизация кадровых рисков в деятельности компании Профессиональное издательство // Кадровые решения. № 12. 2006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.profiz.ru/kr/12_2006/tfyrtfyrtugr/ (дата обращения: 02.01.24 г.).
5. Куликов М.Г. Процессный подход в управлении организацией // Молодой ученый. 2021. № 14(356). С. 82-84 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/356/79720/> (дата обращения: 10.01.2024).

УДК 629.7.01

**Концептуальные основы синергетической технологии
исследовательского проектирования подвижных
ракетно-космических комплексов, предназначенных для запуска
малых космических аппаратов**

Григорий Григорьевич Вокин, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Российской Федерации, зав. базовой кафедрой,
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,
НИИ космических систем им. А.А. Максимова – филиал АО «ГКНПЦ
им. М.В. Хруничева», г. Королев, Московская область,

Марат Шамильевич Насибулин, кандидат технических наук, руководитель
филиала АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» в г. Королев –
директор «НИИ КС им. А.А. Максимова», г. Королев, Московская область

*В статье рассматриваются на принятом уровне общности актуальные
вопросы оперативного доступа в космос в условиях кризисных ситуаций на ос-
нове использования предлагаемых для создания подвижных ракетно-космических
комплексов (ПРКК), формируемых на базе ракет-носителей лёгкого класса
(РНЛК) и оснащаемых малыми космическими аппаратами (МКА). Одновременно
предлагается методический подход и определяется рациональная последова-
тельность технологических этапов синергетического исследовательского про-
ектирования упомянутых комплексов с целью предварительного формирования
их технического облика первого приближения на основе использования про-
граммно-аппаратных средств поддержки, предназначенных для автоматизации
и интеллектуализации процессов исследовательского проектирования.*

Кризисная ситуация, подвижный комплекс, ракета-носитель лёгкого класса, ма-
лый космический аппарат, этапы проектирования, технический облик, средства
компьютерной поддержки, автоматизированные рабочие места.

**Conceptual foundations of synergetic technology, for research design of
mobile rocket and space complexes designed to lauch small spacecraft**

Grigoriy Grigorievich Vokin, Doctor of Technical Sciences, professor,
honored worker of science of the Russian Federation,
Chief Scientific Officer in Maximov Space Systems Research Institute – a branch of
FSUE Khrunichev State Research and Production Space Center,
Korolev, Moscow region,

Marat Shamilievich Nasibulin, Candidate of Technical Sciences,
Head of the branch of JSC GKNPTs im. M.V. Khrunichev in the city of Korolev –

director of the Research Institute of CS named after A.A. Maksimov,
Korolev, Moscow region

The article describes at the accepted level of generality the topical issues of operational access to space in crisis situations based on the use of mobile rocket and space complexes proposed for the creation/ At the same time a methodological approach is proposed and a rational sequence of technical stages of technological stages of synergetic research design of the mentioned complexes is determined in order to effectively form their technical appearance of the first approximation based on the use of the software and hardware support tools for automation and intellectualization of research design processes.

Crisis situation, mobile complex, light class launch vehicle, small spacecraft, design stages, technical appearance, software and hardware of computer support intended for automation and intellectualization of research design processes.

1. О назначении, ролях и актуальности создания подвижных ракетно-космических комплексов

На заре начала космической эры в середине 50-х годов 20 века академик М.В. Келдыш (в то время в открытой прессе он представлялся как «главный теоретик космонавтики» без упоминания фамилии, а позже он был избран президентом Академии наук СССР) обратился с письмом к ведущим учёным нашей страны и к ряду научно-исследовательских организаций с вопросом: что можно ожидать от запуска спутника и от исследований космического пространства [1]? После анализа, обобщения и ранжирования ответов оказалось, что в ряду ожидаемых сведений в результате выполнения такой операции как «обзор земной поверхности» было определено им по значимости лишь 7-е место после таких сведений, как «высота атмосферы», «величина магнитного поля Земли», «состав потока микрочастиц» и т.п. Впоследствии, как мы теперь знаем, самым главным достижением с выходом на практическое использование результатов оказались операции, связанные именно с обзором и изучением Земли и её окрестностей с высот полёта спутников.

Именно благодаря спутникам мы можем получать важную космическую информацию в интересах обороны страны и её социально-экономической деятельности. Более того, на этой основе были созданы метеорологические системы, системы телекоммуникаций, навигации и т.п.

Этот исторический факт показательно свидетельствует о трудностях формирования верных прогнозов в области науки и техники. Заметим, что парадоксы такого рода в науке и технике имели место далеко не редко, в том числе и в области ракетно-космической техники тоже.

Переходя непосредственно к изложению материалов статьи следует, прежде всего, отметить, что актуальность получения информации из космоса не только не уменьшилась со временем, а, наоборот, только возросла, при этом возросла, в первую очередь, в интересах обороны страны.

Как известно, космические аппараты различного назначения и возможностей (разведывательные, связные, навигационные, научные и т.п.) в настоящее время запускаются со стартовых площадок космодромов, координаты которых известны, при этом они имеют малую живучесть и не прикрыты надёжно средствами ПВО. В связи с этим, учитывая возможности крылатых ракет и беспилотников дальнего действия, стартовые комплексы в условиях кризисных военно-политических ситуаций могут быть атакованы (а к этому надо быть готовыми всегда) и выведены из строя. Кроме того, в условиях упомянутой ситуации могут быть выведены из строя также наши космические аппараты, выполняющие важные функции и поставляющие необходимую информацию, в том числе и о вероятном противнике. Очевидно, что в такой ситуации страна не будет иметь оперативный доступ в космос. При этом ситуация отягощается также тем обстоятельством, что в стране имеется всего 4 космодрома, а на каждом из них имеется всего по несколько стартовых площадок и запускаются с них ракеты среднего и тяжелого класса, а оснащаются они спутниками как правило, многофункциональными. В то же время очевидно, что в кризисной ситуации надо иметь не десятки, а сотни спутников для потенциального обеспечения Вооружённых сил необходимой информацией. Об этом свидетельствует, в частности, опыт специальной военной операции на Украине. Беспилотники могут быть эффективны в относительно близлежащей «серой» зоне в районе боевого соприкосновения войск, в то время как космические аппараты могут поставлять инструкцию как об окрестностях зоны соприкосновения, так и о коммуникациях в глубоком тылу противника.

Подобная ситуация сложилась в 60-х годах прошлого столетия, когда были созданы боевые ракетные комплексы шахтного базирования. При этом надежды на их неуязвимость со временем рассеялись в связи с тем, что координаты шахтных пусковых установок стали известны, а точность попадания ядерных боеголовок существенно повысилась. Эффективным выходом из этой ситуации явилось создание подвижных боевых ракетных комплексов (БРК) грунтового, железнодорожного и морского базирования [2].

Как показывает анализ, упомянутую выше проблемную кризисную ситуацию логично разрешить аналогичным путём, т.е. стартовые комплексы ракетносителей, оснащённых космическими аппаратами, перевести на мобильное базирование, при этом, в первую очередь, на грунтовое базирование, потому что имеется большой задел и опыт создания и эксплуатации подвижных боевых ракетных комплексов. При этом, как предсказывает опыт, в качестве ракетносителей наиболее целесообразно использовать ракеты лёгкого класса, а в качестве спутников – малые космические аппараты весом, например, до 500 кг. Важно отметить, что хотя МКА имеют, как правило, узкий диапазон функций, зато их можно оперативно запустить в достаточном количестве. Как подсказывает опыт, ПРКК в мирное время могут базироваться на космодромах или на других полигонах, а в угрожаемый период переходить в заданные скрытые районы дислокации, примыкающие, например, к федеральным шоссейным трассам. При этом каждый ПРКК может иметь несколько пунктов временного базирования с

соответствующей инфраструктурой, на которые он может переехать с федеральной трассы по специальной дорожной ветке. Отметим также, что при необходимости на пунктах временного базирования могут храниться запасные ракетоносители и МКА, а также другое необходимое оборудование. При этом должна быть обеспечена маскировка, препятствующая обнаружению ПРКК на каждом пункте базирования. Более того, целесообразно также устанавливать и средства защиты от наземного и воздушного нападения.

2. Об основных методических этапах синергетической технологии исследовательского проектирования ПРКК и их важнейших составных частей

Учитывая структурный состав подвижных БРК и многолетний опыт их эксплуатации, а также то обстоятельство, что подвижные ракетно-космические комплексы должны быть в значительной степени автономными и самодостаточными, можно приблизённо спрогнозировать структуру ПРКК, назвав, по крайней мере, важнейшие её составные части. В связи с этим, в первую очередь, можно назвать стартовую платформу с ракетой-носителем, оснащённой МКА, подвижный пункт управления и связи, машины для обитания боевого расчёта и бойцов охраны и обороны, энергоустановку, медпункт, блок питания и т.д. При этом надо отметить, что функции названных и неназванных составных частей ПРКК очевидны, поэтому акцентировать внимание на описание их функций нет необходимости.

Формирование синергетической технологии предполагает выявление целесообразных этапов и их последовательности при проведении этой методической процедуры [3].

Как показывает анализ жизненных циклов широкого спектра технических изделий, в первую очередь оборонного назначения, в основе их «жизни» можно выделить следующую методологическую цепочку-последовательность, состоящую, как правило, из таких этапов, как:

- потребности в средствах для обороны страны и требования заказчика, замысел изделия и его функциональное назначение,
- теоретико-изобретательский поиск,
- предварительное формирование структуры изделия и выбор физических принципов действия,
- построение вербальных, математических и физических моделей,
- синергетическая оптимизация характеристик и выбор параметров изделия,
- определение аванпроектного технического облика,
- эскизное и техническое проектирование,
- изготовление, испытания, эксплуатация и применение.

Есть основания отметить, что в силу смыслового наименования этапов контент их можно считать понятным и особых пояснений в связи с этим не требуется. Есть основания полагать также, что подлежащие рассмотрению ПРКК и их составные части исключением с точки зрения технологии проектирования не являются. В связи с этим при формировании синергетической технологии исследо-

довательского ориентирования отдельные этапы из упомянутых выше будут в необходимой степени рассматриваться более детально с учётом, в первую очередь, их важнейших особенностей, что и составляет одну из основных задач статьи.

Оставаясь на уровне концептуальных рассмотрений и не переходя при этом на излишнюю детализацию, отметим некоторые ключевые моменты, относящиеся к формированию синергетической технологии исследовательского проектирования.

Как известно, исследовательское проектирование изделий начинается с поисков адекватных ответов на удовлетворение потребностей и требований заказчика, в результате чего формируется технический облик первого приближения, который затем последовательно улучшается в результате использования ряда методических приёмов.

Одним из таких приёмов является построение тезаурусов для одного или группы близких этапов. Под тезаурусом понимается совокупность баз знаний, баз данных, баз производственных правил, совокупность статистических и аналитических зависимостей, набор методических рекомендаций и т.п. Образно говоря, у каждого опытного проектанта есть в голове свой «тезаурус», но им воспользоваться многие не могут. Можно утверждать, что научно-техническое сообщество заинтересовано в создании тезаурусов общего пользования. Они во многом будут универсальны, потому что могут продуцировать опыт огромного числа людей. Такого типа тезаурусы могут широко использоваться при построении систем компьютерной поддержки, в частности, деятельности проектантов.

Другим эффективным приёмом является использование синергетической оптимизации. Не детализируя эту процедуру, содержание её будет видно из следующего примера. Пусть в изделии имеются параметры P_i , $i=1,2,\dots,n$, с помощью вариации которых изменяются его характеристики U_j , $j=1,2,\dots,m$. Заметим, что параметры P_i являются величинами, которые являются переменными вербально-феноменологических, аналитических, статистических или физических моделей проектируемых изделий. Зависимости $U_j = U_j(P_i)$, как правило, редко бывают явными. Они сложны при вычислениях и имеют много экстремумов. В связи с этим оптимизация осуществляется путём вариации параметров P_i , детерминированным или случайным образом. В реальных случаях при оптимизации, как правило, улучшается одна из характеристик, а другие, например, часто ухудшаются. Во избежание этого характеристики оптимизируются все, например, последовательно, но согласованно. Достигается согласованный (синергетический) эффект следующим образом. Для всех параметров P_i устанавливаются, исходя из опытных соображений, допустимые диапазоны их изменения: $P_{ih} \leq P_i \leq P_{ib}$, где P_{ih} , P_{ib} – нижняя и верхняя границы значений. Для характеристик также устанавливаются границы: $U_{jh} \leq U_j \leq U_{jb}$.

Оптимизация проводится всех характеристик U_j последовательно путём варьирования всех параметров P_i , при этом определяются значения всех характеристик и проверяются условия нахождения их значений в допустимых диапазонах. Если значения хотя бы одной из них выходят за границы допустимого ин-

тервала, значение соответствующего параметра не принимается в качестве рабочего варианта.

В результате многократного циклического перебора всех параметров и характеристик, удовлетворяющих упомянутым требованиям, получится некоторое множество вариантов параметров и характеристик. Из этого множества вариантов выбирается рабочий вариант, который характеризуется тем, что важнейшая (по мнению проектанта или группы экспертов) характеристика U_c^0 имеет наибольшее значение, а другие характеристики и параметры удовлетворяют заданным ограничениям. Такой вариант можно назвать синергетически предпочтительным. Технический облик этого варианта назовём техническим обликом первого приближения, который и будет приниматься за основу для дальнейшей проработки. Можно полагать, что при проведении такой оптимизации все характеристики изделия будут подняты согласованно до максимально возможных своих уровней. Если же не удастся найти рабочие варианты параметров и характеристик, то необходимо расширить допустимые их диапазоны или изменить экспертным путём структуру и конструкцию изделия вплоть до изменения физического принципа её действия.

Третьим методическим приёмом рассматриваемой технологии, который назовём «приёмом обратного движения», является способ, который заключается в том, что важнейшие параметры технического облика изделия, например, целевой аппаратуры МКА, определяются приближённо по величине требуемых потребителем-заказчиком значений важнейших параметров.

Существо этого приёма можно продемонстрировать на примере рассматриваемого ПРКК. В данном случае, например, с использованием сведений из тезауруса по требуемой величине разрешений снимков, например, 0,3-0,4 м на местности с высоты орбиты 500 км возможно определить важнейшие параметры целевой фотоаппаратуры, а с учётом и других устройств, например, солнечных панелей, можно определить важнейшие характеристики МКА, который является полезной нагрузкой ракеты-носителя.

Применив затем процедуры баллистического проектирования возможно определить важнейшие параметры ракеты-носителя, после чего также с использованием данных из соответствующего тезауруса определить важнейшие параметры технического облика стартовой платформы ПРКК.

Четвёртым объединяющим приёмом формирования синергетической технологии исследовательского проектирования на примере синтеза технического облика ПРКК первого приближения является компьютерная поддержка проектировщиков.

3. Информационно-когнитологическая и вычислительная поддержка процессов синергетической технологии формирования технического облика ПРКК первого приближения на основе использования программно-аппаратных средств автоматизации и интеллектуализации работ по исследовательскому проектированию

Прошли или проходят времена, когда конструкторское бюро представлялось в виде большого зала, заставленного кульманами, за которыми работали конструкторы, а между рядами кульманов ходил иногда главный конструктор,

беседовал, расспрашивал и советовал что-то конструкторам, потому что он владел большим объёмом информации и опытом.

В настоящее время, когда внедряются в процессы проектирования элементы искусственного интеллекта, ситуация носит другой характер.

Сейчас даже конструктор средней руки, который вооружен современными программно-аппаратными средствами, владеет информацией в объёме, намного превосходящем объём запасов знаний главного конструктора, но наверняка можно утверждать, что главный конструктор на порядок может превосходить своих сотрудников по уровню творческой продуктивности, масштабу мышления и глубине понимания предметной области своей профессии. Специалисты именно с такими природными качествами, как правило, и выдвигают новые и эффективные научно-технические решения и предложения, именно такие специалисты являются двигателями прогресса в науке и технике. Для рядового конструктора упомянутая информация – это своего рода инструментарий, который сам по себе эффекта не даёт, однако упомянутый инструментарий даёт большой эффект, когда он умело и творчески используется в определённой предметной области. Элементы искусственного интеллекта выполняют, как может показаться несколько странным, формальную запрограммированную работу. Он только усиливает человеческий интеллект в части проведения вычислительных и поисковых операций так же, как, образно говоря, механизмы усиливают силу наших мышц.

Надо отметить, что важнейшим элементом человеческого интеллекта является творчество, когда открывается что-то новое, например, фундаментальные законы в физике, химии или биологии. Именно благодаря творчеству человек создал мир машин, аппаратов и приборов, которых нет в природе, на основе открытых законов природы. Есть основания полагать, что это тоже такие же фундаментальные достижения *Homo sapiens*.

Программно-аппаратные средства могут быть эффективным инструментом формирования технических обликов требуемых практикой изделий, которые творчески строятся конструктором на основе использования огромных информационных ресурсов, хранящихся в тезаурусах изделий этого класса как средства, способные в должной мере отвечать требованиям потребителя-заказчика по характеристикам и исполняемым функциям. При таком подходе внедрение в практику исследовательского проектирования элементов искусственного интеллекта является эффективной поддержкой и ускорителем поисковых проектных работ. На рисунках 1 и 2 представлены обобщённые блок-схемы системы поддержки и автоматизированных рабочих мест по формированию технических обликов первого приближения рассматриваемых в статье ПРКК и их основных составных частей. Представленные на рисунках средства являются, своего рода, эффективными «помощниками» при выполнении поисковых проектных работ.

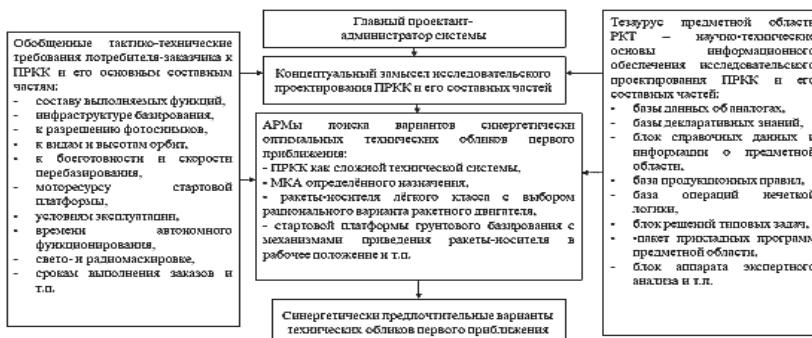


Рисунок 1 – Обобщенная блок-схема системы компьютерной поддержки синергетической технологии исследовательского проектирования ПРКК и его важнейших составных частей



Рисунок 2 – Обобщённая блок-схема АРМ формирования синергетически оптимальных технических обликов ПРКК в целом и его составных частей

Необходимо отметить, что к настоящему времени процессы создания автоматизированных систем компьютерной поддержки достаточно хорошо отработаны и зафиксированы в целом ряде стандартов и в руководящих документах разработчиков таких систем. Это касается как создания средств хардвера, так и софтвера. При этом в основу создания высококачественного информационного, лингвистического, программного и математического обеспечения целесообразно положить выполнение таких принципов, как системность, целенаправленность, функциональная полнота, возможность модернизации, сопровождаемость и декомпозиция процесса синтеза упомянутых продуктов на фазы, стадии и этапы

[4].

В качестве положительного эффекта от использования упомянутой системы поддержки следует отметить:

- сокращение трудозатрат и времени на выработку проектных решений;
- освобождение проектантов от рутинной работы и повышение на этой основе творческой их отдачи;
- использование большего объёма информации при поиске рациональных технических решений;
- резкое увеличение числа вариантов возможных решений и возможность выбора среди них наиболее предпочтительного.

Следует отметить также, что помимо прямого назначения система компьютерной поддержки может быть использована как инструмент для деловых игр и повышения квалификации проектантов, особенно начинающих.

Заключение

В статье обосновано предложение о необходимости и возможности обеспечения оперативного допуска в космос в условиях кризисных ситуаций на основе использования подвижных ракетно-космических комплексов, например, грунтового базирования, при этом в первом приближении определена их структура и способ базирования.

Предложенная одновременно технология определения технического облика первого приближения важнейших составных частей ПРКК сформирована на основе использования возможностей синергетической оптимизации характеристик проектируемого изделия с учётом ограничений, накладываемых на величины параметров изделия, исходя из условий возможностей его технической реализации.

Повышению качества поисковых исследований и сокращению времени их выполнения существенно может способствовать предложенная схема построения компьютерной поддержки на основе соответствующих аппаратно-программных средств оптимизации и интеллектуализации процессов поиска предварительных обликов проектируемых изделий.

Литература

1. Кантемиров Б.Н. Михаил Клавдиевич Тихомиров. 2014, М., Наука, 214 с.
2. Стратегические ракетные комплексы наземного базирования. М., «Военный парад», 2007. 248 с.
3. Вокин Г.Г., Азаренко Л.Г. Концептуальные основы автоматизации исследовательского синергетического проектирования сложных технических объектов с использованием гибридных экспериментальных систем. Труды 4 ЦНИИ МО. № 147. Т. 1. 2019.
4. Вокина С.Г. Методология эффективного управления экономико-инновационной деятельностью многопрофильных предприятий сферы услуг. Королёв, Технологический университет им. А.А. Леонова. 2018. 260 с.

УДК 661.175.3

**Современные и инновационные подходы к защите от обледенения
летательных аппаратов**

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

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», г. Москва,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия»

Научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки»,

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

Владимир Вячеславович Кузьмин, доцент кафедры «Физика»,

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования

«Академия Государственной противопожарной службы МЧС России», г. Москва,
Елена Анатольевна Елисеева, кандидат химических наук,
доцент кафедры «Химия»

Научно-учебного комплекса «Фундаментальные науки»,

Андрей Евгеньевич Смирнов, лаборант, Аэрокосмический факультет,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский Государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

*В данной статье рассматриваются современные и инновационные под-
ходы к созданию и применению противообледенительных жидкостей (ПОЖ) в
авиационной отрасли. Анализируются современные требования к противообле-
денительным жидкостям, особенности их создания, компонентный состав, а
также современные подходы к применению в условиях различных климатических
зон. Основное внимание уделено методам создания и применения ПОЖ в контек-
сте их экологической эффективности и безопасности для окружающей среды.*

Противообледенительные жидкости; ацетат калия; гликоли; авиация; экология.

Modern and innovative approaches to the creation and use of deicing fluids

Alexander Ivanovich Karnyushkin, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor, Head of the Department of Physics,

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

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

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Bauman Moscow State Technical University

(National Research University)», Moscow,

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

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations

of Russia», Moscow,

Helena Anatolyevna Eliseeva, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry of the Scientific and Educational Complex «Fundamental Sciences»,

Andrey Evgenievich Smirnov, laboratory assistant Faculty of Aerospace Engineering, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Bauman Moscow State Technical University

(National Research University)», Moscow

This article discusses modern and innovative approaches to the creation and use of deicing fluids in the aviation industry. Modern requirements for deicing fluids, features of their creation, component composition, as well as modern approaches to use in different climatic zones are analyzed. The main attention is paid to methods for creating and using fire protection products in the context of their environmental efficiency and safety for the environment.

Deicing fluids; potassium acetate; glycols; aviation; ecology.

На сегодняшний день проблема обледенения корпусов летательных аппаратов (ЛА) остаётся одной из важных в авиации.

Несмотря на то, что явление обледенения корпуса воздушного судна изучено, из-за несоблюдения технологий противообледенительной обработки катастрофы продолжают происходить.

Необходимость применения противообледенительной обработки обусловлена значительным влиянием осадков (снег, иней и лёд) на аэродинамические свойства поверхностей летательных аппаратов.

Различают наземное обледенение и обледенение в воздухе. Обледенение самолёта во время нахождения его на земле отличается от обледенения в условиях полёта. Если во время полёта лёд образуется, как правило, лишь на лобовых частях самолёта, то на земле обычно покрывает большую часть его поверхности: всю верхнюю часть крыльев и оперения, а также поверхность фюзеляжа.

О.К. Трунов, рассматривая вопрос безопасности взлёта в условиях обледенения, выделил главную опасность, связанную с наземным обледенением поверхностей летательного аппарата. Во время наземного обледенения происходит «развитие на обледеневших поверхностях крыла и оперения самолёта прежде-

временных (на меньших углах атаки) срывных явлений, которые грозят на этапе взлёта и набора высоты нарушением характеристик устойчивости и управляемости самолёта, а также сваливанием самолёта. Развитие срывных явлений приводит к превращению обтекающего ламинарного потока в турбулентный» [10, с.17].

Отложения льда, возникающие на структурных элементах воздушного судна, могут варьироваться внешним видом и характером в зависимости от условий полёта, характеристик облаков и температуры воздуха. Различают три вида подобных отложений: иней, изморозь и лёд.

Существует три вида образующегося льда: прозрачный лёд, матовый (или смешанный) лёд и белый пористый, крупообразный лёд.

Прозрачный лёд формируется при прохождении через переохлаждённые капли в облаках или под дождем при температуре от 0 °C до -10 °C. Этот лёд крепко адгерирует на поверхности с минимальным искажением до того момента, пока толщина его невелика, но при увеличении толщины становится опасным.

Матовый (смешанный) лёд представляет наиболее опасный вид обледенения, формирующийся при температурах от -6 °C до -10 °C при полёте через смешанные облака. Этот вид обледенения характеризуется объединением крупных растекшихся и мелких нерастекшихся капель, кристаллов и снежинок в шероховатую, бугристую массу, что сильно нарушает аэродинамику поверхностей.

Белый пористый, крупообразный лёд формируется при температуре ниже -10 °C из-за смерзания мелких капель. Из-за своей пористости он плохо прилегает к поверхности и становится опасным с увеличением толщины.

С точки зрения аэродинамики, особую чувствительность к обледенению имеют передняя кромка крыла и хвостовое оперение. Наиболее уязвимой здесь является зона защиты, в которой накапливающийся лёд может принимать несколько характерных форм.

Первая форма – профильная или клинообразная, образуется при температуре ниже -20 °C в облаках с невысокой влажностью и мелкими каплями. Лёд, откладываясь, повторяет форму поверхности, на которой находится. Эта форма обычно малоопасна из-за небольшого искажения формы поверхности.

Вторая форма – желобообразная, может возникать по двум причинам. Первая причина – температура на передней кромке носка крыла выше нуля (например, из-за кинетического нагрева), в то время как на остальных поверхностях температура отрицательная. Этот вид формы также называется рогообразной (рис. 1).

Из-за относительно высокой температуры на носке профиля вода не полностью замерзает, что приводит к образованию ледовых структур похожих на рога как вверху, так и внизу краев носка. Этот вид льда имеет шероховатую и бугристую структуру, сильно искажающую профиль и воздействующую на его аэродинамику.

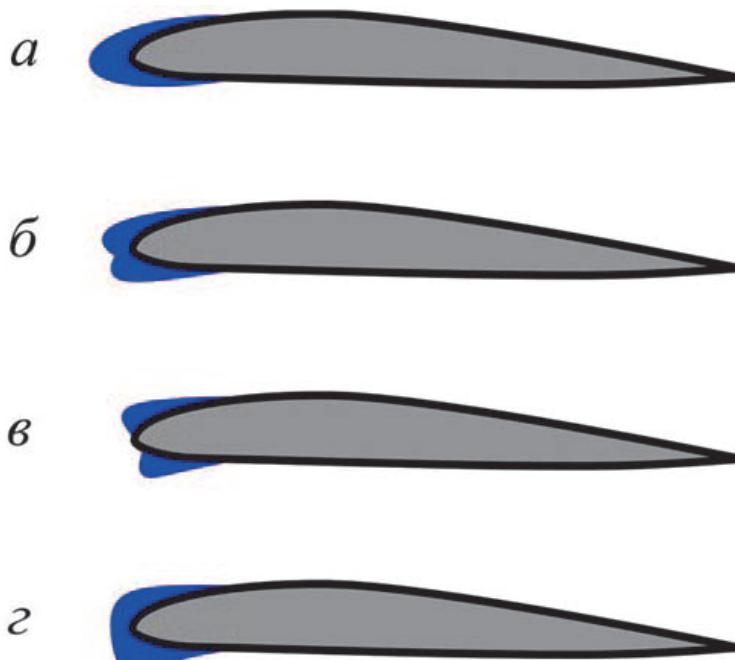


Рисунок 1 – Формы образования льда на носке профиля: а – профильная; б – желобообразная; в – рогообразная; г – промежуточная

Второй тип формирования льда на носке профиля происходит при взаимодействии профиля с крупными переохлаждёнными каплями в облаках с большой влажностью при относительно высокой температуре. Капли, соприкасаясь с передней кромкой носка, из-за своего размера не мгновенно замерзают и начинают растекаться вверху и внизу по носку, замерзая там и наращиваясь друг на друга.

Такое образование льда напоминает желоб с высокими краями, прочно прикрепляющийся к поверхности и сильно искажающий аэродинамику профиля.

Существуют также промежуточные формы обледенения, которые образуются при полёте через смешанные облака или осадки. Эти формы льда могут иметь различную кривизну и шероховатость, что отрицательно влияет на обтекание профиля. Тем не менее, подобный вид льда плохо удерживается на поверхности крыла и легко сдувается встречным потоком воздуха.

С точки зрения изменения аэродинамических характеристик и распространённости в практике, наиболее опасными и распространёнными видами обледенения являются желобообразное и рогообразное.

Около 75% ледяных отложений приходится на крыло и хвостовое оперение, и именно это обстоятельство лежит в основе большинства серьёзных авиационных инцидентов, связанных с обледенением, которые имели место в истории мировой авиации. Основной причиной здесь является значительное ухудшение аэродинамических характеристик несущих поверхностей и увеличение профильного сопротивления (рис. 2).

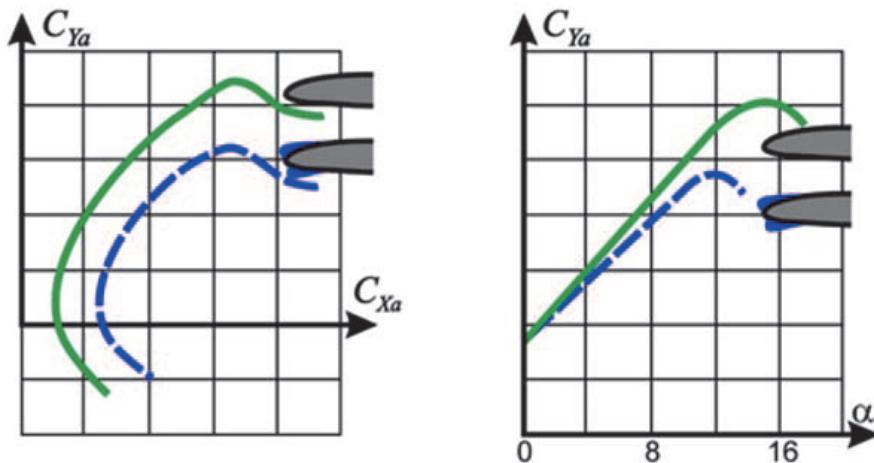


Рисунок 2 – Изменение характеристик профиля в результате обледенения
(качество и коэффициент подъёмной силы)

Ледяные образования в форме рогов, желобов или других отложений могут радикально изменить паттерн обтекания крыла или оперения. Это приводит к возрастанию профильного сопротивления, возникновению турбулентности в потоке, появлению срыва потока во многих областях, значительному снижению подъёмной силы, уменьшению критического угла атаки и увеличению веса воздушного судна. Срыв потока и сваливание могут происходить уже при незначительных углах атаки.

Многие современные противообледенительные системы взаимодействуют с датчиками или сигнализаторами обледенения согласно существующим научным исследованиям. Эти компоненты способствуют наблюдению метеорологических условий полёта и своевременному обнаружению начавшегося процесса обледенения. Процедуры управления системами антиобледенения могут быть инициированы как вручную, так и в автоматическом режиме по сигналу от датчиков или сигнализаторов.

Датчики такого типа располагаются на воздушном судне в областях, где набегающий воздушный поток подвергается наименьшим искажениям. Кроме того, они монтируются в воздухозаборниках двигателей и выполняют два различных типа функций: непосредственную и косвенную.

Первые обнаруживают наличие капель воды в атмосфере. Однако они не способны различить переохлаждённую воду от обычной, поэтому применяют температурные корректоры, которые активируют систему только при отрицательных температурах окружающего воздуха. Такие сигнализаторы отличаются высокой чувствительностью, основанной на измерениях электросопротивления и теплопередачи.

Вторые реагируют напрямую на образование и толщину льда на самом

датчике. Их чувствительность к условиям обледенения ниже, поскольку они реагируют только на лёд, который требует времени для формирования. Датчик данного типа сигнализаторов представляет собой выступающий штырь, который покрывается льдом при соответствующих условиях.

Существует несколько принципов действия сигнализаторов обледенения, но наиболее распространены два из них. Первый принцип – радиоизотопный, основанный на ослаблении β -излучения радиоактивного изотопа (стронция-90, иттрия-90) слоем льда, образующимся на датчике. Данный сигнализатор реагирует как на начало, так и на конец обледенения, а также на скорость этого процесса. Второй принцип – вибрационный, в случае которого сигнализатор реагирует на изменение частоты собственных колебаний чувствительного элемента (мембранны) датчика, на котором оседает вновь образующийся лёд. Таким образом, регистрируется интенсивность процесса обледенения [8].

Наземное обледенение часто характеризуется значительной интенсивностью, которая зависит от текущих погодных условий и может охватывать не только передние кромки и лобовые поверхности, как во время полёта, но и всю верхнюю поверхность крыла, оперения и фюзеляжа. Вследствие длительной нагрузки от сильного ветра одного направления, образующееся наледение может иметь асимметричную структуру. Задокументированы случаи образования льда в щелевых промежутках управляющих поверхностей на крыле и хвостовом оперении во время стоянки. Это может привести к некорректной работе систем управления, что представляет серьёзную угрозу, особенно в момент взлёта. Интересен вид наземного обледенения, именуемый «топливным льдом». Самолёты, совершающие продолжительные перелёты на высоких высотах, находятся значительное время в условиях низких температур (до -65°C). При этом большие объёмы топлива в топливных резервуарах охлаждаются до значения примерно -20°C . После посадки топливо не успевает быстро прогреться, поскольку изолировано от воздушной среды, и, следовательно, на поверхности обшивки в области топливных баков (часто это поверхность крыла) конденсируется влага, которая затем замерзает из-за низкой температуры поверхности. Этот процесс может происходить даже при положительной температуре воздуха во время стоянки. Образующийся при этом лёд очень прозрачен и часто обнаруживается только на ощупь.

Аэродинамический «клевок» представляет собой нежелательное явление, связанное с обледенением самолёта. Оно проявляется в резком и практически всегда неожиданном для экипажа опускании носа самолёта и переходе в состояние пикирования в процессе полёта. Преодоление этого явления и возвращение самолёта в горизонтальное положение порой представляют собой значительные трудности и иногда оказываются невозможными. Воздействие рулей управления на самолёт оказывается неэффективным, и часто такие события сопровождаются катастрофическими последствиями.

Это явление в основном наблюдается при заходе на посадку, когда самолёт находится в процессе снижения и механизация крыла находится в посадочной конфигурации, выражаяющейся в выпущенных закрылках (чаще всего на максимальный угол). Основной причиной возникновения «клевка» является обледенение стабилизатора.

Стабилизатор обычно используется для обеспечения продольной устойчивости и управляемости самолёта при отрицательных углах атаки. В этом случае стабилизатор создает аэродинамическую силу, направленную вниз, которая компенсирует пикирующий момент, создаваемый подъёмной силой крыла. Однако после выпуска закрылок эта сила смещается в сторону, увеличивая эффект пикирования. В результате моменты компенсируются, и самолёт обеспечивает продольную устойчивость (рис. 3).

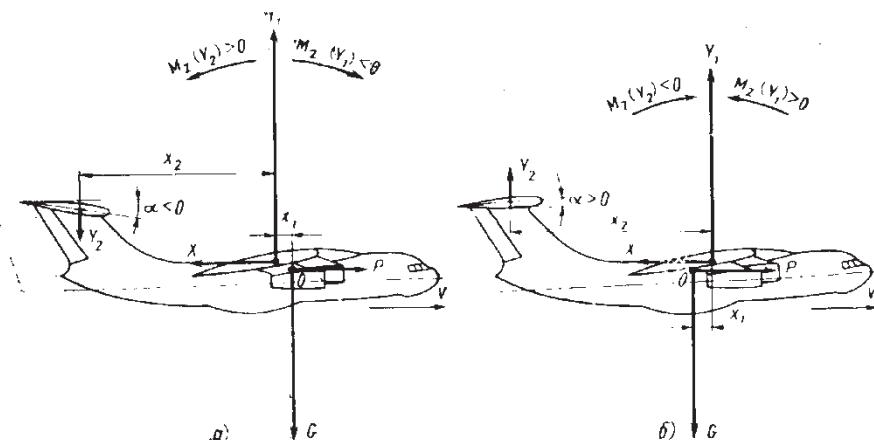


Рисунок 3 – Продольное равновесие самолёта: а – при передней центровке; б – при задней центровке

При выпуске закрылок наблюдается увеличение скоса потока за крылом (вниз), что приводит к увеличению скоса потока, отсекающего стабилизатор, и, следовательно, увеличению отрицательного угла атаки. Если на нижней поверхности стабилизатора образуются ледяные наросты (например, рога или желобы, упомянутые выше), то изменение кривизны профиля может существенно снизить критический угол атаки стабилизатора. Поэтому угол атаки набегающего потока, особенно скосенный из-за положения закрылок, может легко превысить критические значения для обледеневшего стабилизатора. Это может привести к срыву потока на нижней поверхности, что существенно снижает аэродинамическую силу стабилизатора, уменьшая кабрирующий момент. В результате самолёт резко опускает нос и переходит в пикирование. Это явление представляет собой значительную опасность. Несмотря на то, что процедуры воздушного судна чётко прописаны и описаны в «Руководстве по лётной эксплуатации» для каждого типа

самолёта, риск серьезных лётных инцидентов здесь всё равно остается высоким [6].

Таким образом, исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что наземная обработка внешних поверхностей летательного аппарата перед полётом играет огромную роль для безопасности полёта. Большое внимание уделяется системам по противодействию обледенению, которые обычно имеются в аэропортах международного уровня, на аэродромах северных широт, климат которых недопустимо суров для летательных аппаратов (ЛА).

Существуют различные методы противодействия обледенению летательных аппаратов.

Механический метод заключается в разрушении уже сформировавшегося льда посредством силового воздействия, после чего обломки льда удаляются потоком воздуха.

Физико-химический метод включает использование специальных жидкостей, которые либо понижают температуру замерзания воды, либо ослабляют сцепление льда с обшивкой ЛА.

Тепловой метод противообледенения. Основан на нагреве поверхностей, подверженных обледенению, до температуры, при которой лёд начинает таять (выше 0 °C). Для реализации этого метода могут применяться электрические кабели, горячий воздух или жидкости, циркулирующие через специальные системы противообледенения, интегрированные в конструкцию. Тепловой метод широко используется на авиационной технике, в системах обогрева крыльев, на ветрогенераторах, а также на трассах для предотвращения образования гололёда. Главное преимущество метода заключается в эффективном предотвращении обледенения в условиях низких температур. Однако высокий расход энергии является существенным недостатком. Механические системы противообледенения функционируют по циклическому принципу, реагируя на нарастание льда до определённой толщины. Часто используемые механизмы включают в себя резиновые оболочки или панели, способные надуваться, создавая трещины в ледяном покрове и обеспечивая его отслоение. Механические системы противообледенения широко применяются на авиационной технике, а также могут быть эффективными на коммуникационном оборудовании и морских платформах. Основным преимуществом механических систем является более низкое энергопотребление по сравнению с тепловыми системами. Однако их износ и потребность в регулярном техническом обслуживании могут быть существенными недостатками [1].

Пневматические системы. В 1930-е годы в США было заложено начало для инновационных разработок в области пневматических систем, которые активно внедрялись в автомобильную промышленность и другие технические сферы. Особое внимание уделялось разработке протекторов из эластомера, снабжённых встроенными пневмокамерами, что явилось значительным шагом вперёд в технологии производства шин. Пневматические системы антиобледенения функционируют по принципу подачи давления в специальные резиновые или силико-

новые оболочки, установленные на передних кромках крыльев и других поверхностях. Эти оболочки, известные как обогреваемые «пузыри», периодически накачиваются воздухом из системы самолета.

При полёте через области с низкой температурой и высокой влажностью на поверхностях самолета начинается образование льда. Датчики на самолёте обнаруживают этот лёд и активируют пневматическую систему. Под давлением воздуха резиновые оболочки накачиваются, создавая на поверхности деформацию, достаточную для срыва льда, который затем отслаивается и сбрасывается за пределы воздухозаборных путей. Системы быстро и эффективноправляются с обледенением, обеспечивая бесперебойную работу всех систем самолёта. Меньше механических частей по сравнению с электрическими или химическими системами обогрева, что снижает вероятность отказа. Пневматические системы легче интегрировать в существующие конструкции самолётов.

Инновации в пневматических системах для борьбы с обледенением значительно повысили безопасность полётов в сложных метеорологических условиях. Континуальное совершенствование технологий и материалов обещает дальнейшие улучшения в эффективности и надёжности этих систем.

Электроимпульсная система, разработанная в 1960-х годах в СССР инженером И.А. Левиным, позволяет удалить лёд при помощи создания импульсных деформаций в ледяном слое, находящемся на обшивке. Достаточно нескольких импульсов, чтобы лёд разрушался, причём без значительных нагрузок на саму обшивку. Такая система была успешно апробирована на самолёте Ил-86 и отличается меньшей массой и энергопотреблением по сравнению с традиционными тепловыми системами.

Электроимпульсная технология удаления льда представляет собой инновационный метод, который используется для обеспечения безопасности и эффективности различных транспортных средств и конструкций в зимнее время. Система базируется на принципах электродинамики и теплопередачи, что позволяет быстро и эффективно устранять ледяные образования без применения механических средств или химических реагентов.

Принцип работы – электроимпульсные системы функционируют путём создания кратковременных, но мощных электрических разрядов, которые направляются непосредственно на лёд. Эти разряды вызывают резкое термическое расширение внутренних слоёв льда, что приводит к его трещинам и отслаиванию от поверхности.

Генератор импульсов: источник высоковольтных электрических импульсов.

Электроды: расположенные на подлежащей очистке поверхности и используемые для передачи электрических импульсов в лёд.

Управляющая электроника: система контролирует частоту и интенсивность импульсов для оптимального разрушения ледяных образований.

Изоляционные материалы: обеспечивают безопасность системы, предотвращая случайный контакт с электродами. Отсутствие необходимости в использовании химических веществ препятствует загрязнению окружающей среды. Электроимпульсное удаление льда значительно быстрее традиционных механических методов. Снижение риска повреждения обрабатываемых поверхностей по сравнению с механическим методом [1].

Тепловые системы могут работать, используя горячий воздух от компрессоров или теплообменников, нагреваемых выхлопными газами. Некоторые из них интегрируются с системами управления пограничным слоем, обеспечивая эффективную защиту в критические моменты взлёта и посадки, хотя их комбинированная эффективность на практике ещё не нашла широкого применения.

Таким образом, разнообразие методов и систем противообледенения позволяет адаптировать защиту летательных аппаратов к различным условиям, защищая их от критических воздействий ледяных образований, что критически важно для безопасности полётов [4].

Основными средствами защиты и борьбы с обледенением на аэродромах являются противообледенительные жидкости (ПОЖ), которые обеспечивают как удаление льда, так и предотвращение появления наледи в связи с осадками в течение некоторого времени.

Основные требования, предъявляемые к ПОЖ:

- высокая эффективность удаления всех видов наземного обледенения с поверхности ЛА;
- способность защищать поверхность ЛА от образования льда в условиях замерзающих осадков в течение некоторого времени;
- способность полного сброса жидкости с поверхности ЛА при скоростях, больших 160 км/ч;
- низкие энергозатраты при перекачке в условиях низких температур;
- безопасность при обращении с ней.

Противообледенительная жидкость должна оказывать минимальное отрицательное влияние на окружающую среду. Только 20-25% жидкости непосредственно участвует в противообледенительном процессе, так как во время обработки самолёта большая часть жидкости стекает либо сдувается с его поверхности ветром на землю. Оставшаяся же на поверхности самолёта жидкость при взлёте и во время полёта обязательно сбрасывается и разносится вдоль взлётно-посадочной полосы и далее на прилегающие территории [8].

Противообледенительные жидкости подразделяются на четыре типа.

Жидкости типа I обладают низкой вязкостью и считаются «незагрязнёнными». Они обеспечивают лишь временную защиту, так как быстро стекают с поверхностей после применения. Обычно их наносят горячим способом под высоким давлением (130-180 °F, 55-80 °C) для удаления снега, льда и инея, а также окрашивают в оранжевый цвет для удобства идентификации.

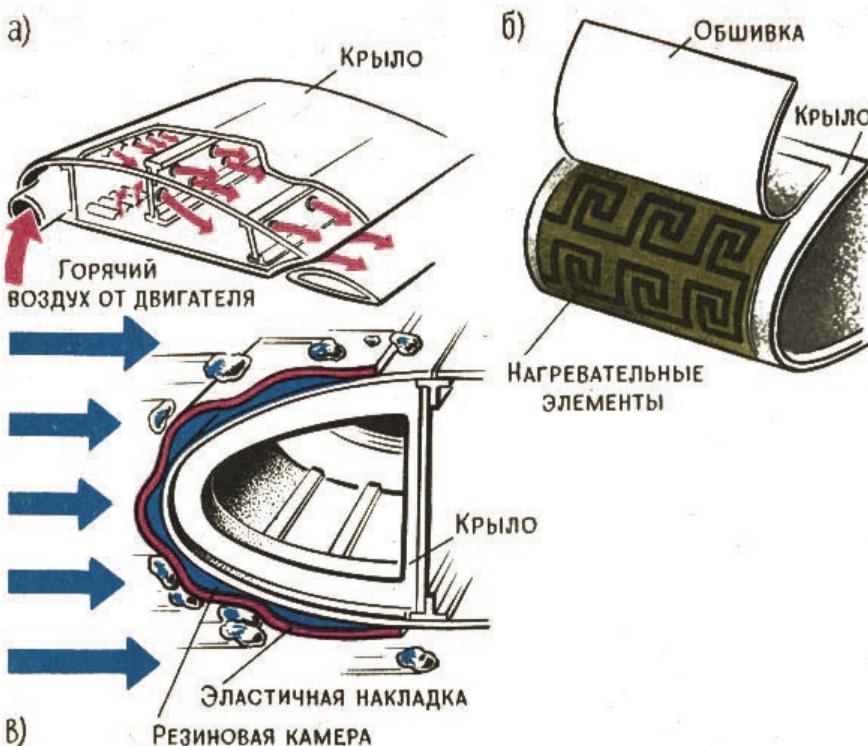


Рисунок 4 – Противообледенительные системы самолетов: а – тепловая воздушная; б – тепловая электрическая; в – с эластичными накладками

Жидкости типа II обладают псевдопластичными свойствами за счёт наличия полимерного загустителя, который предотвращает их мгновенное стекание с поверхности самолетов. Этот тип жидкости предотвращает налипание снега, льда или инея на самолёте от земли до момента взлёта. Обычно пленка жидкости остаётся на поверхности до достижения самолетом скорости в 100 узлов (190 км/ч) или около того, после чего вязкость уменьшается из-за напряжения сдвига. Высокие скорости, необходимые для разрушения вязкости, ограничивают применение этого типа жидкости только крупными самолётами. Использование жидкостей типа II уменьшается в пользу типа IV. Жидкости типа II как правило прозрачны.

Жидкости типа III можно рассматривать как компромисс между жидкостями типа I и типа II. Они предназначены для использования на более медленных самолётах со скоростью менее 190 км/ч. Обычно жидкости типа III ярко-жёлтые.

Жидкости типа IV имеют такое же назначение и соответствуют стандартам AMS, что и жидкости типа II, но обеспечивают более длительное время вы-

держки. Обычно их окрашивают в зелёный цвет для удобства нанесения однородного слоя жидкости (рис. 5).

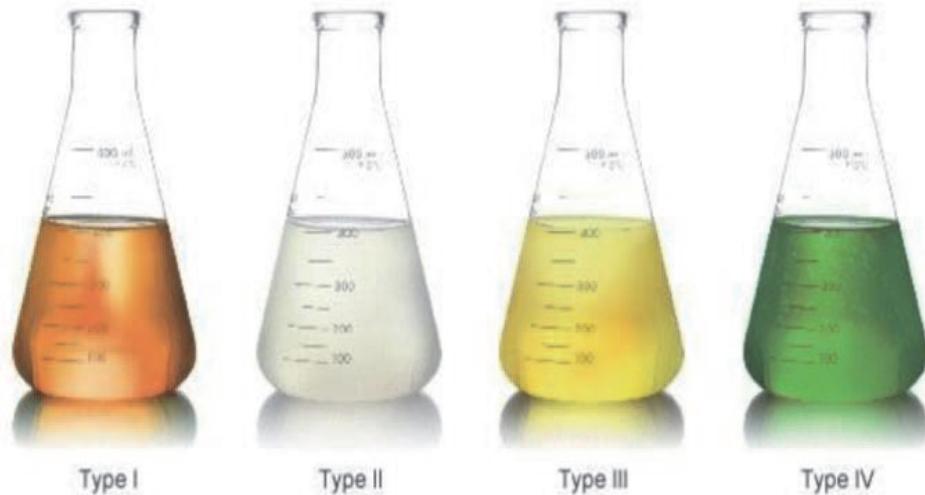


Рисунок 5 – Типы ПОЖ

Международная организация по стандартизации определяет те же четыре типа и публикует соответствующие стандарты (ISO 11075 и ISO 11078) [5].

По своим физическим свойствам жидкости типа I являются «ニュтоновскими» жидкостями, то есть их вязкость не изменяется при перемешивании. Говоря более строгим языком, вязкость жидкости не зависит от скорости относительного сдвига её слоев (градиента скорости) и подчиняется закону внутреннего трения Ньютона (рис. 6, А).

Остальные три вида: тип II, III, IV являются «неньютоновскими» жидкостями, то есть их вязкость уменьшается при увеличении скорости относительного сдвига слоев. Образно говоря, жидкость, изначально похожая на густой кисель, теряет свою вязкость при интенсивном перемешивании, а при прекращении перемешивания снова становится вязкой. После 5-, 6- кратного перемешивания вязкие свойства жидкости уже не возвращаются (рис. 6, Б) [7].

Противообледенительные жидкости, включающие в себя загустители (типы II, III и IV), также называются противообледенительными жидкостями, потому что они применяются в основном для предотвращения повторного образования обледенения после процедуры первоначального противообледенения с использованием жидкости типа I.



Рисунок 6 – Зависимость вязкости от скорости относительного сдвига слоев:
А) для ньютоновской жидкости; Б) для неニュтоновской жидкости

Эффективность применения противообледенительной жидкости в основном измеряется через Holdover Time (HOT) и минимальную рабочую температуру (LOUT).

Holdover Time (HOT) представляет собой время, в течение которого воздушное судно может оставаться на земле после обработки жидкостью перед взлётом. Время ожидания зависит от разбавления жидкости, температуры окружающей среды, скорости ветра, осадков, влажности, материала обшивки самолёта, температуры обшивки и других факторов. Если время ожидания превышено, необходимо повторно обрабатывать воздушное судно перед взлётом.

Минимальная рабочая температура использования (LOUT) определяет самую низкую температуру, при которой применяемая антиобледенительная жидкость адекватно стекает с критических поверхностей самолёта и поддерживает необходимый буфер замерзания для защиты от обледенения, который составляет 7°C (13°F) ниже температуры наружного воздуха (OAT).

В США Федеральное управление гражданской авиации (FAA) регулярно публикует официальные таблицы времени выдержки и минимальной рабочей температуры для всех одобренных противообледенительных жидкостей и ежегодно обновляет их [5].

Для жидкостей типа I время выдержки, указанное в таблицах FAA, составляет от 1 до 22 минут, в зависимости от вышеперечисленных ситуационных факторов. Для жидкостей типа IV время выдержки варьируется от 9 до 160 минут.

Противообледенительные жидкости проявляют наилучшую эффективность, когда они разбавлены водой. К примеру, неразбавленная противообледенительная жидкость Dow UCAR (этиленгликоль типа I) имеет точку замерзания -28°C , в то время как вода замерзает при 0°C . Однако смесь, состоящая на 70% из противообледенительной жидкости и на 30% из воды, замерзает при температуре ниже -55°C . Это явление известно как эвтектическая концентрация, при которой точка замерзания смеси находится на самом низком уровне и ниже, чем у каждого из компонентов по отдельности (рис. 7).

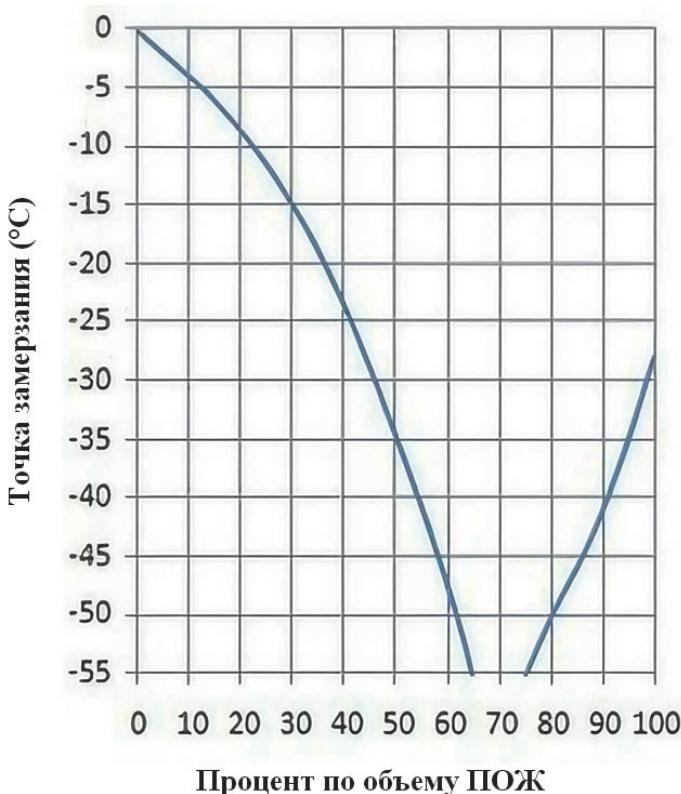


Рисунок 7 – График зависимости точки замерзания от процента по объему ПОЖ

Производители жидкостей для борьбы с обледенением могут выпускать их в концентрированных или предварительно разбавленных составах. Разбавление следует производить в соответствии с климатическими условиями и рекомендациями производителя с целью минимизации расходов при сохранении безопасности.

Удостовериться в разбавлении конкретного образца противообледени- тельной жидкости (и, соответственно, его точке замерзания) можно легко, изме- рив показатель преломления с помощью рефрактометра и проконсультировав- шись с документацией производителя противообледенительной жидкости.

Наибольшее распространение нашли противообледенительные жидкости с гликолями, которые служат для снижения температуры начала кристаллизации ПОЖ. Для этой цели в основном применяют этиленгликоль и диэтиленгликоль в концентрации от 40 до 95 мас. %. Гликоли представляют собой наряду с водой основные компоненты противообледенительных жидкостей.

Основными недостатками таких противообледенительных жидкостей для наземной обработки самолетов являются высокая токсичность и высокая стои- мость, обусловленные использованием этиленгликоля и диэтиленгликоля. Кроме

того, ингибиторы коррозии не обеспечивают высокого показателя ингибирования, в частности алюминиевых сплавов. Антиобледенительные остатки, насыщенные водой, начинают кристаллизоваться на перроне, это приводит к гибели микроорганизмов, которые находятся на границах аэропорта. Образование ледяных корок на взлётно-посадочной полосе и на стоянках воздушных аппаратов затрудняет, в некоторых случаях полностью исключает процессы взаимодействия между земной поверхностью и приземным слоем воздуха. Вследствие чего происходит изменение газового состава воздуха в этом районе. Кислород перестаёт попадать в почву, а углекислый газ в атмосферу. Так же смешиваясь со снегом, металлическими и другими химическими соединениями на перроне, раствор может попасть в грунтовые воды, через имеющуюся дренажную систему аэропорта. Таким образом, загрязняющие вещества могут потенциально попасть в водоносные горизонты почвы.

Загущенные жидкости для борьбы с обледенением обычно содержат поверхностно-активные вещества на основе алкилфенолэтоксилата (APE), продукты биоразложения которых могут быть эндокринными разрушителями. Ряд жидкостей также могут содержать токсичные вещества, такие как бензилтриазол и ингибиторы коррозии толитриазола, которые не разлагаются биологически и могут оставаться в окружающей среде [2].

Федеральным управлением гражданской авиации США одобренной как жидкость для борьбы с обледенением является Kilfrost DF Sustain, содержащая 1,3-пропандиол, произведённый из кукурузы. Этот компонент используется в качестве депрессанта точки замерзания вместо этиленгликоля или пропиленгликоля, представляя собой более безопасную альтернативу.

В России многообещающим реагентом, который способен кратно уменьшить процент загрязнения природы от применения ПОЖ, который можно эффективно использовать в растворах такого типа, является ацетат калия.

Ацетат калия не обладает (в отличие от нитратов) окислительными свойствами, менее коррозионно-активен, чем растворы хлоридов, а в отличие от гликолей – экологически безопасен.

Период полного разложения в природе составляет 28 дней. Ацетат калия не оказывает негативного воздействия на биосреду водоёмов в связи с тем, что деструкция ацетатов проходит без образования аммония и, как следствие, не является токсичным для рыб. Наличие же в предложенной жидкости дополнительно органических компонентов (пропиленгликолей, и/илиmonoэтиленгликоля, и/или диэтиленгликоля, и/или триэтиленгликоля) или других веществ, которые являются практически нелетучими при нормальных температурах и абсорбирующих солевые компоненты ПОЖ, позволило получить результат: в случае испарения (гипотетически) воды на обрабатываемых поверхностях не образуется солевых отложений («высолов»), наличие которых неизбежно приведёт к изменению аэродинамических параметров самолёта, особенно при взлёте.

Следует иметь в виду, что пропиленгликоль – единственный гликоль, не являющийся токсичным. Его использование совместно с ацетатом калия (относительно дешёвый антифризный компонент) делает ПОЖ полностью экологиче-

ски безопасным. Использование пропиленгликоля в небольших количествах сравнительно больше загущает ПОЖ в сравнении с этиленгликолем, однако в допустимых пределах: ПОЖ типа I должна иметь вязкость ненамного больше воды. Однако использование только пропиленгликоля как антифризной составляющей невозможно из-за высокой вязкости и стоимости пропиленгликоля.

На основе статистической обработки большого числа экспериментальных результатов было определено содержание гликолов, поверхностно-активных веществ (ПАВ), глицерина и ингибиторов коррозии чёрных и цветных металлов, а также загустителя в противообледенительной жидкости для наземной обработки самолётов. Целью этого было достижение необходимых вязкостных, антифризных и противокоррозионных свойств данной жидкости.

Исследование в области экологии привело к разработке противообледенительной жидкости для наземной обработки самолётов, обеспечивающей эффективную защиту от обмерзания. По новому изобретению она содержит добавку в виде водного раствора ацетата калия с плотностью 1,12-1,3 г/см³ и pH 9-11, а также глицерина, ПАВ и загустителя. В качестве гликоля используется пропиленгликоль, моноэтиленгликоль, диэтиленгликоль, триэтиленгликоль или их смесь в определённых пропорциях: гликоль 6-20%, глицерин 1,5-3,0%, ингибиторы коррозии 1,3-4,1%, ПАВ 0,002-0,04%, загуститель 0,4-0,85%, водный раствор ацетата калия с плотностью 1,12-1,3 г/см³ и pH 9-11 – остальное (табл. 1).

Коррозионные ингибиторы, включённые в состав антиобледенительной жидкости, представлены солями фосфорной кислоты: динатрийфосфат 0,69-1,5, тринатрийфосфат 0,2-0,64, нитрит натрия 0,01-0,06, бензоат натрия 0,2-1,0, жидкое стекло 0,2-0,9 (табл. 2). В предпочтительном варианте, помимо перечисленных компонентов, используется также триэтаноламин в концентрации 0,14-0,5, чтобы повысить эффективность защитных свойств данной жидкости [7].

Таблица 1 – Состав экологичной ПОЖ

Основной состав ПОЖ:	Мас.%
Гликоль	6-20
Ингибиторы коррозии	1,3-4,1
Глицерин	1,5-3,0
ПАВ	0,002-0,04
Загуститель	0,4-0,85
Водный раствор ацетата калия (плотность 1,12-1,3 г/см ³ , pH 9-11)	остальное

Благодаря наличию пропиленгликоля, моноэтиленгликоля, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля, глицерина, ПАВ и загустителя в предложенной противообледенительной жидкости для наземной обработки самолётов удалось достичнуть определённых структурно-вязкостных и плёнкообразующих свойств.

Эти свойства позволяют образовывать защитную плёнку жидкости толщиной от 50 до 15 мкм на обрабатываемых поверхностях в диапазоне температур от 0 до -10 °C и с углами наклона поверхности от 15° до 60° относительно горизонтальной плоскости. В то же время, благодаря низкой вязкости предлагаемой

типа I противобледенительной жидкости и её ньютоновскому течению, она полностью сдувается с обрабатываемых поверхностей при взлёте. В случае отсутствия загустителя, жидкость обладает лишь вязкостью 4,8...5,1 сантистоксов при 20 °C и не достаточной толщиной плёнки на обрабатываемой поверхности, что делает её недостаточно эффективной в предотвращении образования льда на поверхности. Кроме того, загущенные реагенты обеспечивают более длительное задержание на наклонных поверхностях.

Таблица 2 – Предпочтительные ингибиторы коррозии

Ингибитор коррозии	Мас.%
Динатрийфосфат	0,7-1,54
Тринатрийфосфат	0,1-0,4
Нитрит натрия	0,01-0,06
Бензоат натрия	0,25-0,7
Жидкое стекло	0,1-0,9
Триэтаноламин	0,14-0,5

Основной компонент реагента по массовому содержанию – ацетат калия – имеет в стране большую сырьевую базу и освоен в крупнотоннажном производстве противообледенительной жидкости для взлётно-посадочных полос аэропортов России, СНГ и Прибалтики.

Использование ПОЖ неизбежно приводит к негативным изменениям большого количества биосистем на приаэродромных территориях, но использование иных реагентов в составе ПОЖ (как пример – ацетата калия) делает эксплуатацию таких средств более экологически чистой. А проблема использования экологически чистых компонентов до сих пор является одной из основных проблем человечества [6].

Далее рассмотрим основные ПОЖ на российском рынке, проанализируем основные элементы, входящие в состав жидкостей, и посмотрим на статистику использования различных таких жидкостей.

Все жидкости используются разведёнными водой в соответствии с нормами содержания воды, строго регламентированными для каждого типа и зависящими от метеорологических условий. Температура замерзания жидкости должна быть ниже окружающей температуры не менее чем на 10 градусов. Категорически запрещено смешивание противообледенительных жидкостей различных типов, а также смешивание жидкостей одного типа, но от разных производителей. На гражданских аэропортах основной тип жидкости – IV тип.

Производители жидкостей для борьбы с обледенением для авиации должны подтвердить, что их продукция соответствует стандартам AMS 1424 и 1428, используя определённые испытания на ускорение на высокой скорости, испытание на снижение скорости на низкой скорости и испытание на стойкость к распылению воды.

Целью этих стандартов является обеспечение приемлемых аэродинамических характеристик противообледенительных жидкостей при их стекании с поверхностей, подъёма и управления самолёта во время взлёта и набора высоты.

С развитием негликоловых жидкостей для борьбы с обледенением эти стандарты развиваются, чтобы учитывать дополнительные факторы, такие как коррозия, пенообразование, загустение, образование остатков, сколькость и об разование плесени [5].

В России действует стандарт ГОСТ Р 54264-2010, который определяет методы и процедуры применения противообледенительных жидкостей для воздушных судов. Этот стандарт согласован с международными стандартами ISO 11075 и ISO 11078. В соответствии с мировой практикой, все противообледенительные жидкости обязаны проходить специальные лабораторные тесты, а списки разрешённых к использованию жидкостей должны быть публично доступными. В России эти функции выполняет Федеральное агентство воздушного транспорта. На осенне-зимний период разрешено использование следующих жидкостей: для типа I – «Арктика ДГ», Safewing EG I 1996 (88), «АВИАФЛО ЕГ» (AVIAFLO EG), OCTAFLO EG, Oktaflo Lyod, «ДЕФРОСТ ЕГ 88.1»; для типа II – разрешено использование только Safewing MP II FLIGHT; тип III не используется в аэропортах России; для типа IV можно использовать Safewing MP IV LAUCH, Max Flight Sneg, Max Flight 04, Max Flight AVIA и Safewing EG IV NORT (табл. 3).

Вступление на этот рынок крайне затруднительно из-за высоких входных барьеров. Это включает в себя необходимость прохождения аккредитации, многоуровневых тестов в конкурентной среде с опытными и имеющими хорошую репутацию производителями. В настоящее время основные бренды в этой отрасли – американские и канадские компании Killfrost, Safewing, Octaflo, Maxflight, а также немецкая компания Clarion, показывающая заметный рост. В России обладатель лицензии на производство противообледенительной жидкости только первого типа – «Арктика». Вместе с этим, в стране работают предприятия, производящие продукцию под лицензией западных брендов. Например, московское ЗАО «Октафлюид» сотрудничает с американскими партнерами, а также нижнекамская фирма «Арктон». В Московских аэропортах объём потребления противообледенительных жидкостей всех типов оценивается в 12 тысяч тонн в год. Из-за этого запасы противообледенительных жидкостей в аэропорту должны быть значительными.

Таблица 3 – Основные ПОЖ, используемые на аэродромах России

Наименование ПОЖ ТУ, спецификация	Изготовитель/ Поставщик (место производства)	Тип основы ПОЖ
Тип I		
«Safewing EG I 1996 (88) ТУ 2422-002- 78928795-2009 с изм. 1,2 по технологии: Clariant International Ltd	АО «ТЕХНОФОРМ» (г. Подольск)	ЭтиленгликольAMS 1424
«Octaflol Lyod»	ООО «АВИАФЛЮИД»	Этиленгликоль AMS

Наименование ПОЖ ТУ, спецификация	Изготовитель/ Поставщик (место производства)	Тип основы ПОЖ
TU 2422-005- 58016916-2014 по лицензионному со- глашению с Clariant International AG	Интернешнл» (г. Старая Купавна)	1424
«ДЕФРОСТ ЕГ 88.1» («DEFROST EG 88.1») TU 20.59.43-046- 59586231-2018 (взамен TU2422-014-54242461- 2015 с изм. 1,2)	ЗАО «РХЗ «НОРДИКС» (г. Рошаль ООО Проф- линг»)	Этиленгликоль AMS 1424
«АВИАФЛО ЕГ» (AVIAFLO EG) TU 2422-001- 58016916-2012	ООО «АВИАФЛЮИД Интернешнл» (г. Старая Купавна)	Этиленгликоль AMS 1424
Тип IV		
«Safewing MP IV LAUNCH» TU 2422-003- 78928795-2012 с изм. 1,2,3 по технологии: Clariant International Ltd	АО «ТЕХНОФОРМ» (г. Подольск)	Пропиленгликоль AMS 1428
«Max Flight Sneg» TU 2422-004- 58016916-2014 по лицензионному соглашению с Clariant International AG	ООО «АВИАФЛЮИД Интернешнл» (г. Старая Купавна)	Пропиленгликоль AMS 1428
«Max Flight AVIA» TU 20.59.43-018- 58016916-2016 (иден- тичны TU 2422-018- 58016916-2016) по лицензионному со- глашению с Clariant International AG	ООО «АВИАФЛЮИД Интернешнл» (г. Старая Купавна)	Этиленгликоль AMS 1428
«АВИАFlight EG» TU 20.59.43-022- 58016916-2020	ООО «АВИАФЛЮИД Интернешнл» (г. Старая Купавна)	Этиленгликоль AMS 1428

В настоящее время мы наблюдаем сложные отношения между Россией и странами Запада. В такой нестабильной ситуации существует потенциальная угроза того, что международная компания может в какой-то момент прекратить

поставки концентрата в Россию и завершить лицензионное соглашение с партнерами. Такой сценарий событий может привести к парализации авиасообщения по всей стране в холодный период времени.

В подобных обстоятельствах могут возникнуть значительные проблемы как для экономики, так и для общества в целом. Неустойчивые поставки важных ресурсов, таких как концентрат, могут вызвать дефицит и остановку производства в различных отраслях. Это, в свою очередь, может привести к ухудшению экономической ситуации, потере рабочих мест и снижению уровня жизни граждан. Решение подобных проблем требует комплексного анализа, основанного на научных данных, чтобы разработать эффективные стратегии управления кризисными ситуациями и обеспечить непрерывность работы экономики в условиях нестабильности.

С появлением российского производителя ПОЖ российское авиационное сообщество перестало быть зависимым от зарубежных поставщиков.

Первая полностью отечественная противообледенительная жидкость для самолётов была представлена в России в 2020 году. ЗАО «РХЗ «Нордикс», производитель «Дефрост», выпустила линейку авиационных противообледенительных жидкостей (ПОЖ) типа 1, 2 и 4. Эти продукты полностью сертифицированы для использования как в России, так и за её пределами. До данного момента такие стратегически важные продукты, без которых ни один самолёт в России не мог взлететь зимой, производились исключительно по иностранной технологии.

«Дефрост» отличается от существующих заводов по производству противообледенительных жидкостей (ПОЖ) в России, которые создают ПОЖ путём смешивания импортного концентрата с этиленгликолем под торговыми марками иностранных компаний. Наша компания «Дефрост» прошла международную сертификацию отечественной технологии производства ПОЖ. Они настроили замкнутую экосистему для защиты воздушных судов от обледенения. По их словам, применяемые ПОЖи «Нордикса» более безопасны для человека и окружающей среды. Кроме того, они организовали систему сбора использованных жидкостей для их последующей очистки и вторичного использования. Также была получена лицензия на сбор, транспортировку, хранение и утилизацию отходов ПОЖ, а также был воздвигнут завод по переработке использованных жидкостей. Таким образом, «Дефрост» предлагает рынку готовое решение для сокращения выбросов отработанных ПОЖ в окружающую среду и снижения затрат на противообледенительную обработку для авиакомпаний [3].

В настоящей политической обстановке существует риск того, что международные компании могут остановить поставки концентрата в Россию и прекратить лицензионное соглашение с партнерами. В связи с этим сценарием авиасообщение в России может стать уязвимым в холодное время. Однако появление отечественных производителей противообледенительной жидкости для самолетов уменьшает зависимость российской авиации от иностранных поставщиков.

Первая полностью отечественная противообледенительная жидкость для самолетов была представлена в 2020 году.

Таким образом, в российской промышленности уже имеются необходимые наработки в области производства противообледенительных жидкостей, а также опыт по созданию, использованию и внедрению новых жидкостей. Дополнительно, имеющиеся производственные мощности предприятий готовы производить ПОЖ в необходимых объёмах для обеспечения международных аэроромов в России. Все это предоставляет благоприятную почву и даёт возможность новых научных открытий и инноваций в области авиационных противообледенительных жидкостей, что подтверждается на опыте производителя «Дефрост».

Литература

1. Демидов А.И., Шишелова Т.И. «Проблема обледенения летательных аппаратов и применяемые методы борьбы с ней» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=5897>.
2. Ёлкина Д.А. «Противообледенительная жидкость». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.salogistics.ru/8_elkina_7484.
3. Михальчевский Ю.Ю. «Исследование противообледенительной жидкости оптоэлектронными методами» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ledovanie-protivoobledenitelnoyhidkosti>.
4. Обледенение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://fly-history.ru/books/item/f00/s00/z0000004/st014.shtml>.
5. Обслуживание воздушного судна в различных климатических условиях [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studbooks.net/1202613/bzhd/obsluzhivanie_vozdushnogo_sudna_v_razlichnyh_klimaticheskih_usloviyah.
6. Окружнов А.В. «Выбор способа производства технических жидкостей на примере противообледенительной жидкости» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/vybor-sposoba-proizvodstva>.
7. Перечень противообледенительных жидкостей (ПОЖ), допущенных к применению для защиты от наземного обледенения ВС ГА [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=755345#eB17c6UznTqdBohM>.
8. Смирнов А.Е., Елисеева Е.А., Карнюшкин А.И. Побочное влияние использования противообледенительных реагентов на аэродромах / Материалы XV Научно-практической конференции «Экологические проблемы XXI века» – М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 52-56.
9. Солтанов С.Х. Экологические последствия применения противообледенительных жидкостей «Octaflo eg» и «Maxflight 04» при обработке воздушных судов гражданской авиации в осенне-зимний период / С.Х. Солтанов – Москва // Международный научно-исследовательский журнал № 6(48). Часть 2. 2016. 48 с.
10. Трунов О.К. Безопасность взлёта в условиях обледенения. М.: ГНИИГАР, 1995. 17 с.

УДК 681.518.2

**Состояние и перспективы разработки алгоритмов и функциональных
узлов формирования программируемых циклограмм опроса
измерительных каналов систем телеметрии аэрокосмических
летательных аппаратов**

Александр Петрович Мороз, доктор технических наук, профессор,

Академик Российской академии космонавтики,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования,

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

Александр Иванович Полехин, ведущий инженер,

Акционерное общество «Научно-производственное объединение

измерительной техники» (АО «НПО ИТ»),

г. Королев, Московская область,

Галина Евгеньевна Полехина, кандидат педагогических наук, доцент,

ФГБОУ ВО «АГПС МЧС России», г. Москва,

доцент ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва,

Ксения Александровна Полехина, лаборант, кафедра ИУ8,

ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Анализируются отечественные системы телеметрии для аэрокосмической техники с точки зрения организации управления сбором данных. Показано, что в большинстве случаев применяется программно-адресное управление сбором путем формирования программируемых циклограмм опроса параметров специальными узлами – генераторами форматов кадра, эффективность алгоритмических и структурных решений которых определяет ключевые характеристики и потребительские свойства систем телеметрии.

Формулируется актуальная задача стандартизации, совершенствования существующего и разработки нового математического, алгоритмического и аппаратурного обеспечения формирования программируемых циклограмм, намечаются пути ее успешного решения.

Аэрокосмическая техника, системы телеметрий, управление сбором данных, программируемые циклограммы опроса, генератор форматов кадра.

Relevance and prospects for the development of algorithms and functional units for the formation of programmable cyclograms for interrogating the measuring channels of telemeasurement systems of aerospace aircraft

Alexander Petrovich Moroz, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Academician of the Russian Academy of Cosmonautics,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,
Alexander Ivanovich Polekhin, Leading Engineer, Joint Stock Company
«Scientific and Production Association of Measuring Equipment» (JSC «NPO IT»),
Korolev, Moscow Region,
Galina Evgenyevna Polekhina, Ph.D., Associate Professor, FGBOU VO
«AGPS EMERCOM of Russia», Moscow, Associate Professor FGBOU VO MSTU
im. N.E. Bauman, Moscow,
Ksenia Alexandrovna Polekhina, master's student, laboratory assistant,
Department of IU8, Moscow State Technical University. N.E. Bauman, Moscow

Domestic telemetry systems for aerospace technology are analyzed from the point of view of organizing data collection management. It is shown that in most cases, software-addressed control of collection is used by generating programmable cyclograms for polling parameters by special units - frame format generators, the effectiveness of algorithmic and structural solutions of which determines the key characteristics and consumer properties of telemetry systems

The urgent task of standardization, improvement of existing and development of new mathematical, algorithmic and hardware support for the formation of programmable cyclograms is formulated, and ways of its successful solution are outlined.

Aerospace technology, telemetry systems, data acquisition control, programmable interrogation patterns, frame format generator.

Перспективы развития авиационной техники (АТ) и ракетно-космической техники (РКТ) неразрывно связаны с разработкой перспективных информационно-измерительных систем (ИИС) бортового и наземного применения [1, 2]. Они являются основным инструментом конструкторов при испытаниях и отработке все более сложных аэрокосмических изделий и основаны на использовании более совершенных методов и алгоритмов сбора, обработки и передачи данных [3-5]. Поэтому процесс развития АТ и РКТ обуславливает необходимость развития ИИС с целью удовлетворения тактико-технических характеристик последних требованиям, предъявляемым к ним главными конструкторами новых создаваемых изделий АТ и РКТ.

Для полноты оценки характеристик процессов, протекающих в узлах, системах, агрегатах и элементах конструкции изделий АТ или РКТ во время испытаний и целевого применения, а также для оценки состояния экипажей пилотируемых изделий, к ИИС предъявляется требование одновременно оперировать с десятками различных типов информационных источников телеметрируемых параметров (ТМП): технических и биомедицинских, различных по физической природе, спектральному составу, величинам оцениваемых параметров, распределенных по всей конструкции изделия (см. пример на рис. 1).

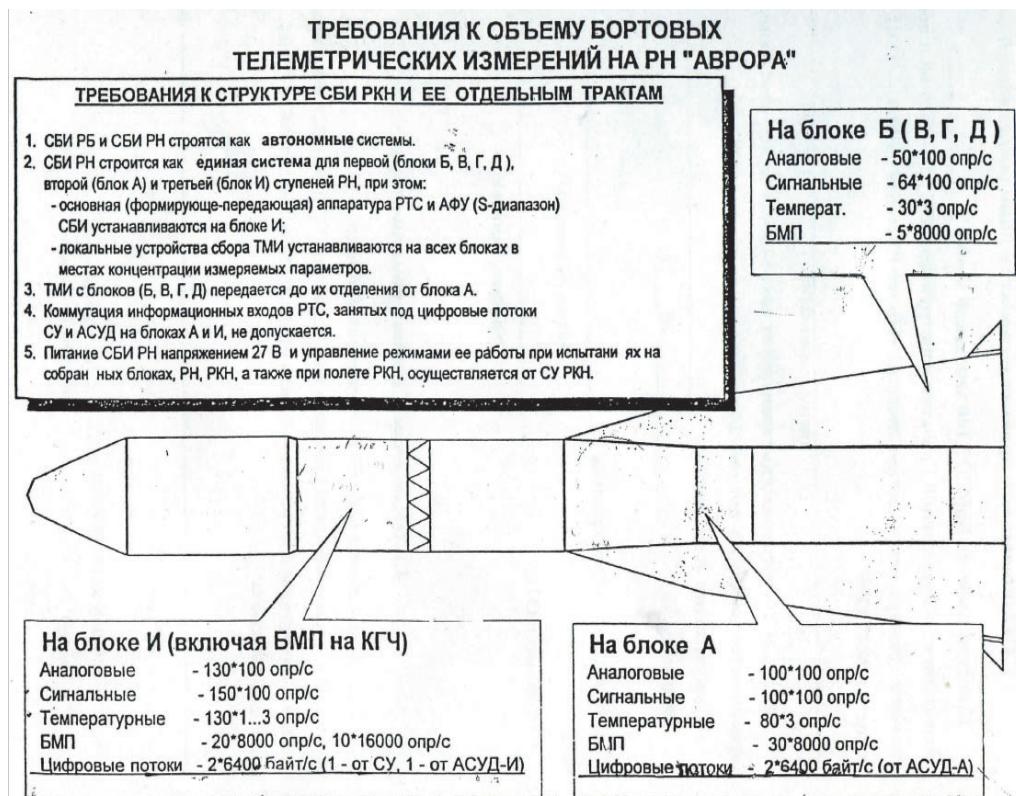


Рисунок 1 – Пример распределения ММП и БМП измеряемых параметров на изделии

Сами ТМП могут быть как аналоговыми, так и дискретными (цифровыми). При этом количество ТМП на изделии может составлять несколько сотен и более, что обуславливает необходимость передачи больших массивов данных телеметрий с высокой скоростью. В свою очередь, скорость передачи данных не может быть увеличена выше определенных значений, определяемых характеристиками канала связи.

Следует также отметить, что цифровые методы сбора, обработки и передачи данных имеют ряд преимуществ по сравнению с аналоговыми. Поэтому в настоящее время ИИС, применяемые для телеметрирования современных изделий АТ и РКТ, являются многоканальными и, как правило, цифровыми, т.е. используют импульсно-кодовую модуляцию (ИКМ) первичных аналоговых ТМП и временное разделение каналов (ВРК).

В процессе телеметрированию подлежат события, величины и процессы. В связи с этим сами ТМП принято подразделять на функциональные и сигнальные.

Функциональные параметры могут быть математически представлены в виде функций времени. В процессе анализа таких данных телеметрий оценке подлежат величины информативных параметров и характеристики зарегистриро-

ванных процессов.

Сигнальные параметры представляют собой скачкообразные переходы с нижнего уровня шкалы телеметрий на верхний и обратно. При этом оцениванию подлежат моменты времени, когда происходят такие изменения в поведении ТМП.

В свою очередь, в аэрокосмической технике функциональные параметры принято разделять, в зависимости от ширины спектра F_{\max} телеметрируемого процесса, на две категории:

- медленно меняющиеся параметры (ММП) с шириной спектра $F_{\max} \leq 50$ Гц, к которым относятся давление и температура, ток и напряжение, линейные и угловые перемещения и ускорения;

- быстро меняющиеся параметры (БМП) с шириной спектра $F_{\max} > 50$ Гц и до нескольких тысяч Гц и даже более. К таким параметрам относятся вибрация, акустические шумы, виброударные процессы, высокочастотные пульсации давления [6]. В такое разделение укладываются и биомедицинские ТМП [7].

Несмотря на то, что обычно подавляющее большинство – до 80% [8, 9] ТМП в аэрокосмической отрасли являются медленно меняющимися функциями времени, проведенные исследования [10] показывают, что качественная оценка состояния оборудования, элементов конструкции изделия и экипажа может быть достигнута только при применении на изделии единой многоканальной радиотелеметрической системы совместных телеметрий ММП и БМП. Обусловлена такая необходимость следующим обстоятельством. Природа возникновения аномалий в функционировании бортовых систем и агрегатов имеет случайный характер, поэтому заранее предугадать – какой тип и какие именно ТМП на очередном пуске окажутся наиболее востребованными, т.е. наиболее информативными при определении причины возникновения аномалий – невозможно [11].

Пример типичного состава и количества различных типов ТМП, частоты их опроса, а также суммарная информативность каждого типа параметров приведен в таблице 1 [12].

Анализ данных, представленных в таблице 1, показывает, следующее.

Во-первых, у различных систем изделия количество ТМП различных типов может существенно отличаться.

Во-вторых, частоты опроса различных типов ТМП могут отличаться на несколько порядков (от сотых долей Гц до десятков кГц).

Вышеуказанные обстоятельства существенно затрудняют решение задачи оптимального использования имеющегося у ИИС информационного ресурса КС.

Следует отметить, что было бы нерационально применять отдельную телеметрическую систему для передачи отдельно каждого типа телеметрической информации. Поэтому еще одно из требований к современным ИИС заключается в том, что такая система должна быть совмещенной и обеспечивать возможность передачи по одному и тому же каналу связи (КС) ТМП различных видов.

Кроме того, количество, номенклатура, пространственная геометрия расположения, характеристики и условия сбора ТМП меняются как от изделия к изделию, так и при изменении режимов испытаний.

Таблица 1 – Количество параметров по системам и требуемые частоты их опроса для изделия типа РБ КВТК

Система	Тип параметра	Количество параметров	Частота опроса, Гц	Суммарная информативность в системе
Система управления	Аналоговый	2, 4, 3, 3	50, 100, 200, 400	12 параметров, 2300 байт/с
	Сигнальный	27, 24, 16, 2	12.5, 3.12, 200, 100	69 параметров, 477 байт/с
	КАДР БЦВК	-	-	750 байт/с
	Температура	-	-	-
ДУ+ПГС (двигатель-ная установка)	Аналоговый	2, 8, 31, 1, 4, 13,2	1, 5, 10, 25, 50 100, 400	61 параметр, 2677 байт/с
	Сигнальный	-	-	-
	Температура	69, 7, 6, 4	1, 4, 5, 10	86 параметров, 167 байт/с
Конструкция (РБ, ГО, КА, ПС)	Аналоговый	10, 10	200, 400	20 параметров, 6000 байт/с
	Сигнальный	4	50	4 параметра, 8 байт/с
	Температура	115, 21, 2, 20	1, 0.2, 0.5, 0.05	158 параметров, 121 байт/с
	Вибрационные Акустические	12, 12	8000, 16000	24 параметра, 2688000 бит/с
БИК (бортовой измерительный комплекс)	Аналоговый	15, 2	50, 200	17 параметров, 1150 байт/с
	Сигнальный	1	50	1 параметр, 6.25 байт/с
	КАДР БРТС РБ КВТК	-	-	252 байт/с
	Температура	6	1	6 параметров, 6 байт/с
СОТР (система обеспечения температурного режима)	Аналоговый	27	1	27 параметров, 27 байт/с
	Сигнальный	8	3.12	8 параметров, 25 байт/с
	Температура	30, 3	0.05, 0.2	33 параметра, 2.1 байт/с
ВСЕГО	Аналоговый	137	1...400	12151 байт/с
	Сигнальный	81	3.12...200	516 байт/с
	Температура	283	0.05...10.0	296 байт/с
	Акустические вибрационные	24	8000...16000	2688000 бит/с
			Общая информативность 4096000 бит/с	

Указанные данные задаются пользователем в программе измерений (ПИ) для каждого режима испытаний отдельно.

Т.е. необходимо обеспечивать возможность оперативного изменения ПИ как по составу ТМП, так и по режимам их сбора и группирования с учетом дина-

мического и амплитудного диапазонов и скорости доставки всего собранного объема телеметрической информации (ТМИ) потребителю по КС. Поэтому ПИ одного и того же изделия на разных этапах испытаний будут отличаться одна от другой, а также от ПИ, предназначеннной для этапа целевого применения изделия.

Важнейшей характеристикой КС является максимальная скорость передачи информации I_s , измеряемая в бит/с, и называемая информативностью или тактовой частотой ИИС [13].

В бортовых ИИС, применяемых на изделиях РКТ для решения задач информационно-телеметрического обеспечения на всем участке выведения полезной нагрузки на орбиту искусственного спутника Земли, в качестве КС используется радиоканал (РК), максимальная достигнутая на современном техническом уровне реальная информативность которого I_s , как известно [14], находится в пределах 1...4 Мбит/с.

Информативность I_s является фактором, который ограничивает передачу необходимого объема ТМИ с борта изделия. Причиной такого ограничения является ряд факторов.

Во-первых, спецификой колебаний энергетического потенциала ракетной радиолинии «Борт-Земля».

Во-вторых, максимальное значение информативности I_s ограничивается допустимой энергетикой КС.

В-третьих, требованиями к достоверности передачи данных по КС.

Поэтому I_s является критически важным дефицитным ресурсом, требующим его рационального расхода, в том числе и на этапе решения рассматриваемой задачи формирования программируемых циклограмм опроса измерительных каналов систем телеметрии аэрокосмических летательных аппаратов.

ИИС взаимодействует с контролируемым изделием через свою основную функциональную часть – многоуровневую иерархическую подсистему сбора данных (ПСД), которую образуют первичные измерительные агрегатные средства: датчико-преобразующая аппаратура (ДПА), многоканальные мультиплексоры с цифровым управлением – так называемые локальные коммутаторы (ЛК), цифровые коммутаторы (КЦ).

Ко входам ПСД подключаются также источники цифровых массивов – система управления (СУ), навигационная аппаратура (НАП) (рис. 2) [15].

Первым уровнем иерархии является сечение ДПА, в котором ТМП изделия преобразуются датчиками в электрические сигналы, нормализованные в шкале измерений 0...6,2 В. Эти сигналы подключаются к каналам групповых устройств сбора (ЛК), устанавливаемым в монтажном пространстве изделия в местах сосредоточения ДПА, это второй уровень.

Далее, в зависимости от компоновки изделия и количества входов ЛК, группирование цифровых потоков ТМИ может быть продолжено в КЦ третьего и последующего уровней.

Идентичные интерфейсы на входе и выходе КЦ позволяют соединять их последовательно и формировать, распределенные по составным частям изделия, адресные ПСД древовидной конфигурации в соответствии с его геометрией.

Высшего уровня концентрации ТМИ достигает в центральном мультиплексоре – формирователе, входы которого подключены к выходам КЦ предпоследнего уровня ПСД.

Принцип ВРК, т.е. разнесение моментов оцифровки функциональных ТМП во времени или так называемый опрос ДПА позволяет объединять мультиплексированные разнородные потоки ТМИ от ТМП в единый цифровой поток на выходе центрального формирователя без потери существенных свойств передаваемых данных. Для выполнения этого требования частоты опроса ТМП должны выбираться с учетом теоремы Котельникова [13, 14].

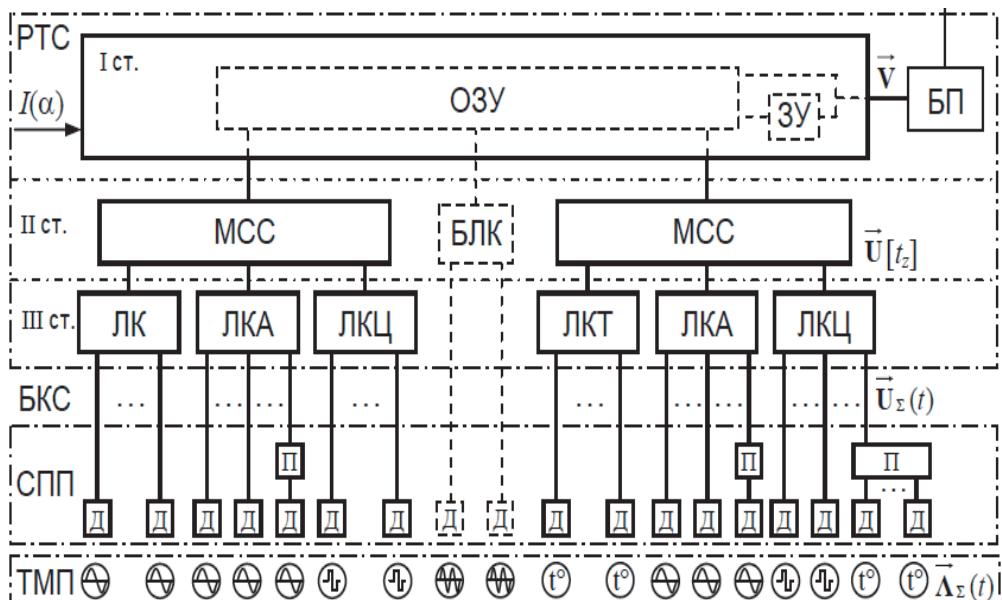


Рисунок 2 – Пример состава и конфигурации подсистемы сбора данных на изделии

Поток содержит информацию от всех ТМП, цифровые массивы от СУ, НАП, М-последовательность синхронизации, временную привязку и другую служебную информацию. В аэрокосмической технике такой поток принято называть групповым телеметрическим сигналом (ГТС) или телеметрическим кадром (ТМК) [9, 16].

При традиционно используемом в современной отечественной телеметрической аппаратуре регулярном дискретном представлении ТМП в виде циклических рядов цифровых эквивалентов их мгновенных значений – выборок (отсчетов), ГТС представляет собой равномерную цифровую последовательность сложной циклической структуры, поступающую на видеовход модулятора передатчика КС [17]. Процедура управления построением ГТС (кадра) является важнейшим элементом организации взаимодействия агрегатных средств ПСД, определяющим потребительские свойства ИИС и, в частности, ее информационную гибкость [18].

Анализ современных и перспективных отечественных ИИС аэрокосмиче-

ской отрасли [19-27] показывает, что в большинстве случаев в ПСД этих систем используется программно-адресное управление опросом ДПА и формированием ГТС, при котором частота выборок назначается пользователем в ПИ индивидуально для каждого ТМП на основании априорных сведений о его спектральных или вероятностных характеристиках. При этом, как отмечено выше, вследствие совместных измерений ММП и БМП, назначаемые частоты выборок находятся в весьма широком диапазоне – от десятых долей Гц до тысяч Гц, а в отдельных случаях даже выше.

Следует отметить, что программно-адресное управление опросом ТМП позволяет, с одной стороны, адаптировать систему измерений к общему входному потоку ТМИ изделия, позволяя гибко распределять и перераспределять ресурсы системы между измерительными каналами, исключая при этом их запараллеливание. С другой стороны, адаптировать параметры ГТС (тактовую частоту, разрядность сообщений, содержание и разрядность синхрослов и другой служебной информации) к текущим характеристикам (в частности, к информативности) КС.

Оба способа адаптации являются основными в рассматриваемом классе перечисленных ИИС и позволяют сократить суммарный групповой равномерный поток дискретных отсчетов ГТС на входе в КС, уменьшить ширину полосы частот КС и рационально распределять информативность между ТМП.

Организация программного управления мультиплексированием ТМП и формированием ГТС согласно заданным в ПИ частотам опроса в разветвленных многоуровневых структурах ПСД, конфигурация которых индивидуальна для каждого изделия, требует наличия теоретического обоснования и является наиболее сложной и актуальной задачей для рассматриваемого типа ИИС, которая решается индивидуально разработчиками систем в зависимости от их опыта и квалификации.

Решение рассматриваемой задачи организации программного управления мультиплексированием ТМП и формированием ГТС согласно заданным в ПИ частотам опроса в разветвленных многоуровневых структурах ПСД возлагается на специальный функциональный узел, так называемый генератор форматов кадра (ГФК), являющийся неотъемлемой частью технического облика любой системы телеметрии с программно-адресным управлением опроса ТМП.

Встречаются и другие названия, например блок формирования телеметрического кадра (БФТК) [21, 23], блок программного управления (БПУ) [26].

ГФК по определенной процедуре (алгоритму), используя заданные в ПИ частоты $f_{v(n)}$, вычисляет либо формирует элементы единого временного циклического ряда управляющих команд опроса – адресов переключения измерительных каналов мультиплексоров ПСД, генерируя циклограмму опроса, со следующими свойствами:

- суммарная частота следования адресов в ряду должна быть не более максимальной скорости передачи информации I_s ;
- адрес каждого канала n должен следовать в составе ряда со своей индивидуальной частотой $f_{v(n)}$, заданной в ПИ, и кратной информативности системы

I_s ;

- временное наложение адресов в общем едином ряду недопустимо.

Элемент ряда вычисляется либо формируется для каждой временной позиции ГТС H_j , длительность которых – $\Delta t_{(j)}$, обратно пропорциональна значению информативности системы телеметрических измерений: $\Delta t_{(j)} = 1/I_s$.

Период самой циклограммы опроса соответствует длительности цикла ГТС, который определяется самой низкой частотой дискретизации $f_{v(n)min}$ в ПИ и называется циклом телеметрирования L ИИС [28].

Очевидно, что в случае формирования такой циклограммы опроса обратный поток измерений (отсчетов) в ГТС на входе в КС также будет удовлетворять заданным свойствам. Фактически при этом речь идет о распределении имеющегося фиксированного ресурса информативности системы I_s между источниками информации (ТМП) в соответствии с априорными данными об их информационной производительности.

Количество вариантов ПИ в циклограмме полета только для одного изделия на протяжении периода натурных испытаний составляет несколько десятков, а с учетом использования системы измерений на разных объектах возрастает еще больше. Каждому варианту ПИ должен соответствовать вариант периодической последовательности (циклограммы) команд опроса, поэтому приходим к необходимости решения множества задач совместного расположения адресов переключения каналов, следующих с заданной периодичностью $1/f_{v(n)}$ в составе единого временного цикла $L = 1/f_{v(n)min}$ с вышеуказанными свойствами [28].

Решение задачи формирования циклограммы опроса требует установления соответствия между тем или иным способом заданной в ПИ частотой дискретизации $f_{v(n)}$ n -го канала и его адресом n для каждой текущей позиции ГТС $\Delta t_{(j)}$. В общем случае, для установления каждого такого соответствия необходим алгоритм с некоторым набором арифметико-логических операций, характеризуемый коэффициентом вычислительной сложности K_c , который реализуется в ГФК программным или аппаратным способом.

Наиболее просто реализовать такой алгоритм для ГФК на основе блока памяти ПИ, в ячейки которой производится последовательная запись адресов параметров, опрашиваемых на протяжении интервала периодичности L .

Тогда при считывании очередной ячейки с частотой информативности I_s системы телеметрических измерений на выходе немедленно получаем адрес параметра, который должен опрашиваться на текущей позиции телеметрического кадра – H_j , длительности которых будут иметь значения $\Delta t_{(j)} = 1/I_s$, а заданные в ПИ частоты опроса параметров $f_{v(n)}$ обеспечиваются соответствующим количеством повторений адресов каждого параметра на интервале периодичности L . Таким образом в блок памяти ПИ должна быть записана полная циклограмма опроса – кадр ИИС, период которого, по определению [28], соответствует периоду опроса самого низкочастотного параметра. При таком подходе необходимое количество ячеек памяти определяется отношением $f_{v(n)max} / f_{v(n)min}$ в ПИ, которое в современной аэрокосмической телеметрии достигает значения 10^5 .

Учитывая, что интегральные микросхемы статических оперативных и *flech* запоминающих устройств (ОЗУ и ППЗУ) являются одними из самых дорогих электронных компонентов, а также использование нескольких ПИ во время испытаний, такое решение нельзя признать оптимальным. Кроме того, прежде чем записывать последовательность адресов каналов в ячейки ОЗУ, ее нужно сформировать, т.е. приходим все к той же вышеуказанной задаче распределения адресов каналов по позициям кадра на интервале периодичности L .

Уменьшения объема ОЗУ программ, как указано выше, можно добиться путем перехода от прямой записи всей последовательности адресов в ячейки к вычислениям адреса для каждой позиции ГТС с помощью специальных алгоритмов.

Таким образом, эффективность алгоритмов формирования циклограмм опроса, положенных в основу технических решений, реализуемых в функциональных узлах ГФК, непосредственно определяет ключевые характеристики и потребительские свойства ИИС: информационную и структурную гибкость, информативность, точность и достоверность передачи данных, требования к квалификации специалистов по разработке ПИ и эксплуатации систем, возможность составления, корректировки и загрузки ПИ пользователем без привлечения разработчиков ИИС.

Теоретическим основам и практическим аспектам формирования циклограмм опроса ТМП в соответствии с заданной программой телеметрий посвящены работы Виттиха В.А., Цыбатова В.А., [29] Золотухина Ю.Н, Цодикова М.Б., Шушкова Е.И. [30], Михеева А.А. [31].

В данных работах описываются условия, алгоритмы, программные и аппаратные средства для объединения множества циклических последовательностей отсчетов ТМП, взятых с индивидуальным постоянным шагом дискретизации, назначенным в ПИ, в единый равномерный поток ГТС без наложений и пропусков для ввода в КС или устройства обработки, аналитически оцениваются предельные возможности формирования структур ГТС.

Однако указанные работы имеют чисто теоретический характер, не доведены до уровня инженерных методик, в них отсутствуют ссылки (кроме работы [31]) на применение в выпускаемых системах телеметрий.

В работах другой группы авторов: Жариновой Л.А. [32], Плесовских А.К. [33], Ковриги Ю.Ю. [15] теоретическая база и алгоритмы формирования циклограмм опроса ТМП рассматриваются как часть более общей задачи – разработка системы автоматизированного проектирования (САПР) для программируемых систем измерений на основе серийно выпускаемой бортовой телеметрической аппаратуры «Орбита IV АН5-01», «БИТС2Ц». В этих работах задача формирования циклограммы опроса формулируется как задача распределения опросов датчиков (абонентов) по потоку ТМИ (Плесовских А.К.) или как задача распределения параметров (ТМП) по канальным интервалам кадра для каждой из программ телеметрических измерений (ПТИ) (Коврига Ю.Ю.). В итоге, формируются последовательные структуры кадров программ сбора ТМИ, которые в табличном виде используются для программирования узлов ГФК.

Анализ вышеуказанных работ, а также доступных источников научно-

технической и патентной информации по теории синтеза алгоритмов и функциональных узлов формирования циклограмм опроса показывает, что известные алгоритмы обладают сложной структурой с ветвлением и внутренними циклами, требуют выполнения множества арифметико-логических операций и, соответственно, являются ресурсоемкими по отношению к вычислительным ресурсам и ресурсам памяти.

Рассмотрим пример такого алгоритма, ранее разработанного одним из авторов настоящей работы [34] для измерительной системы с адресным способом сбора измерительной информации. Алгоритм формирует команды опроса (адреса) измерительных каналов с частотами вида:

$$\frac{I_s}{2}, \frac{I_s}{2^2}, \frac{I_s}{2^3}, \dots, \frac{I_s}{2^k}, \dots, \frac{I_s}{2^e}, \quad (1)$$

где I_s – информативность канала передачи потока команд опроса измерительных каналов (опорная или тактовая частота);

l – константа, определяющая минимальную частоту опроса в измерительной системе.

Исходные данные для алгоритма представляют собой список из N команд опроса, а также список величин R_k ($k = 1, 2, \dots, l$)

$$N = \sum_{k=1}^l R_k, \quad (2)$$

где N – общее количество измерительных каналов,

R_k – количество измерительных каналов, опрашиваемых с частотой $\frac{I_s}{2^k}$.

Использование алгоритма позволяет осуществить регулярный опрос измерительных каналов с заданными для них частотами опроса, определенными в соответствии с выражением (1).

Для алгоритма приведены оценки объёма требуемой памяти и быстродействия при его реализации.

Предлагаемый алгоритм представляет собой дальнейшее развитие способа формирования команд опроса измерительных каналов, основанного на табличной структуре. Последняя представляет собой одну таблицу, условно названную базовой таблицей первого уровня, содержащей команды опроса измерительных каналов и ссылки на ряд таблиц второго уровня, содержащих только команды опроса.

Для опроса измерительных каналов базовая таблица циклически просматривается, при этом либо выдаются команды опроса из базовой таблицы, либо по ссылке осуществляется переход на ту или иную таблицу второго уровня и уже из неё выдаётся очередная команда опроса.

Рассмотрим предельный случай табличного алгоритма, когда имеется l – уровневая табличная структура, состоящая из l таблиц по количеству частот, имеющихся в наборе (1).

В k -й таблице ($k = 1, 2, \dots, l$) длины V_k имеется R_k команд опроса измерительных каналов, которые требуется опросить с частотой $\frac{I_s}{2^k}$, а также $V_k - R_k$ ссылок на $k + 1$ -ю таблицу. Для регулярного опроса с частотами (1) необходимо, чтобы длины таблиц удовлетворяли следующим условиям:

$$V_{k+1} = 2 \cdot (V_k - R_k); \quad (k = 1, 2, \dots, l - 1); \quad V_1 = 2, \quad (3)$$

т.е. длина $k + 1$ -й таблицы равна удвоенному числу ссылок в k -ой таблице.

В качестве примера возьмем восьмитабличную структуру со следующими значениями R_k :

$$R_0 = 1; R_2 = 0; R_3 = 2; R_4 = 1; R_5 = 5; R_6 = 1; R_7 = 0; R_8 = 4.$$

Введем следующие обозначения:

КО – команда опроса измерительного канала;

С – ссылка с k -й таблицы на $k + 1$ -ю ($k = 1, 2, \dots, l - 1$);

A_k – текущий адрес элемента в k -й таблице ($k = 1, 2, \dots, l$).

Формирование одной команды опроса осуществляется по сигналу такта частоты I_s и происходит следующим образом.

В соответствии с A_1 анализируется текущий элемент в первой таблице и, если это команда опроса измерительного канала КО, то она является искомой, а если это ссылка С, то осуществляется аналогичный просмотр второй таблицы. В обоих случаях A_1 наращивается на единицу и устанавливается в «1», если A_1 превысит V_1 .

Модифицируем алгоритм, добавив l ячеек для хранения величин R_k ($k = 1, 2, \dots, l$) и убрав из таблиц все ссылки. При этом, при формировании команды опроса, анализ текущего элемента на ссылку заменяется анализом разности $R_k - A_k$. Если она отрицательна, то это означает, что необходимо перейти на проверку $k + 1$ -ой таблицы, в противном случае из k -ой таблицы извлекается команда опроса, расположенная по адресу A_k .

И, наконец, объединив таблицы в единый список из N команд опроса измерительных каналов и воспользовавшись тем фактом, что величина V_k вычисляется рекуррентно при переходе от k -ой таблицы к $k + 1$ -ой (см. выражение (3)), получим алгоритм, представленный ниже, и работающий на основе данных нашего примера. Описание алгоритма приводится в словесно-логической форме. При этом используются следующие обозначения:

k – переменная текущего номера частоты из (1);

V – переменная, используемая для вычисления V_k ;

J – переменная, указывающая на начало текущей группы из R_k команд опроса в списке команд опроса КО(I) ($I = 1, 2, \dots, N$);

I – переменная, указывающая на искомую команду опроса в списке КО(I);

КО – ячейка для хранения команды опроса.

Алгоритм работает следующим образом.

Блок 1. Приводит в исходное состояние адреса A_k ($k = 1, 2, \dots, l$).

Блок 2. Устанавливает на каждом цикле формирования одной команды опроса начальное состояние.

Блоки 3, 4, 5. Наращивают текущее значение адреса $A(k)$ на «1» и сбрасывают адрес $A(k)$ в «1», если его значение равно V .

Блок 6. Анализирует разность $R_k - A_k$ и если она отрицательна, то осуществляется переход к блоку 8, в противном случае в блоке 7 вычисляется текущий номер I искомой команды опроса в списке КО (I). Далее эта команда пере-

мещается в ячейку КО и выдаётся в аппаратуру сбора.

Блок 8. Изменяет адрес начала текущей группы из R_k команд опроса в списке КО (I), вычисляет очередное значение величины V , наращивает переменную k текущего номера частоты на «1» и переходит к блоку 9.

Блок 9. Проверяет, превысило ли значение k количество градаций частот опроса l . Если превысило, то это означает, что не найдена команда опроса измерительного канала. В этом случае в блоке 10 осуществляется выдача «пустой» команды опроса. Если k не превысило l , то алгоритм переходит к поиску команды опроса измерительного канала на следующем частотном уровне.

Алгоритм был реализован в блоке программного управления (БПУ) одной из первых модификаций системы предстартовых измерений ВЛ – 1033 – 03 [26].

Оценки быстродействия программы, а также объём памяти, требуемой для хранения исходных данных и адресов A_k ($k = 1, 2, \dots, l'$), приведены в таблице 1 [34], где для сравнения даны аналогичные показатели для -табличного алгоритма. В таблице приведены также объём памяти (в 16-ти разрядных словах) и максимальное время формирования одной команды опроса (в микросекундах) для двух режимов обмена данными, принятых в системе: «Без прерываний» и «С прерываниями».

Величина Р в таблице 1 обозначает номер частоты опроса $\frac{I_s}{2^P}$, которая является наименьшей среди конкретно заданных частот опроса измерительных каналов;

l – количество градаций частот опроса измерительных каналов;

N – количество измерительных каналов.

Предложенный алгоритм позволяет осуществить адресный опрос измерительных каналов с заданными для этих каналов частотами.

Алгоритм может быть рекомендован для использования в малоинформационных ИИС при информативности порядка $\frac{1}{3}$ кГц, при этом относительно простая структура исходных данных и их малый объём позволяют менять программы опроса измерительных каналов в ходе эксперимента. Однако такие малоинформационные системы в практике современных аэрокосмических телеметрий используются редко.

Кроме того, одним из основных требований, предъявляемых к современным ИИС, является удобство и простота их эксплуатации.

А подготовка к работе систем на базе ресурсоемких алгоритмов, подобных рассмотренному выше, как правило, требует большого объёма исходной информации, зачастую имеющей трудноуловимый физический смысл и требующей громоздких математических вычислений.

Поэтому при разработке математического обеспечения для ИИС с программно-адресным опросом возникла необходимость включить в его состав специальный набор программ (САПР), осуществляющих автоматизированную подготовку и настройку измерительной системы на требуемый режим на основе данных пользователя, удобных для составления задания и имеющих простой физический смысл.

Разработка таких САПР представляет собой весьма затратный процесс, требующий значительных временных и финансовых ресурсов с привлечением квалифицированных специалистов [15, 32, 33]. Поэтому для исключения САПР алгоритмы формирования циклограмм опроса должны разрабатываться таким образом, чтобы пользователю достаточно было задать лишь номера и требуемые частоты опроса измерительных каналов. Все необходимые изменения в задании пользователя должны осуществляться автоматически или в режиме диалога с пользователем, причем так, чтобы это не привело к потере или искажению измерительной информации. Работа в этом направлении далека от завершения.

Ряд алгоритмов [15, 32, 33], по утверждению самих авторов, являются эвристическими, т.е. доказательство их верности и точности получаемых решений для всех возможных на практике случаев не представлено.

В Федеральной космической программе России на 2016-2025 гг., утвержденной постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230, предъявляется требование контроля полёта изделий в реальном времени независимо от зоны радиовидимости наземного измерительного комплекса.

В силу вычислительной сложности и ресурсоемкости известные алгоритмы плохо приспособлены для работы в реальном времени.

Как отмечено выше, в настоящее время в аэрокосмической отрасли выпускаются системы телеизмерений бортового применения в количестве, необходимом для информационно-телеметрического обеспечения пусков и испытаний изделий АТ и РКТ. Это ИИС «Гамма», «Скут», «Орбита» IV МО (с модификациями), «Оникс», «БИТС2Ц», «Пирит РБс», «Пирит РБДМ», «Астра» (с модификациями), «Барракуда», MIC-1150, MIC- 710 [19-27].

В ПСД большинства перечисленных систем используется программное управление опросом ТМП, т. е. решается одна и та же стандартная задача – формирование циклограмм опроса ТМП в соответствии с заданной ПИ. При этом предприятия-разработчики решают эту задачу на основе своего опыта и традиций (при разработке новой системы эта задача каждый раз решается заново), используя собственные методики, алгоритмы и блоки управления (ГФК).

В отрасли не налажена система стандартизации технических решений. Предприятия не предоставляют подробную научно-техническую информацию, считая ее корпоративной и являющейся коммерческой тайной. Объединять усилия разных предприятий не принято, необходимые знания разрознены и не структурированы. В результате тратятся финансовые и интеллектуальные ресурсы на решение одних и тех же типовых задач, сравнение эффективности применяемых методов и средств затруднено или невозможно.

Примером может служить система «Орбита IV АН5-01» [17], применяющаяся на изделиях РКТ семейства «Ангара». Несмотря на значительный объем документа «Руководство по эксплуатации» – 485 листов текста, в нем не описываются теоретические основы и алгоритмы формирования циклограмм сбора, причины выбора и преимущества сложной структуры ГТС, в которой 12-ти разрядные слова-измерения последовательно группируются во фразы, фразы – в группы, группы – в циклы, циклы – в кадры. Соответственно, используются маркерные сигналы шести типов: маркеры фразы, группы, цикла, номера группы, кадра, четности, причем маркеры могут быть как распределенные, так и сосредоточенные.

Основной сигнал синхронизации – СЛЖ-маркер кадра (МК) в виде кодированной 12-ти разрядной посылки определенного вида передается один раз в секунду.

Имеются исследования [8], которые показывают, что при такой частоте смены кадров время вхождения в синхронизм при сбоях составляет 160 микросекунд. Из этого следует, что структура данных ГТС БРТС «ОРБИТА-IVMO» не оптимальна на протяжении всего участка полета изделия: она является лучшей для начального участка полета и наихудшей для условий приема ТМИ на конечном участке полета ракеты.

Структура адресов измерительных каналов ИТС «ОРБИТА-IV» соответствует принятой системе распределения информативности, в основу которой положено ступенчатое октавное распределение опросов, где в качестве ступеней приняты виртуальные регистры – делители на число восемь с последовательным сдвигом фазы выходных сигналов относительно входной частоты.

Программируемое повышение частоты опросов достигается запараллеливанием выходов виртуальных регистров. В результате адрес канала задается сложным сочетанием буквенных и цифровых символов, составляющих набор координат и вспомогательных обозначений, определяющих «виртуальную» ступень деления информативности, фазу выходного сигнала делителя и коэффициент запараллеливания.

Сложная система распределения информативности и адресации каналов, в свою очередь, требует от пользователя, при подготовке ПИ, построения так называемого иерархического «дерева» распределения опросов (рис. 3) и таблиц адресации каналов в группах приборов с предварительным разделением абонентов по четырем потокам информативности.

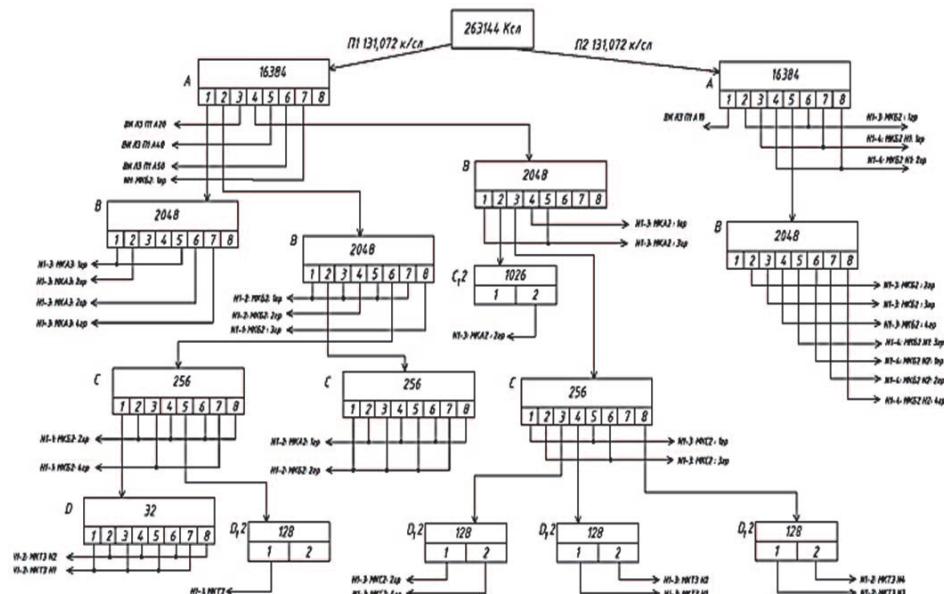


Рисунок 3 – «Дерево» распределения опросов (информативности)
для системы «ОРБИТА-IVMO»

Каждый из потоков имеет свои ограничения и условия по их использованию для организации опроса (по типу подключаемых модулей, по наличию или отсутствию прибора МБУ, количеству опросов – не более 131072 опросов в секунду, количеству подключенных коммутаторов – не более восьми, периоду сигналов опроса, вариантам запараллеливания каналов) [20].

Такая процедура требует высокой квалификации пользователя, повышает трудоемкость и затрудняет процесс подготовки ПИ и «прошивок» памяти постоянного запоминающего устройства приборов собственными силами без привлечения разработчиков системы.

Помимо изделий РКТ семейства «Ангара» модификации системы ИТС «Орбита» используются и на некоторых других изделиях отрасли, поэтому условие формирования выходного ГТС в структуре кадра «Орбита IV» часто включается заказчиками в перечень требований технического задания на разработку перспективных бортовых систем телеметрии. Вследствие этого сложная структура ГТС, а также алгоритм распределения информативности и адресации каналов ИТС «Орбита» получили распространение еще в некоторых отечественных БРТС последних разработок: «Оникс», «Астра», «Барракуда» [21, 23, 24] (см. пример в табл. 2).

Таблица 2 – Пример составления таблицы телеметрических адресов и номеров контактов моноблока формирования телеметрического кадра (МФТК) для малогабаритной радиотелеметрической системы (МРТС) «ОНИКС» (ФК – функциональный канал, ЦИ – цифровая информация)

№	Коммутатор (абонент)	Телеметрический адрес						Тип слова	Раз./Конт. на МФТК
1	ЦИ	10	22					T10	X5/40 – инв. X5/41
2	ФК-1	1к	10	10	12	10		T01	X1/13
3		2к	10	10	12	20		T01	X2/26
4		3к	10	10	12	30		T01	X1/5
5		4к	10	10	12	40		T01	X2/34
6		5к	10	10	12	50		T01	X1/14
7		6к	10	10	12	60		T01	X2/27
8		7к	10	10	12	70		T01	X1/6
9		8к	10	10	12	80		T01	X2/35
10		9к	10	31	10			T01	X1/15
11	ФК-2	10к	10	31	20			T01	X2/28
12		11к	10	31	30			T01	X1/7
13		12к	10	31	40			T01	X2/36
14		13к	10	31	50			T01	X1/16
15		14к	10	31	60			T01	X2/29
16		15к	10	31	70			T01	X1/8
17		16к	10	31	80			T01	X2/37

№	Коммутатор (абонент)	Телеметрический адрес					Тип слова	Раз./Конт. на МФТК
		10	50	10				
18	ФК-3	17к	10	50	10		T01	X1/12
19		18к	10	50	20		T01	X2/25
20		19к	10	50	30		T01	X1/4
21		20к	10	50	40		T01	X2/33
22		21к	10	50	50		T01	X1/11
23		22к	10	50	60		T01	X2/24
24		23к	10	50	70		T01	X1/3
25		24к	10	50	80		T01	X2/32
26	ФК-4	25к	50	22	10		T01	X1/10
27		26к	50	22	20		T01	X2/23
28		27к	50	22	30		T01	X1/1
29		28к	50	22	40		T01	X2/31
30		29к	50	22	50		T01	X1/9
31		30к	50	22	60		T01	X2/22
32		31к	50	22	70		T01	X1/2
33		32к	50	22	80		T01	X2/30

Резюмируя вышеизложенное, подведем итоги.

Программно-адресное управление коммутацией ТМП и формированием ГТС широко используется в ПСД современных и перспективных ИИС, применяемых для испытаний и отработки изделий аэрокосмической отрасли.

Процедура программного управления переключением измерительных каналов ТМП в разветвленных структурах ПСД современных цифровых систем телеметрических измерений реализуется с помощью специальных функциональных узлов (блоков) ГФК. Эти блоки генерируют циклограммы опроса (переключения) каналов ПСД для различных участков полета изделия.

При этом формирование циклограммы происходит согласно заложенным алгоритмам и в соответствии с заданной ПИ, в результате чего формируется, в итоге, ГТС, поступающий на модулятор передающего устройства.

Эффективность алгоритмов и узлов ГФК определяет эффективность системы управления ПСД, а также ключевые характеристики и потребительские свойства ИИС: информационную и структурную гибкость, рациональность расхода ресурса информативности, точность и достоверность передачи данных, требования к квалификации специалистов по разработке ПИ и эксплуатации систем.

Известные алгоритмы формирования циклограмм опроса используют сложные системы распределения информативности и адресации каналов, обладают сложной структурой с ветвленими и внутренними циклами и, соответственно, являются ресурсоемкими по отношению к вычислительным ресурсам и ресурсам памяти. Это снижает быстродействие узлов ГФК, увеличивает время формирования циклограмм и потери данных при смене ПИ.

В силу ресурсоемкости известные алгоритмы плохо приспособлены для работы в реальном времени, а в ряде случаев заказчик выдвигает такое требование.

Недостатки теоретического обоснования сдерживают совершенствование и стандартизацию существующих и разработку новых эффективных алгоритмов, вследствие чего некоторые алгоритмы [15, 32, 33] являются эвристическими, т.е. их верность и точность решения для всех возможных случаев не исследована.

Многие алгоритмы не доведены до практических инженерных методик и поэтому отсутствуют данные об их использовании в структурах узлов ГФК конкретных систем телеметрии.

Поэтому задача разработки теоретической базы и моделей процессов и алгоритмов размещения адресов опроса множества измерительных каналов разветвленных структур ПСД в единый периодический ряд (формирования циклограмм опроса) с постоянным, индивидуальным для каждого канала шагом дискретизации, заданным в ПИ, без наложений и пропусков, синтеза на основе этой базы и моделей более эффективных (в смысле потребления аппаратных и программных ресурсов) алгоритмов и структур блоков ГФК, доведения их до инженерных методик и их практического применения при разработке перспективных систем является одной из важнейших задач организации сбора данных на борту изделия и не теряет актуальности для рассматриваемого класса систем телеметрии.

Перспективы решения задачи в такой общей постановке зависят от успешного решения ряда следующих частных задач.

Анализ количественных характеристик первичных информационных потоков и спектральных свойств составляющих ТМП типовых изделий авиационной и РКТ.

Анализ существующего математического, методического и алгоритмического обеспечения формирования циклограмм опроса и вывод дополнительных необходимых условий корректного размещения адресов опроса каналов в общем ряду без наложений.

Аналитический обзор и оценка возможностей известных алгоритмов формирования циклограмм опроса, структурных решений реализующих функциональных узлов ГФК, их классификация на основе выделенных существенных признаков, а также поиск путей их совершенствования и устранения основных недостатков.

Исследование влияния вида математического закона формирования членов ограниченного ряда допустимых периодов \widetilde{T}_k (частот $f_{v(n)}$) опроса каналов на возможность синтеза и ресурсоемкость алгоритмов формирования циклограмм опроса по заданной программе измерений, разработка рекомендаций по выбору ряда для практических применений.

Разработка наглядной информационно-функциональной графовой модели [35] и адекватного математического описания процедуры размещения сигналов переключения измерительных каналов ИИС в единую программируемую циклическую последовательность на основе определения начальных фаз сигналов.

Синтез на основе разработанных теоретических положений эффективных алгоритмов, обеспечивающих точное решение задачи генерации программируемых циклограмм опроса и структур функциональных узлов ГФК, обладающих

улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Исследование вопросов практического использования разработанных алгоритмов формирования циклограмм и функциональных узлов программного управления сбором и группированием данных в системах телеизмерений бортового и наземного применения.

Некоторые из перечисленных задач в известной степени решены [36-42], другие по-прежнему продолжают оставаться актуальными задачами и ждут своего решения.

Выводы

Анализ номенклатуры отечественной телеметрической аппаратуры показал, что программно-управляемый сбор данных является одной из наиболее востребованных функций и неотъемлемой частью технического облика современных и перспективных систем бортовых измерений АТ и РКТ, определяющих их ключевые характеристики и потребительские свойства:

- информационную и структурную гибкость, рациональность расхода ресурса информативности, точность и достоверность передачи данных, требования к квалификации специалистов по разработке ПИ и эксплуатации систем, возможности корректировки и составления ПИ без привлечения разработчиков системы.

Задача стандартизации, совершенствования существующего и разработки нового математического, алгоритмического и аппаратурного обеспечения формирования программируемых циклограмм опроса для управления сбором данных не теряет актуальности для рассматриваемого класса систем телеизмерений, при этом основными задачами должны быть:

- обобщение существующих и разработка новых теоретических методов и моделей, составляющих математическую основу синтеза алгоритмов формирования циклограмм опроса;

- разработка на этой базе менее ресурсоемких алгоритмов, отличающихся повышенным быстродействием и меньшей вычислительной сложностью;

- проектирование функциональных узлов ГФК, реализующих предложенные алгоритмы, и исследование вопросов их практического применения;

- отраслевая стандартизация и практическое внедрение полученных результатов.

Достижение поставленной цели при решении перечисленных задач позволит повысить эффективность управления процессами сбора, группирования и передачи данных в ПСД многоканальных ИИС, обеспечивающих сбор и обработку различных по спектральному составу функциональных и сигнальных параметров (ММП и БМП).

Литература

1. Поленов Д.Ю., Мороз А.П. О применении беспилотного летательного аппарата для ретрансляции телеметрической информации разгонного блока // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2015. Т. 19. № 3. С. 131-136.

2. Мороз А.П., Герасимов В.А. Система передачи информации с зонда из дальнего космоса на землю // Информационно-технологический вестник. 2022. № 4(34). С. 136-146.
3. Кравченко А.И., Воловик А.М., Мороз А.П., Артемьев В.Ю., Рыжов Б.Н. Патент на изобретение RU 2422994 С1, 27.06.2011. Заявка № 2010112095/09 от 29.03.2010. Способ передачи и приема телеметрической и командной информации в одном диапазоне радиочастот многопоточной радиосистемы и устройство для его осуществления.
4. Кукушкин С.С., Мороз А.П. Патент на изобретение RU 2115172 С1, 10.07.1998. Заявка № 93013012/09 от 10.03.1993. Способ передачи информации и устройство для его осуществления.
5. Аббасова Т.С., Мороз А.П., Васильев Н.А., Стреналюк Ю.В. Оптимизация конструкции беспроводных устройств связи из композитных материалов // Двойные технологии. 2016. № 2(75). С. 49-51.
6. Повышение эффективности телеметрирования быстроменяющихся параметров при натурных испытаниях летательных аппаратов / А.П. Мороз: Монография. Королев МО, ФТА. 2012. 224 с.
7. Назаров А.В., Козырев Г.И. и др. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб: Наука и Техника, 2007. 667 с.
8. Кукушкин С.С., Матусов В.Г. Основные проблемные вопросы информационно-телеметрического обеспечения испытаний ракетно-космической техники при появлении нештатных и аварийных ситуаций // Двойные технологии. № 2(43). 2008. С. 20-26.
9. Соколов И.С. Методы и модели восстановления структуры группового телеметрического сигнала: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб. 2012. 17 л.
10. План проспект НИР «Исследование и разработка требований к системам контроля в обеспечение создания телеметрических систем для РКТ нового поколения тяжелого и среднего классов в целях получения упреждающей информации при нештатных ситуациях и контроле состояния компонентов РН и РБ» (шифр «Интеллектуализация»). 2009. 11 л.
11. Толстов А.С. Первые эпизоды истории ракетного комплекса «Ангара» и отдела анализа космодрома «Плесецк» [Текст] / Толстов А.С.: Воспоминания начальника отдела анализа. Королёв МО: Издательство АО «ПСТМ», 2018. 160 с.
12. ТЗ на СЧ ОКР «Двина – КВТК». Дополнение к ЭП «Бортовая радиотелеметрическая система на базе системы «Пирит-РБс». 2018. 64 л.
13. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии. М.: Энергия, 1973. 592 с.
14. Ракетная телеметрия: монография / А.П. Мороз. М.: Издательство «Научный консультант», 2021. 478 с.
15. Kovriga Ю.Ю. Автоматизация проектирования программы телеметрических измерений изделий ракетно-космической техники: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара. 2007. 16 л.

16. Кукушкин С.С., Матусов В.Г. Математические модели формирования оптимальных структур передаваемых данных телеметрий // Двойные технологии. № 4. 2006. С. 18-26.
17. Грибков Н.М., Савин В.И. Автоматизированные средства сбора, обработки и представления телеметрической информации // Приборы и системы управления. № 8. 1993. С. 26-28.
18. Средства агрегатные информационно-измерительных систем. Общие требования к организации взаимодействия средств при построении систем. ГОСТ 22316-77. М: Издательство стандартов, 1977. 21 с.
19. Система СКУТ 40. Инструкция по эксплуатации. 2015. 106 л.
20. Система ИТС «ОРБИТА IV АН5 – 01». Руководство по эксплуатации. 2012. 297 л.
21. Малогабаритная радиотелеметрическая система «ОНИКС». Руководство по эксплуатации БЫ 1.590.027 РЭ. 2013. 48 л.
22. Система «Пирит-РБс». Техническое описание. 2007. 38 л.
23. Аппаратура УМРТС «АСТРА». Руководство по эксплуатации. 2020. 243 л.
24. Бортовая телеметрическая система «Барракуда». Презентация. 2010.
25. Системы бортовых измерений ООО НПП «МЕРА». 2020. 32 л.
26. Система ВЛ1033-03. Техническое описание. 1984. 50 л.
27. Система 11Ю77КМ1. Руководство по эксплуатации. 2019. 87 л.
28. Полехин А.И., Полехина Г.Е., Алексеев В.Н. Методическое и математическое обеспечение формирования циклограмм опроса информационных источников в бортовых системах программируемой телеметрии. Статья в сборнике: Труды 4 ЦНИИ Минобороны России. Королев. 2021. Выпуск № 163. Том 2. Изв. № 218326. Статья № 23. С. 158-166.
29. Виттих В.А., Цыбатов В.А. Оптимизация бортовых систем сбора и обработки данных. М.: Наука, 1985. 175 с.
30. Шушков Е.И., Щодиков М.Б. Многоканальные аналого-цифровые преобразователи. Л: ЭНЕРГИЯ, 1975. 159 с.
31. Михеев А.А. Теория, методы и средства сбора и обработки неоднородных по частотным свойствам измерительных сигналов: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Рязань. 2006. 32 л.
32. Жаринова Л.А. Метод автоматизированного проектирования подсистемы опроса телеметрической аппаратуры: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара. 1994. 16 л.
33. Плесовских А.К. Методы и средства совместной оптимизации структуры и состава аппаратуры бортовой телеметрической системы: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2008. 19 л.
34. Полехин А.И. Алгоритм формирования команд опроса измерительных каналов. Сборник статей под ред. В.В. Чернова, вып.10, НИИИТ, ГОНТИ-21, 1981. С. 115-121.

- 35.Пальченков Ю.Д. Цифровые устройства и микропроцессоры: Конспект лекций. Пенза. Пензенский государственный технический Университет. 1994. 106 с.
- 36.Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Математические критерии формирования единой временной периодической последовательности адресов источников информации в системах бортовых измерений с программно-управляемым сбором данных // Информационно-технологический вестник. № 1(27). 2021. С. 41-52.
- 37.Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Генератор форматов группового телеметрического сигнала для систем измерений с программно управляемым способом сбора данных // Информационно-технологический вестник. № 2(28). 2021. С. 58-68.
- 38.Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Специализированный вычислитель-формирователь последовательностей команд опроса каналов программируемых цифровых систем телеметрии // II международная научно-практическая конференция «Цифровая трансформация науки и образования». Россия. Нальчик. Кабардино-Балкарский Государственный Университет им. Х.М. Бербекова. 01-04 октября 2021 г. С. 79-89.
- 39.Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Повышение производительности алгоритма построения циклограммы команд опроса в многоканальных телеметрических системах с программно-управляемым сбором информации // Информационно-технологический вестник. № 2(32). 2022. С. 83-96.
- 40.Мороз А.П., Полехин А.И., Полехина Г.Е., Полехина К.А. Анализ свойств рядов допустимых частот опроса телеметрируемых параметров в системах программируемой телеметрии для контроля и испытаний сложных аэрокосмических изделий // Информационно-технологический вестник. № 1. 2023. С. 101-118.
- 41.Мороз А.П., Полехина Г.Е., Полехин А.И. Специализированный вычислитель-формирователь последовательностей команд опроса каналов программируемых цифровых систем телеметрии // В сборнике: Цифровая трансформация науки и образования. Сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции. Нальчик. 01-04 октября 2021 года. С. 79-89.
- 42.Мороз А.П., Полехин А.И., Полехина Г.Е. Структурная и алгоритмическая оптимизация спецвычислителя циклических последовательностей команд управления переключением информационных каналов в цифровых системах сбора и передачи данных // III международная научно-практическая конференция «Цифровая трансформация науки и образования». Россия. Нальчик. Кабардино-Балкарский Государственный Университет им. Х.М. Бербекова. 30 июня-03 июля 2023 г. 392 с. С. 80-90.

УДК 67.15.63

**Анализ перспективы использования топологического самозацепления
при строительстве транспортной инфраструктуры
в условиях Крайнего Севера**

Алина Викторовна Каргина, ассистент кафедры

«Материаловедения и технологии художественных изделий»,

Данила Денисович Вернигоров, научный ассистент профессора кафедры
«Материаловедения и технологии художественных изделий» В.Ю. Пиирайнена,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
г. Санкт-Петербург

В данной работе представлены результаты анализа проблем, возникающих в ходе освоения территорий Крайнего Севера, а также методов их решения, как уже реализуемых на практике, так и разрабатываемых на теоретическом уровне. Отражены основные положения теории самозацепления. Отмечены принципиальные отличия и преимущества немонолитных (сегментированных) конструкций, спроектированных и изготовленных с использованием принципа самозацепления. Проведен анализ возможностей практического применения принципов топологического самозацепления при строительстве объектов транспортной инфраструктуры в условиях Крайнего Севера.

Топологическое самозацепление, архитектурные материалы, остеоморфные блоки, транспортная инфраструктура.

Analysis of the prospect for using topological interlocking in the construction of transport infrastructure in the Far North

Alina Viktorovna Kargina, assistant of the Department
of Materials Science and Technology of Art Products,

Danila Denisovich Vernigorov, scientific assistant to the professor of the Department
of Materials Science and Technology of Art Products V.Yu. Piirainen,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the
«Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University», Saint Petersburg

This paper presents analysis problems that arose during the development of the territories of the Far North, as well as methods for solving them, both already implemented as an example and designed at a theoretical level. The main provisions of the concept of interlocking are reflected. The fundamental differences and advantages of non-monolithic (segmented) structures, defined and manufactured using the interlocking principle, are noted. An analysis of the possibilities of practical

application of the termination of topological interlocking during the construction of transport employment facilities in the conditions of the Far North was carried out.

Topological interlocking, architectural materials, osteomorphic blocks, transport infrastructure.

Введение. Более 10,5 млн км² территории России находится в зонах распространения многолетних мерзлых пород (61,4%). Районы Крайнего Севера и Западной Сибири характеризуются как наиболее перспективные для поиска, разведки и добычи нефти и газа [20, С. 82]. При этом грунт в данных регионах склонен к криогенному растрескиванию при замерзании, что создает трудности при освоении месторождений полезных ископаемых.

Эффективное развитие минерально-сырьевого потенциала арктических территорий во многом зависит от уровня освоенности региона и без вложения значительного объема инвестиций в обустройство гражданской и промышленной инфраструктуры не может быть достигнуто [2, С. 459]. На строительство объектов добычи сырья приходится меньшая часть инвестиций по сравнению с объемами затрат на обустройство общей инфраструктуры [19, С. 439].

Активное освоение территорий является актуальным вызовом устойчивого развития Крайнего Севера, в результате чего создается транспортно-логистический комплекс. Он служит основой для развития дорожно-транспортной системы северных регионов, строительство и содержание которой сталкивается с рядом затруднений. Существующая транспортная инфраструктура подвержена влиянию слабых грунтов и деформации, а строительство новой обходиться крайне дорого из-за отсутствия на местах необходимых компонентов классической дорожной одежды.

Вышеописанная ситуация напрямую связана с региональными климатическими особенностями Арктической зоны Российской Федерации и является одновременно причиной и следствием проблемы низкого уровня развития транспортных и информационных связей между хозяйствующими субъектами и населенными пунктами [17, С. 451].

Изменения, происходящие в криолитозоне в последние десятилетия, оказали непосредственное влияние на климатические условия Крайнего Севера. Температура вечной мерзлоты повысилась в полярных регионах, что повлияло на целостность естественной и искусственной среды. Прогнозы указывают на то, что потепление и таяние вечной мерзлоты будут продолжаться в ответ на изменение климата и потенциально ускоряться [10, С. 10].

Изменчивость природной среды ранее не всегда учитывалась при строительстве на северных территориях, в связи с чем, без должного геокриологического и геотехнического прогноза значительная часть инфраструктуры оказалась подвержена преждевременному разрушению из-за потери устойчивости оснований и фундаментов [18, С. 744].

Группа исследователей под руководством Яна Хьорта (Финляндия) смоделировали климатические изменения и последующее таяние вечной мерзлоты в Северном полушарии до 2050 года. По результатам моделирования

была составлена панарктическая карта угрозы целостности инфраструктуры. Оказалось, что около 70% инфраструктуры находится в потенциальной зоне риска, а около 30% находится в районах, где риск деградации вечной мерзлоты особенно высок. В опасной зоне находится Печора на севере европейской части России, север и центральная часть Сибири, Якутия. Особое внимание уделяется угрозе добычи и транспортировки углеводородов в российской Арктике [5, С. 2].

Прогнозируется, что в условиях антропогенного потепления к 2050 году 30-50% критической заполярной инфраструктуры будет подвергаться высокому риску. Соответственно, затраты на инфраструктуру, связанные с деградацией вечной мерзлоты, могут возрасти до десятков миллиардов долларов США ко второй половине века [6, С. 25].

Вечная мерзлота – одна из ключевых особенностей природы российской Арктики, которая определяет специфику возведения большинства капитальных строений в этом регионе. В последнее время глобальные климатические изменения, особенно быстрый рост температуры у поверхности земли, значительно повлияли на природные условия, снижая стабильность и целостность многолетних мерзлых пород, что приводит к их таянию и деградации, уменьшая несущую способность и вызывая оттепельные просадки. В результате значительная часть территории стала зоной повышенного инвестиционного риска, включая строительство и обслуживание транспортной инфраструктуры, развитие которой имеет решающее значение для развития этого важного макрорегиона [9, С. 574].

В условиях Крайнего Севера инженерные риски при возведении объектов транспортной инфраструктуры в основном связаны с климатическими особенностями региона и антропогенным воздействием. Свойства асфальтового покрытия сильно зависят от климатических факторов, таких как температура и осадки. Изменчивость температурных и влажностных условий влияет на свойства материала дорожного покрытия, что впоследствии приводит к изменению его эксплуатационных характеристик [16, С. 986]. Диапазон температур, которым подвергается асфальтовое покрытие, колеблется между -45°C зимой и $+50^{\circ}\text{C}$ летом. В зоне его прокладывания и на прилегающей территории происходит изменение условий теплообмена, что влияет на тепловое состояние грунтов. Также на состояние транспортной инфраструктуры влияют процессы сезонного замораживания-оттаивания, нестабильные болотистые почвы и наличие многолетних мерзлых пород. При этом необходимо ориентироваться на несущую способность арктических грунтов, подверженных процессам глобального изменения климата, прогнозировать их состояния при различных сценариях изменения криолитозоны Арктики. Все эти факторы создают неблагоприятные условия для выполнения асфальтобетонных работ, а впоследствии приводят к деформации транспортной инфраструктуры, в частности к просадкам и морозному пучению. Циклы замораживания и оттаивания негативно влияют на состояние асфальта. Вода, проникающая в поры материала дорожного полотна, меняет содержание и форму пустот, тем самым влияя на внутреннюю структуру асфальта и способствуя его ускоренному разрушению.

Негативное воздействие факторов окружающей среды на конструкции дорог и других объектов транспортной инфраструктуры требует прогнозирования. Российский ученый в своем исследовании был нацелен на создание математической модели образования криогенных трещин в грунте. Данная модель отражает термомеханические и геомеханические процессы в промерзающем грунте, учитывая при этом динамику их развития. В отличие от известных методик, решение, описанное в работе, позволяет учесть перераспределение внутренних сил, потоков температуры и влаги в грунтовом массиве по направлениям трех координатных осей. Предлагаемая методика позволяет предотвратить угрозу повреждения объектов в условиях распространения вечной мерзлоты [11, С. 9].

Повышенные инженерные риски в районах Крайнего Севера вынуждают применять при строительстве объектов транспортной инфраструктуры высокотехнологичные материалы. Благодаря научным изысканиям исследователей из Китая были разработаны новые материалы, подходящие для работы в экстремальных климатических условиях. Одним из таких материалов является токопроводящий бетон из графенового композита, описанный в 2021 году в работе ученых из Китая. Использование токопроводящего бетона является эффективным способом решения проблемы образования снега и льда на дорогах в холодных регионах, а благодаря графену можно значительно улучшить проводимость такого материала [14, С. 1].

При проведении работ в северных районах необходимо не только тщательно анализировать технологические процессы, но и критично подходить к вопросам обеспечения безопасности, экологичности и минимизации отходов. Ряд исследований был направлен на изучение влияния резиновой крошки на морозостойкость цементно-грунтового покрытия. Испытания показали, что частицы резины препятствуют развитию микротрещин морозного пучения. Таким образом, помимо решения экологической проблемы, использование резиновых отходов при укладке асфальта может повысить его морозостойкость [13, С. 120].

В другой работе были исследованы характеристики замораживания-оттаивания прорезиненных бетонов, армированных стальным волокном. Как предполагают авторы, включение стальных волокон значительно снижает негативное влияние больших объемов каучука на морозостойкость. Результаты показывают, что разработанные бетоны способны выдерживать 56 циклов замораживания-оттаивания без внутренних повреждений или ухудшения механических характеристик. Это указывает на то, что образцы могут эксплуатироваться в экстремальных условиях замерзания и оттаивания и использоваться для строительства долговечных гибких дорожных покрытий в качестве альтернативы асфальтобетонам [1, С. 450].

В условиях воздействия климатических факторов Крайнего Севера важно использовать строительные материалы с высокой устойчивостью к замерзанию и оттаиванию. Приводя пример, стоит упомянуть о разработке серосодержащих композиционных материалов, подходящих для строительства транспортных объектов в арктическом регионе. Сера не подвергается коррозии при

транспортировке и хранении, а материалы на ее основе достигают заданных характеристик после охлаждения и не нуждаются в особых температурных и влажностных режимах [12, С. 728].

Для обеспечения фундаментального понимания взаимосвязи между низкой температурой и режимами разрушения, в США были проведены исследования многослойных композитных конструкций из пенополивинилхлорида с лицевыми пластинами из полимера, армированного углеродными волокнами. Многослойные композиты из полимеров, армированных углеродным волокном, широко применяются в различных отраслях промышленности благодаря хорошей удельной жесткости на изгиб, отличной теплоизоляции и способности к звукопоглощению. Однако такие композиты восприимчивы к динамическим и статическим нагрузкам, а также к воздействию экстремальных температур. В данной работе образцы были подвержены испытаниям на низкоскоростной удар при трех различных температурах, а затем на трехточечный изгиб. Показано, что в результате влияния низкой температуры и энергии удара на режимы разрушения при изгибе, аналитические модели изображают вдавливание, сдвиг сердцевины, разрушение сердцевины при изгибе и ее отслоение [7, С. 1]. Подобные исследования вносят свой вклад в разработку композиционных материалов для безопасного и эффективного применения в арктической зоне.

Таким образом, необходимым условием дальнейшего эффективного освоения Крайнего Севера является разработка и внедрение инновационных технологий. Модернизация инфраструктур способствует повышению качества жизни населения и развитию отраслей промышленности.

Строительство автомобильных дорог с цементобетонным покрытием является важным элементом реализации транспортной инфраструктуры в Арктике, что обеспечивает значительное увеличение межремонтных периодов и дает дополнительные экономические преимущества от эксплуатации дорог с таким типом покрытия.

В зонах распространения вечной мерзлоты при строительстве автомобильных дорог есть два основных подхода. Первый заключается в сохранении существующих мёрзлых грунтов, во втором же случае грунтам позволяют оттаивать. Независимо от выбора подхода проект строительства дорожного покрытия должен содержать в себе обоснованное техническое решение для обеспечения стабильности условий, чтобы грунты под инженерными объектами всегда находились в выбранном состоянии.

В арктической тундре почти нет круглогодичных дорог. Но к промышленным объектам и разрабатываемым месторождениям необходимо обеспечивать непрерывную доставку оборудования, топлива, материалов и продовольствия. Решением становится строительство зимников, требования к которым не менее жесткие, чем при строительстве обычных грунтовых дорог. Стоимость работ по постройке зимников может доходить до многих сотен миллионов рублей. Так же соизмеримы затраты по их обслуживанию. Срок же эксплуатации зимника 4-6 месяцев.

В поисках новых материалов, адаптированных к природно-

климатическим условиям Арктики, авторы обратили внимание на материалы с внутренней архитектурой, геометрия составляющих элементов которых вместе с их взаимным расположением становятся определяющими факторами, управляющими свойствами материала и не зависят от химического и фазового состава. Благодаря такому подходу становится возможным использовать полный потенциал механически прочных материалов, подверженных чрезмерной хрупкости и обеспечить им прочность при изгибе путем сегментации на топологически самозацепленные элементы. Для фиксации такой конструкции связующие вещества не требуются, ведь смещение блоков затруднено соседними элементами. Однако стоит отметить, что для удержания на месте блоков, расположенных на периферии сборки, требуется дополнительные связи. Они могут быть обеспечены, например, внешней рамой или угловыми креплениями. При этом если на границах раздела блоков дополнительно обеспечить упругую прослойку, обнаруживается существенное повышение прочности и ударной вязкости [4, С. 1165].

Одним из преимуществ конструкций, изготовленных на основании концепции топологического самозацепления, является возможность интегрирования в сборку любых материалов, какими бы «несовместимыми» они ни были. Это открывает перспективу для создания гибридных материалов, в которых набор желаемых свойств достигается путем комбинирования материалов с различными характеристиками. Возможность объединения различных материалов в единой системе позволяет обеспечить многофункциональность конструкций, в том числе эксплуатируемых в арктических условиях.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является анализ возможностей и перспектив использования при строительстве в условиях Крайнего Севера материалов и конструкций, изготовленных на основе принципа топологического самозацепления.

Материалы с внутренней архитектурой. За многие годы исследований и разработок накоплены обширные знания о механических характеристиках различных видов композитных материалов. Конструкции, создаваемые из них, в значительной степени обязаны интуиции, а не формализованному процессу проектирования. Одним из источников вдохновения является живая природа. Данный подход к разработке материалов на основе подобия построению биологических структур живой природы является предметом исследований такого направления науки, как биомиметика. Характеристики созданных природой материалов определяются синтезом их физических и химических свойств и морфологии поверхности. Понимание этих характеристик, а также функций, присущих объектам и процессам, встречающимся в природе, может способствовать созданию совершенно новых материалов и технологий. Данный принцип, несомненно, обогащает инструментарий, используемый при проектировании новых материалов.

В некоторых случаях принципы, найденные в биологических структурах, напрямую переносятся в биомиметические инженерные материалы. Однако чаще всего созданные конструкции мало напоминают биологические материалы, на

основе которых были разработаны. Причина заключается в том, что принцип структурной оптимизации дает результаты, зависящие от условий, которые крайне различны для биологических и инженерных систем.

Большинство инженерных материалов, таких как металлы, полимеры, керамика и различные виды композитов, являются монолитными. Изменение химического и фазового состава, а также совершенствование технологий производства и обработки таких материалов является традиционным подходом к улучшению их свойств. Несмотря на все преимущества, возможности такого подхода могут сталкиваться с рядом ограничений. Проектирование новых материалов путем создания их внутренней архитектуры, а не изменения их состава, позволяет снять ограничения и является развивающимся направлением в материаловедении.

В отличие от композитов, которые подразумевают специально созданную морфологическую структуру путем объединения разнородных материалов (волокна, слои, включения, сетки и т.д.), архитектурные материалы образуются в результате оптимизации взаимодействия их структурных элементов.

Среди выявленных особенностей архитектурных материалов – их способность выполнять функции с меньшим химическим разнообразием, чем у обычных материалов. Таким образом, архиматы легче перерабатываются, так как требуется меньше усилий для разделения их различных компонентов.

Подход к проектированию архитектурных материалов, рассматриваемый в данной статье, заключается в идентификации и использовании процессов, лежащих в основе биологических структур, таких, например, как опорно-двигательный аппарат человека и механизм его функционирования. Композиция систем, форм и характеристик взаимосвязанных элементов строения человеческого тела, а также сочетание твердых и жидких сред порождает уникальные свойства, позволяющие организму функционировать в различных условиях и выдерживать серьезные нагрузки.

Авторы убеждены, что, как и в природе, можно добиться уникальных свойств, разделив материал на части. Таким образом, принцип создания архитектурных материалов, рассматриваемый в данной работе, основан на идее, что сегментирование материала на более мелкие элементы должно повысить его сопротивление разрушению, а также придать ему другие важные свойства, которые будут описаны ниже. Структуры, созданные на основе данной идеи, состоят из элементов, положение которых обеспечивается кинематическими ограничениями, накладываемыми соседними блоками благодаря их особой геометрии и взаимному расположению в составе сборки. Данный принцип проектирования материалов получил название топологического самозацепления.

Новые принципы формообразования, базирующиеся на концепции топологического самозацепления, были впервыезвучены и представлены научной общественности группой австралийских ученых во главе с профессором университета Монаша Ю. Эстриным 2001 году [3, С. 2689]. Примечательно, что концепция топологического самозацепления стала популярной среди архитекторов, которые увидели в ней особый эстетический потенциал, а также в конструкциях, основанных на данном принципе.

Исследования австралийских ученых не могли остаться незамеченными. Группа ученых из Китая посвятила свою работу изучению сборок выпуклых блоков, расположенныхных так, чтобы они были структурно стабильными для различных конструкций произвольной формы. Авторы задались вопросом возможности применения концепции самозацепления не только для плоских сборок, но и для криволинейных поверхностей [15, С. 11]. В работе был представлен новый алгоритм проверки стабильности сборки, который учитывает не только смещение, но и поворот блоков, а также позволяет пользователям управлять различными параметрами конструкции и оптимизировать сборку для повышения прочности.

На первом этапе концепция топологического самозацепления рассматривала тетраэдрическую геометрию составляющих элементов материала. Позже были рассмотрены взаимосвязи форм для всех платоновых тел: тетраэдр, октаэдр, гексаэдр, додекаэдр и икосаэдр (рис. 1).

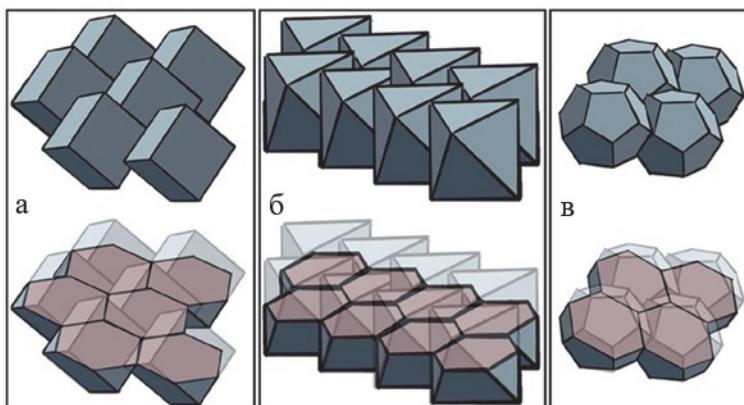


Рисунок 1 – Топологически самозацепленные сборки платоновых тел:
а – кубы, б – октаэдры, в – додекаэдры [4, С. 1168]

С большим спектром возможных самозацепленных структур довольно сложно определить форму элементарных блоков, которая обеспечила бы наилучшие свойства. Поскольку самозацепление не является исключительной чертой платоновых тел, была предложена геометрия остеоморфных блоков (рис. 2), зацепление которых обеспечивается соответствующими вогнуто-выпуклыми контактными поверхностями [4, С. 1167].

В остеоморфном блоке поверхности спроектированы таким образом, что возможны как плоские, так и угловые конструкции, что делает этот блок удобным конструктивным элементом. Форма блокирующих поверхностей делает блоки самонастраивающимися, так что любое, даже очень неточное первоначальное размещение блока смягчается путем самопозиционирования блоков в правильное место. Это свойство самонастройки может быть важным для автоматизации строительных технологий.

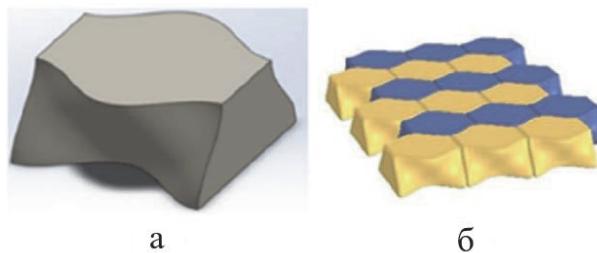


Рисунок 2 – Остеоморфные блоки: а – геометрия отдельного блока, б – плоская сборка самозацепленных остеоморфных блоков [4, С. 1169]

В зависимости от предполагаемого применения предпочтение может отдаваться либо выпуклому многограннику, либо остеоморфному блоку, поскольку они обеспечивают разные уровни несущей способности, устойчивости к отсутствующим или разрушенным блокам и т.д. Одно из преимуществ геометрии остеоморфного типа перед полиэдрической – плоскость поверхности слоя, образованного сборкой. Сборка же платоновых тел, за исключением октаэдров, имеет рельефную, а не ровную поверхность (если только не используются усеченные блоки).

Одной из отличительных особенностей сегментированных конструкций, изготовленных с использованием принципа топологического самозацепления, является сохранение их работоспособности под нагрузкой, даже если при этом разрушена часть блоков. Поскольку блоки не скреплены между собой, трещина, зародившаяся в одном из них и распространяющаяся в сторону его границы с соседним блоком, должна идти извилистым путем сквозь структуру материала, образуя вторичные трещины на границах раздела блоков. Таким образом, происходит рассеивание энергии и повышение сопротивления разрушению. Прежде чем произойдет распад сборки, необходимо разрушение около 25% остеоморфных блоков [4, С. 1173], что дает возможность намеренно исключить из сборки часть элементов в целях облегчения конструкции без потери структурной целостности.

Использование сегментации материала является особенно перспективным во многом благодаря возможности придать жесткому и хрупкому материалу податливость. Подтверждая вышеизложенное, исследования, проведенные сотрудниками австралийского университета, показали, что сегментированная конструкция с границами раздела из резины выдерживает испытания на изгиб без повреждения блоков и конструкции в целом, в отличие от монолитной плиты и сборки без прослойки [4, С. 1174].

К основным свойствам топологически самозацепленных структур, которые могут быть использованы при разработке и проектировании новых архитектурных материалов, относятся:

- повышенная прочность при изгибе по сравнению с монолитными конструкциями;
- устойчивость к локальным разрушениям;

- возможность комбинировать любые материалы в единой системе, обеспечивая многофункциональность конструкции;
- высокая энерго- и звукопоглощающая способность;
- простота сборки, что открывает возможность роботизированного производства конструкций;
- простота разборки, что позволяет практически полностью перерабатывать блоки.

Такой набор свойств открывает обширные возможности применения топологически самозацепленных структур. К примеру, они могут быть использованы для создания систем защиты объектов промышленного и гражданского строительства, в том числе береговых сооружений и зданий в сейсмических зонах. Также принцип самозацепления может применяться для звукоизоляции промышленных и жилых помещений. Еще одной возможностью является использование для строительства временных жилищ в районах стихийных бедствий. Данный список не является исчерпывающим. Авторы предполагают, что подход топологического самозацепления может быть эффективно использован при создании материалов и конструкций для эксплуатации на Крайнем Севере. Например, создание временных и постоянных дорог и взлетно-посадочных площадок.

Основываясь на концепции применения в дорожном строительстве принципа топологического самозаклинивания, можно предположить, что благодаря сегментации конструкции дороги на отдельные блоки, нагрузки со стороны транспорта, а также влияние слабых грунтов могут быть минимизированы.

Данное предположение уже было озвучено в предшествующей работе научного руководителя авторов данной статьи. Суть представленной разработки заключается в особой технологии монтажа конструкции дороги, по которой один из ее слоев состоит из сегментированной конструкции сборных остеоморфных блоков. Дальнейшие экспериментальные исследования доказали прочностные преимущества сегментированной конструкции над монолитной. Результаты анализа методом конечных элементов в программной системе ANSYS показали, что переход от монолитной конструкции к сегментированной обеспечивает более равномерное распределение напряжений в сборке. Это гарантирует больший запас прочности. Аналогичные данные были получены при прочностных испытаниях сегментированных панелей в реальных условиях, а дополнительное наличие прослойки позволило обеспечить водонепроницаемость конструкции, а также улучшить ее несущую способность и трещиностойкость [8, С. 431].

Компьютерное моделирование, несомненно, расширяет возможности в проектировании топологически самозацепленных конструкций. Создание адекватной математической модели для расчета их параметров является одной из главных задач авторов, которую предстоит решить благодаря дальнейшим исследованиям. Разработка такой модели позволит ускорить процесс проектирования самозацепленных конструкций для применения в арктической зоне. Данный инструмент должен учитывать форму и характеристики различных материалов, объединенных в топологически взаимосвязанную структуру,

механизм их взаимодействия, а также перераспределение внутренних напряжений. Для решения вышеописанной задачи могут подойти возможности программной системы анализа ANSYS. Метод конечных элементов, применяемый данной системой, позволит при верно заданных параметрах оценить возникающие в конструкции напряжения при контактном взаимодействии элементов.

Возможность изготовления систем топологически самозацепленных элементов в данной работе рассматривается как ориентир для создания гибких архитектурных материалов с высокой стойкостью к разрушению и ударопрочностью. Ожидается, что дальнейшие исследования в области создания архитектурных материалов на основании принципа топологического самозацепления откроют новые возможности в проектировании материалов для эксплуатации в условиях Крайнего Севера.

Новые идеи, полученные в результате анализа данных компьютерного моделирования и экспериментальных исследований, позволят в будущем проектировать топологически взаимосвязанные структуры с заданными механическими свойствами.

Заключение. В данной работе авторы постарались обобщить существующие сведения о материалах и технологиях, разрабатываемых и применяемых в условиях Крайнего Севера, а также об исследованиях принципа топологического самозацепления, тем самым создав задел для дальнейших изысканий в изучаемой области.

Несмотря на существенный прогресс в разработке материалов и технологий, адаптированных к эксплуатации в криолитозоне, проблема транспортной доступности Крайнего Севера является актуальной и ожидает новых решений. В результате проведенного анализа авторы пришли к заключению о целесообразности внедрения подхода к проектированию и созданию реальных конструкций на основе принципа топологического самозацепления. В связи с этим необходимо проведение всесторонних испытаний в лабораторных и полигонных масштабах для критической оценки правомочности перенесения их результатов в реальные условия. На основании данного заключения выдвинута тема научных исследований – Разработка материалов и технологий для строительства в условиях Крайнего Севера. Идеей настоящего исследования является концепция создания новых материалов с внутренней архитектурой (гибридных материалов, архиматов), базирующаяся на принципе топологического самозацепления, для проектирования конструкций опорных оснований транспортной инфраструктуры (дорог, взлетно-посадочных площадок и т.д.).

Современные строительные материалы и технологии открывают новые возможности для создания конструкций на основе модульного принципа, одна из наиболее интересных форм которого – топологическое самозаклинивание. По мнению авторов, метод топологического самозаклинивания является перспективным подходом к проектированию материалов и конструкций, способных эффективно функционировать в условиях Крайнего Севера.

Литература

1. Alsaif A., Bernal S.A., Guadagnini M., Pilakoutas K. Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete // Construction and Building Materials. 2019. V. 195. № 2. P. 450-458. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.103.
2. Carayannis E.G., Cherepovitsyn A.E., Ilinova A.A. Sustainable Development of the Russian Arctic zone energy shelf: the Role of the Quintuple Innovation Helix Model // Journal of the Knowledge Economy. 2017. V. 2. № 8. P. 456-470. DOI: 10.1007/s13132-017-0478-9.
3. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. A new concept in design of materials and structures: assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements // Scripta Materialia. 2001. V. 44. № 12. P. 2689-2694. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00968-X.
4. Estrin Y., Krishnamurthy V.R., Akleman E. Design of Architected Materials Based on Topological and Geometrical Interlocking // Journal of Materials Research and Technology. 2021. V. 15. № 19. P. 1165-1178. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.08.064.
5. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Etzelmüller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature Communications. 2018. V. 9. № 1. 5147. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
6. Hjort J., Streletschiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nature Reviews Earth and Environment. 2022. V. 3. P. 24-38. DOI: 10.1038/s43017-021-00247-8.
7. Khan M.H., Tan K.T. Post-impact flexural collapse modes of composite sandwich structures in Arctic conditions: Analytical prediction and experimental validation // Composites Science and Technology. 2020. V. 195. 108187. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108187.
8. Piirainen V.Y., Troshina E.Yu., Malyushin I.M. The new concept of road construction for the difficult to access oil-producing regions // Topical issues of rational use of natural resources 2019. 2020. V. 15. № 1. P. 427-433. DOI: 10.1201/9781003014577-5.
9. Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletschiy D.A. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Road Infrastructure Sustainability under Climate Change in the Russian Arctic // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. V. 89. № 6. P. 567-576. DOI: 10.1134/S1019331619060121.
10. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K., Noetzli J., Romanovsky V.E. The changing thermal state of permafrost // Nature Reviews Earth and Environment. 2022. V. 3. P. 10-23. DOI: 10.1038/s43017-021-00240-1.
11. Stetjukha V.A. Frost cracks formation in permafrost regions // Magazine of Civil Engineering. 2021. V. 104. № 4. P. 1-11. DOI: 10.34910/MCE.104.5.
12. Vasilev Y., Eremin V., Gorky D. Innovative sulfur-containing materials for transport construction in the Arctic region // Transportation Research Procedia. 2021. V. 57. P. 728-734. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.106.

13. Wang F., Ping X., Zhou J., Kang T. Effects of crumb rubber on the frost resistance of cement-soil // Construction and Building Materials. 2019. V. 223. P. 120-132. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.208.
14. Wang X., Wu Y., Zhu P., Ning T. Snow melting performance of graphene composite conductive concrete in severe cold environment // Materials. 2021. V. 14. № 21. 6715. DOI: 10.3390/ma14216715.
15. Wang Z., Song P., Isvoranu F., Pauly M. Design and structural optimization of topological interlocking assemblies // ACM Transactions on Graphics. 2019. V. 38. № 6. P. 1-13. DOI: 10.1145/3355089.3356489.
16. Zeiada W., Hamad K., Omar M., Underwood B.S., Khalil M.A., Karzad A.S. Investigation and modelling of asphalt pavement performance in cold regions // Materials. 2019. V. 20. № 8. P. 986-997. DOI: 10.1080/10298436.2017.1373391.
17. Алексеева М.Б., Богачев В.Ф., Горенбургов М.А. Системная диагностика стратегии развития промышленности Арктики // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 450-458. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.450.
18. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Железняк М.Н., Мельников В.П., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртинов М.Р., Сергеев Д.О., Фёдоров Р.Ю., Фролов К.Н. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756. EDN IMQTQY.
19. Череповицын А.Е., Липина С.А., Евсеева О.О. Инновационный подход к освоению минерально-сырьевого потенциала Арктической зоны РФ // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 438-444. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.
20. Черкай З.Н., Гридина Е.Б. Технологические проблемы и основные положения методики инженерно-геокриологических исследований при строительстве и эксплуатации скважин в многолетнемерзлых породах // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 82-85. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.82.

УДК 621.454.2

Разработка технологии изготовления блока сопла методом селективного лазерного сплавления

Александр Сергеевич Семерич, главный технолог АО «КБхиммаш»
им. А.М. Исаева, г. Королев, Московская область

Представлены результаты работы по отработке конструктивных и технологических решений для изготовления блока сопла камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя методом селективного лазерного сплавления. Разработана технология серийного изготовления сопел камер сгорания ЖРД методом СЛС. Проведены огневые испытания камеры сгорания с соплом, изготовленным методом СЛС по программе испытаний с 1,5 ресурсом. Проанализированы сравнительные экономические показатели для обоснования целесообразности внедрения сопла, изготовленного методом СЛС в конструкцию двигателя, изготавливаемого серийно.

Жидкостный ракетный двигатель, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, сплав Инконель 718.

Development of technology for manufacturing a rocket engine nozzle by selective laser melting

Aleksandr Sergeevich Semerich, the chief technologist of KBHimmash JSC named after A.M. Isaeva, Korolev, Moscow region

The results of the work on the development of design and technological solutions for the manufacture of a rocket engine nozzle by selective laser melting are presented. The technology of serial production of rocket engine nozzles by the SLM method has been developed. The fire tests of the combustion chamber with a nozzle made by the SLM method according to the test program with a 1.5 resource were completed. Comparative economic indicators are analyzed to justify the feasibility of introducing a nozzle manufactured by the SLM method into the design of a mass-produced engine.

Rocket engine, additive manufacturing, selective laser melting, Inconel 718 alloy.

Аддитивные технологии являются активно развивающимся технологическим направлением во всем мире. Внедрение аддитивных технологий в производство жидкостных ракетных двигателей позволяет снижать себестоимость изготовления выпускаемой продукции, повышать коэффициент использования материала при изготовлении деталей и сборочных единиц, сокращать производственные циклы изготовления деталей и сборочных единиц, повысить надежность изделия в целом. Указанные выше эффекты от внедрения аддитивных технологий входят в перечень стратегических задач космической отрасли. Как отмечает-

ся в [1, 2] применение методов аддитивного производства для изготовления основных деталей ракетного двигателя позволяет снизить почти в 10 раз стоимость и сократить на 80% сроки изготовления за счет изменения конструкции двигателя и отказа от ряда технологических операций.

Для разработки модернизированной конструкции блока сопла жидкостного ракетного двигателя за основную технологию аддитивного производства был выбран метод селективного лазерного сплавления (СЛС). Процесс печати по технологии селективного лазерного сплавления заключается в послойном выборочном сплавлении частиц порошкообразного материала лазером в заранее сформированном слое до образования физического объекта по заданной CAD-модели [3]. Сложность конструкции блока сопла камеры сгорания ЖРД обусловлена наличием внутренних регенеративных каналов охлаждения, а технология изготовления является трудоемкой и представляет собой следующую цепочку операций: методом холодной штамповки формируется необходимая геометрия внутренней оболочки блока сопла с припусками под дальнейшую механическую обработку; далее выполняется фрезерование каналов и на ребра каналов производится нанесение ленты припоя при помощи контактно-точечной сварки; производится сборка со штампованными наружными верхней и нижней рубашкой, приваркой коллектора и последующей пайкой в вакуумной печи [4]. Штатная конструкция блока сопла состоит из 8 деталей сборочных единиц, соединенных между собой по технологии сварки и пайки. Оптимизированная конструкция для изготовления методом СЛС состоит из единой детали (рис.1), что позволило повысить надежность изделия благодаря отсутствию вышеуказанных соединений.

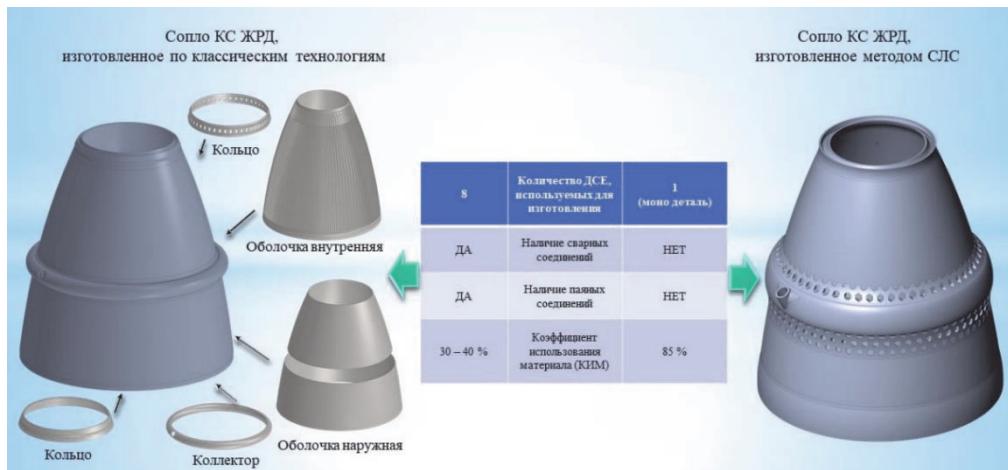


Рисунок 1 – Сравнение конструкции блока сопла КС ЖРД

В качестве материала для изготовления блока сопла методом СЛС был выбран порошок хромоникелевого сплава Инконель 718 с гранулометрическим составом 15-45 мкм. Данный сплав обладает высокой прочностью на разрыв при температурах до 700 °C, высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью [5]. Основные параметры режима изготовления блока сопла на уст-

новке СЛС представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры СЛС порошка Инконель 718

Толщина нанесения порошка на рабочую платформу (рабочий слой)	40 мкм
Мощность лазерного излучения при сплавлении основного материала	285 Вт
Ширина штриховки (сплавления) основного материала за один проход	10 мм
Перекрытие между проходами	0,12 мм
Скорость работы сканирующей системы (при сплавлении основного металла)	600 мм/с
Мощность лазерного излучения при сплавлении контура детали	120 Вт
Скорость работы сканирующей системы (при сплавлении контура детали)	700 мм/с

Для подтверждения механических свойств полученных заготовок (табл. 2) одновременно с блоком сопла изготовлены образцы-свидетели для разрывных и ударных испытаний. Заготовка блока сопла совместно с образцами-свидетелями прошла термообработку по режиму: нагрев в вакууме до 1060 °C, выдержка 1 час, охлаждение в печи со скоростью 4 °C/мин до 100 °C.

Таблица 2 – Механические свойства сплава Инконель 718

Вид образца	Температура испытаний, °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Цилиндрический разрывной	20	1290	1141	14,3
		1294	1122	14,8
		1305	1190	15
		1297	1134	14,7
		1315	1232	17,9
		1330	1204	16,8
	650	1180	970	19,1
		1198	1005	19,1
		1166	983	22,1

Вид образца	Температура испытаний, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
		1194	1035	17,9
		1170	991	17,8
		1192	1004	20,5
Ударный	20	Ударная вязкость KCV, Дж/см ²		
		63	68	
	-196	52,7	53,9	

При проведении холодных испытаний блока сопла камеры сгорания воздухом на прочность при давлении 220 атмосфер было выявлено вздутие подводящего коллектора (рис. 2). В конструкции блока сопла первой итерации подводящий коллектор был выполнен в виде трапеции по сечению. Для предотвращения разрушения коллектора при требуемом конструкторской документацией давлении в 220 атм была проведена оптимизация формы коллектора (рис. 3). Изготовленный усеченный по высоте имитатор зоны подводящего коллектора блока сопла камеры сгорания ЖРД выдержал испытание на прочность при давлении воздуха 220 атмосфер, а также прошел испытание без разрушения и деформации при максимальном давлении в 340 атмосфер. Блок сопла второй итерации, изготовленный с оптимизированной конструкцией подводящего коллектора, прошел испытания на прочность, герметичность и гидравлическую проливку при расходе 1,2 кг/с с результатом по перепаду 0,96 атмосферы, что соответствует требованиям конструкторской документации.



Рисунок 2 – Подводящий коллектор первой итерации



Рисунок 3 – Подводящий коллектор второй итерации

Камера сгорания жидкостного ракетного двигателя состоит из смесительной головки, блока камеры и блока сопла, соединенных между собой при помощи сварки. Для соединения медного сплава блока камеры с нержавеющей сталью блока сопла используется электронно-лучевая сварка, однако соединение с аустенитной нержавеющей сталью напрямую невозможно из-за возникновения разрушающего металл эффекта Ребиндера и для качественного сварного соединения используется вставка из аустенитно-ферритной нержавеющей стали [6]. Данная вставка приваривается к оболочке внутренней блока сопла на начальных стадиях изготовления (после штамповки до фрезерования каналов охлаждения). Блок сопла, изготовленный методом СЛС, полностью состоит из хромоникелевого сплава Инконель 718, который удовлетворительно сваривается с медными сплавами и не подвержен возникновению эффекта Ребиндера. Для отработки режимов электронно-лучевой сварки были изготовлены имитаторы сварного соединения блока камеры с блоком сопла. После получения качественного сварного соединения и проведения радиографического контроля, имитаторы прошли испытание на прочность и герметичность в соответствии с требованиями конструкторской документации с положительными результатами. По отработанным режимам сварки произведена сборка блока сопла, изготовленного методом СЛС с блоком камеры, изготавливаемым серийно по литерированной документации.

Для подтверждения работоспособности оптимизированного блока сопла в составе серийно изготавливаемого ЖРД проведены огневые испытания камеры сгорания (рис. 4). Все параметры огневых испытаний, такие как давление в КС, перепад давлений, подогрев горючего в тракте охлаждения блока сопла и температура конструкции соответствуют требованиям ТУ на КС. Ресурс работы вы-

полнен 1,5 ресурса.

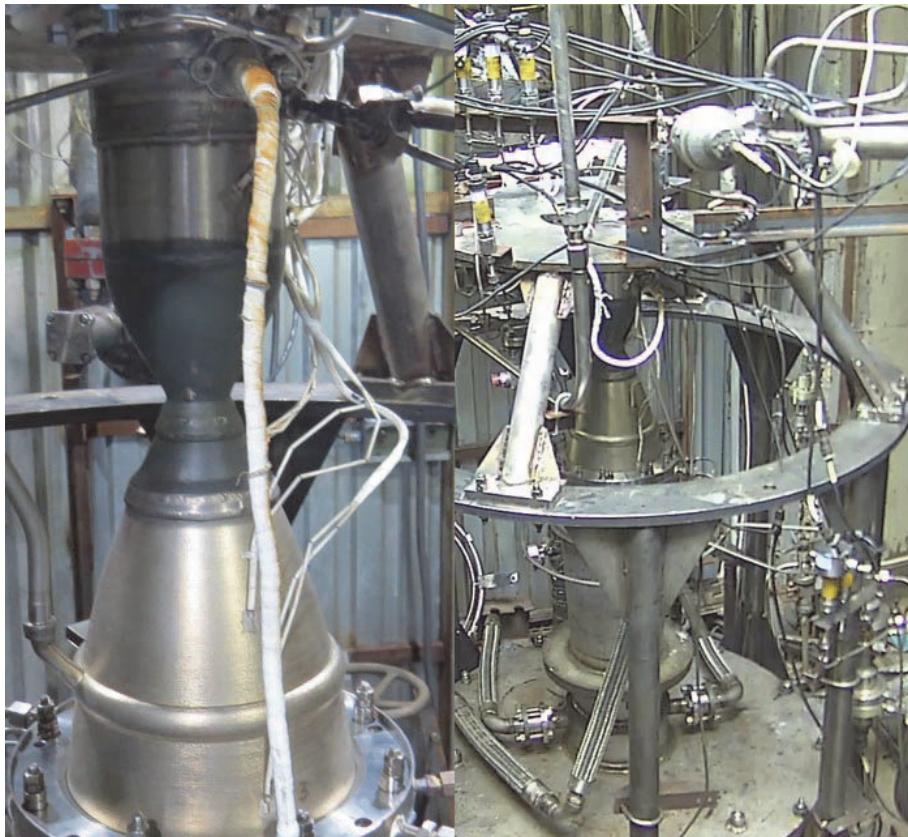


Рисунок 4 – Огневые испытания камеры сгорания

По результатам отработки технологии изготовления блока сопла методом селективного лазерного сплавления для внедрения технологии в серийно изготавливаемый двигатель разработаны технические условия, содержащие требования для руководства по изготовлению, методам постобработки и контроля. Технические условия содержат требования и руководства всей технологической цепочки изготовления блока сопла от входного контроля исходного сырья до заполнения паспорта на изделие и гарантий изготовителя.

Сравнительный экономический анализ изготовления блока сопла показал, что трудоемкость изготовления классическими технологиями составляет 153 н/ч на 1 шт., тогда как аддитивными технологиями – 75 н/ч, и стоимость изготовления с учетом применяемых материалов ниже на 35% при применении аддитивных технологий. Отдельно стоит отметить календарный срок изготовления изделий с применением аддитивных технологий, так как цикл работы оборудования непрерывен и идет в 3 смены в выходные и праздничные дни, то сравнительно с классическими односменными, редко 1,5-2 сменными технологиями скорость изготовления выше более чем в 3 раза. Проведенный анализ показывает, что со-

временные технологии производства не только повышают качество и надежность изготавливаемой космической техники, но и сокращают стоимость и сроки ее изготовления, что должно способствовать поддержанию конкурентоспособности космической отрасли РФ в современных реалиях.

Литература

1. Jones C.P., Robertson E.H., Koelbl M.B., Singer C. Additive manufacturing a liquid hydrogen rocket engine // NASA Marshall Space Flight Center. 2015.
2. Robertson E.H. Additive Manufacturing Demonstrator Engine // NASA Marshall Space Flight Center. 2016.
3. Qing Teng, Shuai Li, Qingsong Wei, Yusheng Shi. Investigation on the influence of heat treatment on Inconel 718 fabricated by selective laser melting: Microstructure and high temperature tensile property // Journal of Manufacturing processes 2021. № 61. С. 35-45.
4. Воробей В.В., Логинов В.Е. Технология производства жидкостных ракетных двигателей. М.: МАИ, 2001. 496 с.
5. Логачева А.И., Сентюрина Ж.А., Логачев И.А. Аддитивные технологии производства ответственных изделий из металлов и сплавов (обзор) // Перспективные материалы. 2015. № 5. С. 5-15.
6. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. М.: МАШГИЗ, 1958. 335 с.

УДК 674.815

Оптимальное использование древесно-пластиковых композитов в гражданском строительстве

Борис Леонидович Спирин, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики,

Сергей Владимирович Фролов, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой механики и инженерной графики,

Екатерина Юрьевна Шуляк, преподаватель кафедры механики и инженерной графики,

Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное Учреждение Высшего образования «Академия ГПС МЧС России», г. Москва

В данной статье рассматривается зависимость свойств древесно-полимерных композитов от типа используемого сырья и вида процессов его получения. Развитие древесно-полимерных композитов в последнее время получило достаточно большой стимул в связи с развитием химической промышленности и новых методов переработки. Данные материалы могут быть использованы в различных областях гражданского строительства. При их использовании для каждого конкретного применения может быть получен композит с определенными, нужными именно для данной области свойствами. Здесь рассмотрены процессы оптимизации такого производства, для наиболее оптимального использования исходного сырья и наиболее точного получения нужных характеристик.

Композиционные материалы, мономеры, полимеры, термопласт.

Optimal use of wood-plastic composites in civil engineering construction

Boris Leonidivich Spirin, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

Sergei Vladimirovich Frolov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

Ekaterina Yurievna Shuliak, Senior Lecturer of the Department of Mechanics and Engineering Graphics,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«State Fire Academy of EMERCOM of Russia», Moscow

This article examines the dependence of the properties of wood-polymer composites on the type of raw materials used and the type of processes for its production. The development of wood-polymer composites, which has recently received quite a large boost in connection with the development of the chemical industry and new processing methods. These materials can be used in various fields of civil engineering. When used for each specific application, a composite can be obtained with specific

properties required specifically for a given area. Here we consider the processes of optimizing such production for the most optimal use of raw materials and the most accurate obtaining of the desired characteristics.

Composite materials, monomers, polymers, thermoplastics.

Вводная часть

Значительный рост объема строительной продукции, особенно в странах Юго-восточной Азии, привел к значительному увеличению спроса на новые и альтернативные экологически безопасные материалы, которые находят всё большее применение в различных сферах гражданского строительства. Особенно сильно возрастает потребность в композитах, получаемых из природных возобновляемых ресурсов, и, что не менее важно, из отходов промышленности, что стимулирует более активное внедрение процессов вторичной переработки материалов. В работе будут рассмотрены некоторые аспекты оптимизации производства Древесно-пластиковых композитов (ДПК) для наиболее рационального применения их в гражданском строительстве.

В качестве материала для исследования был выбран ДПК, изготовленный из отходов деревообработки хвойных пород древесины таких как ель и сосна, поскольку они наиболее часто встречаются в лесах нашего региона, а их опилки практически не находят применения в промышленности. Композиты ДПК (WPC) состоят из сосновых опилок, полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) (HDPE) с использованием в качестве связующего полиэтилена с привитым малеиновым ангидридом (PE-g-MA). Адгезивная смола с привитым малеиновым ангидридом предназначена для прочного соединения частиц многослойного композита, поскольку в ней наблюдается очень сильная химическая связь, а также температурная стабильность. Помимо этого, данная смола очень хорошо подходит для экструзии – основного процесса производства ДПК, и, что немаловажно, обладает достаточно большой гибкостью, а значит продукция может быть использована для различных видов конструкционных элементов, работающих на различные виды деформации. Одно из основных применений данных композитов – использование их для декорирования фасадов зданий, требует адекватного сочетания многих пользовательских характеристик, касающихся устойчивости к погодным условиям, механических и функциональных свойств ДПК. Для наиболее удачного сочетания данных характеристик была применена оптимизация процессов получения материала, которая началась с тщательного изучения физико-механических и химических свойств исходного сырья, а также изучения влияния количества опилок и связующего реагента на окончательные свойства композита. Композиты с оптимальным составом компонентов были подвергнуты испытаниям на растяжение, а также были проведены различные измерения их свойств. Это позволило найти нужную структуру на микроуровне, которая отвечала за механические и химические взаимодействия, термическую и механическую стабильность, смачиваемость и водопоглощение.

Описание композита

Технологии создания Древесно-пластиковых композитов (ДПК) получили развитие начиная с 70-х-80-х годов прошлого века, и традиционно под этим понимали материалы, состоящие из древесных опилок и термопластичных поли-

меров. В наше время, в связи с внедрением новых методов обработки, произошла революция в получении продукта и теперь под термином ДПК понимают любые виды композитов, в состав которых входят растительные волокна и термореактивные или термопластичные полимеры. В связи с этим, поскольку свойства составляющих могут сильно различаться, в состав композита вводят различные добавки, способствующие совместимости волокон и полимерного связующего.

При выборе типа полимера для ДПК приходится учитывать то, что термопласти дают возможность повторного плавления для использования их, например, в двухэтапном процессе производства, когда ранее полученный композит окончательно формируется в экструдере при повышенном давлении, а также допускают повторную переработку. Термореактивные композиты могут быть использованы только в более простых одноэтапных производствах, поскольку необратимо переходят в новую фазу при повышенных температурах и не могут быть заново переработаны.

Постоянное совершенствование технологий производства ДПК и улучшение свойств используемых при его производстве компонентов приводит к тому, что ДПК становится всё более экологически чистым материалом, всё более удовлетворяет требованиям «зеленой химии». Это достигается внедрением в его состав новых натуральных полимеров, а также то, что используемые при производстве растительные волокна являются природным сырьем ежегодно возобновляемым и их доступность сейчас и далее практически не ограничена. Кроме того по результатам отдельных исследований можно сделать вывод, что количество углекислого газа полученного в результате сжигания композита после окончания его применения примерно соответствует тому, что материал адсорбирует за время роста, а поскольку натуральные полимеры допускают переработку и последующее применение, соответственно материал всё больше удовлетворяет требованиям экологии по защите окружающей среды и её сохранения для последующих поколений. Помимо этого, всё большую популярность ДПК обеспечивают высокая долговечность, низкая стоимость эксплуатационных расходов, достаточно высокие прочность и жесткость, стойкость к природным условиям, а также то, что материал не требует финишной обработки, такой как шлифование и покраска. Композит может быть изготовлен из отходов промышленного производства других материалов, количество которых за последние годы становится все больше, поскольку все больше древесины используется при строительстве зданий, в мебельной и целлюлозно-бумажной промышленности. Они могут быть использованы как наполнители или армирующие агенты полимерной матрицы древесно-полимерного композита. Особенно большой эффект улучшения свойств ДПК дает применение адекватных полимеров с привитым малеиновым ангидридом (-g-МА), называемых иногда связующими агентами. При использовании этих добавок, улучшающих взаимодействие между гидрофильной матрицей и гидрофобным наполнителем можно не только повысить междуфазную адгезию и механические свойства, но и уменьшить способность к поглощению влаги, а значит ограничить процессы разбухания и увеличить биологическую стойкость ДПК. Также при изготовлении композита на стадии производства можно внести пигменты и добавки, которые сразу обеспечат нужный цвет и фактуру изделия, а также дадут необходимую защиту от ультрафиолетового излучения. При выборе типа наполнителя, которым обычно являются древесные опилки,

необходимо учитывать, что их разрушение обычно происходит при достаточно низких температурах, а значит нужно по возможности минимизировать время нахождения в расплаве термопласта, оптимизировав процесс смешения композита и его последующего экструдирования.

Большое разнообразие полимеров и древесных волокон, применяющихся в процессе производства ДПК, которые могут иметь очень похожие физико-механические свойства, требует тщательного изучения компонентов до и после процесса изготовления для правильного решения задачи оптимизации процесса получения ДПК с нужными характеристиками.

Целью было оптимизировать процесс получения композита на основе полиэтилена с высокой плотностью (HDPE) и опилок хвойных пород, а также связующего агента, состоящего из полиэтилена с привитым малеиновым ангидридом (PE-g-MA) с требуемыми свойствами методом экструзии. Помимо физико-механических свойств одним из требований было получения экологически чистого материала.

Используемые компоненты

В таблице 1 приведены основные технические данные для синтетических полимеров HDPE (E 226 и E 265), а также связующих PE-g-MA (HMA 035 и KS10100 UE) используемых в процессе работы. В таблице использованы следующие обозначения: γ плотность; ТТД температура тепловой деформации (HDT – heat deflection temperature) – температура, при которой композит под действием заданной нагрузки изгибаются на определённую величину; $T_{пл}$ температура плавления; ПТР показатель текучести расплава (характеризует скорость течения расплавленного термопласта через сопло заданного при стандартных температуре и давлении) (масса 2,16 кг при 190 °C); σ_y – напряжение при растяжении на пределе текучести; δ_y – деформация растяжения при текучести; δ_p – деформация растяжения при разрыве.

Таблица 1 – Основные характеристики материалов

Тип	γ (г/см ³)	ТТД (°C)	$T_{пл}$ (°C)	ПТР (г/10 м)	σ_y (МПа)	δ_y (%)	δ_p (%)
HMA 035	0.97	74	135	8	25	10	>100
E 226	0.93	95	130	1.76	-	-	-
KS 10100	0.96	128	-	5	25	-	>1500
E 265	0.95	-	130	12	-	-	-

В экспериментах были использованы различные хвойные опилки, которые предварительно были высушены в течение нескольких дней при температуре 60-70 °C, с постоянным перешиванием для получения равномерной влажности всей массы исходного сырья. Затем при помощи вибрационного сепаратора, в который были установлены сетки с размером ячеек 3; 1,5 и 0,5 мм соответственно, опилки были распределены по фракциям со следующими обозначениями: пыль (F) с размером < 0,5; мелкая (M) с размером от 1,5 до 0,5; крупная (C) с

размером от 1,5 до 3; и щепа (Х) с размером более 3 (все размеры приведены в миллиметрах). Условная плотность каждой фракции была определена при помощи заполнения емкости определенного стандарта, вибрационного уплотнения и взвешивания. Эти эксперименты проводились для каждого типа размера несколько раз для получения среднего результата. При определении характеристик каждой фракции использовались методы спектрометрии и изучения при помощи микроскопического анализа. Также изучением при помощи микроскопа и спектральным анализом были исследованы полимерные материалы, применяемые в экспериментах. Для удаления возможной поверхностной влаги, крайне нежелательной для производства, наличие которой может привести к разбуханию и даже гниению наполнителя, полимерные материалы были подвергнуты сушке при температуре, не превышающей 50°C , чтобы не допустить предварительного расплавления образца. Также исследование материалов проводилось при помощи сдвиговой реометрии, испытания на растяжение,угла смачивания и набухания. При выборе полимерного материала применяемого для производства ДПК, необходимо учитывать не только физико-механических свойств компонентов данного композита, но также учитывать различные взаимодействия, возникающие в материале при его производстве и эксплуатации. Полимерные термопластики имеют достаточно низкую температуру плавления, поэтому при их обработке можно использовать различные комбинации методов, но также они характеризуются достаточно сложным поведением в расплаве, например, вязкость отдельных частей композита при разных температурах может изменяться в достаточно значительных пределах, что является одним из важнейших факторов качества конечного композита. Реометрия была использована не только для оптимизации конечного композита, но и для проверки стабильности процессов смешивания. Вязкость термопластика определяется в виде отношения между напряжением и соответствующей скоростью деформации расплава для реометров, работающих на сдвиг по формуле (1).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \tau = \frac{F}{A}, \dot{\gamma} = \frac{1}{h} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

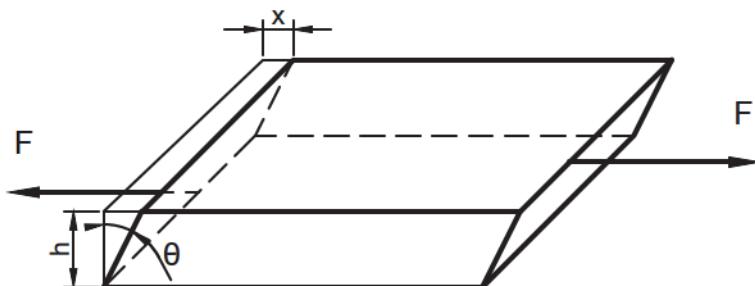


Рисунок 1 – Определение вязкости на сдвиг
θ – угол сдвига; F – сила; h – высота композита, h – сдвиг слоев

Определяется при помощи реометров.



Рисунок 2 – Тестеры вязкости расплава
а) тестер массовой скорости потока расплава
б) капиллярный реометр

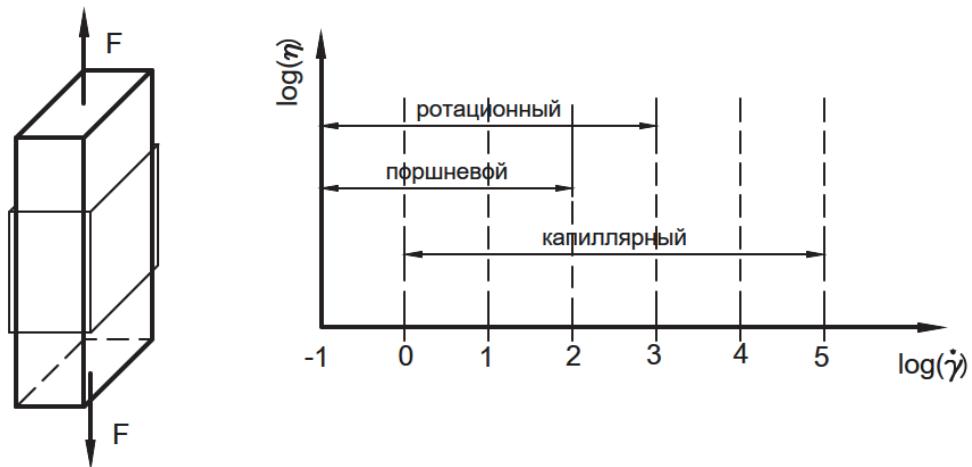


Рисунок 3 – Определение вязкости на удлинение
и области применения различных методов

Для реометров, работающих на капиллярном эффекте вязкость определяется по формуле 2.

$$\eta_e = \frac{\sigma_e}{\dot{\varepsilon}}, \sigma_e = \frac{F}{A}, \dot{\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{L_0}^{L_1} \frac{dl}{l} = \frac{1}{L_0} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\nu}{L} \quad (2)$$

Для получения оптимизационных характеристик, ДПК были изготовлены в зависимости от массовой доли, поскольку частицы древесины деформируются

и изменяют свои свойства в процессе нагрева материала и выдавливания через фигурные пазы.

Постоянная реометрия позволила контролировать вязкость расплава на всех этапах изготовления композита и определить предельное содержание хвойного связующего, выше которого в составе композита появляются дефекты вследствие излишней деформации и изменения свойств компонентов.

Оптимизация состава композита для каждого размера хвойных опилок заключалась в определении вязкости расплавленной смеси в зависимости от количества наполнителя и типа полимера. К каждому типу расплавленного полимера вместе со связующим агентом в смесительной камере, имеющей температуру 160 °С постепенно добавляли некоторое определенное количество хвойной смеси, до тех пор, пока вязкость не становилась слишком большой. На каждом этапе из расплавленного композита изготавливались образцы для их последующих испытаний на соответствующем оборудовании.

Для испытаний на растяжение использовались разрывные машины, в захваты которой зажимали образцы стандартного размера, изготовленные методом компрессионного формования. Для измерения угла смачивания использовалась дистиллированная вода в качестве тестовой жидкости. Набухание образцов определяли с помощью погружения образца в воду на 24 ч., после чего образцы взвешивали, удалив предварительно излишки воды с их поверхности.

Результаты и их оценка

После того как хвойные опилки были просеяны и взвешены, был определен их гранулометрический состав (рисунок 4). Как следует из рисунка, около половины опилок соответствовали категории $F < 0.5$. Остальные распределились примерно в следующем соотношении М – 35%, С – 10%, Х – 5%. Самая крупная фракция из эксперимента была исключена в следствии слишком значительной неоднородности.

Результаты исследования древесины хвойных пород на действие повышенной температуры показывают, что пока температура не превышает 100 °С в расплаве происходит эндотермический процесс, при котором древесина теряет около 10%, что в основном связано с испарением воды. В диапазоне от 100 до 300 °С изменение веса композита практически не происходит. При повышении температуры выше 300 °С начинается значительная потеря массы образцом, при котором он может потерять до 60% массы, что связано с разложением компонентов древесины и соответствует 10% содержанию воды в древесине, 20% лигнина и 60% целлюлозы и гемицеллюлозы.

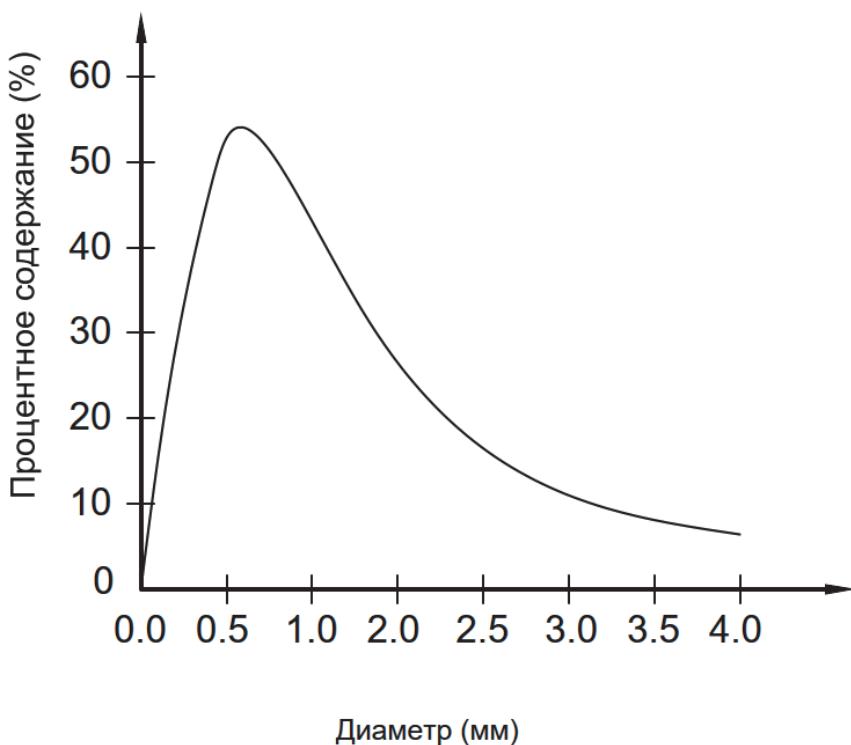


Рисунок 4 – Процентное распределение размеров частиц

Внешний вид просеянных (фракция F) древесных частиц приведен на рисунке 5, которые имеют традиционную структуру с полыми просветами. Изображение получено с помощью микроскопа.

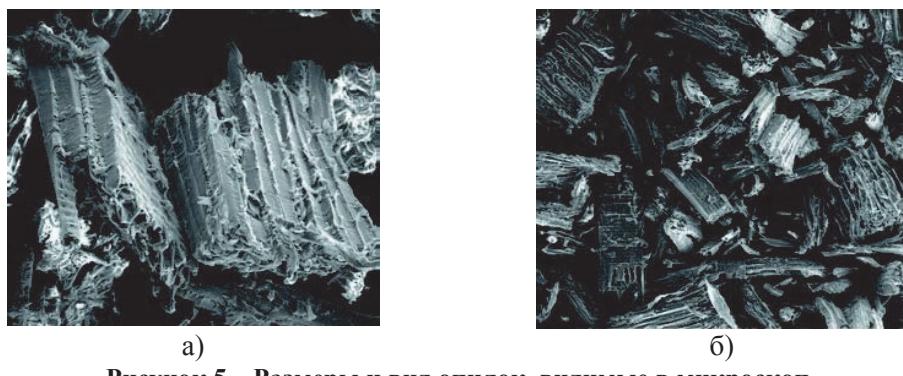


Рисунок 5 – Размеры и вид опилок, видимые в микроскоп

Оптимизация осуществлялась на ротационном реометре. Сначала в камеру при температуре около 150 °С был добавлен полимер HDPE (НМА-035) в количестве 10 г, затем постепенно добавляли хвойные опилки, при каждом новом добавлении крутящий момент увеличивался, и температура падала, но затем ста-

билизировалась. Вид эксперимента на рисунке 6.

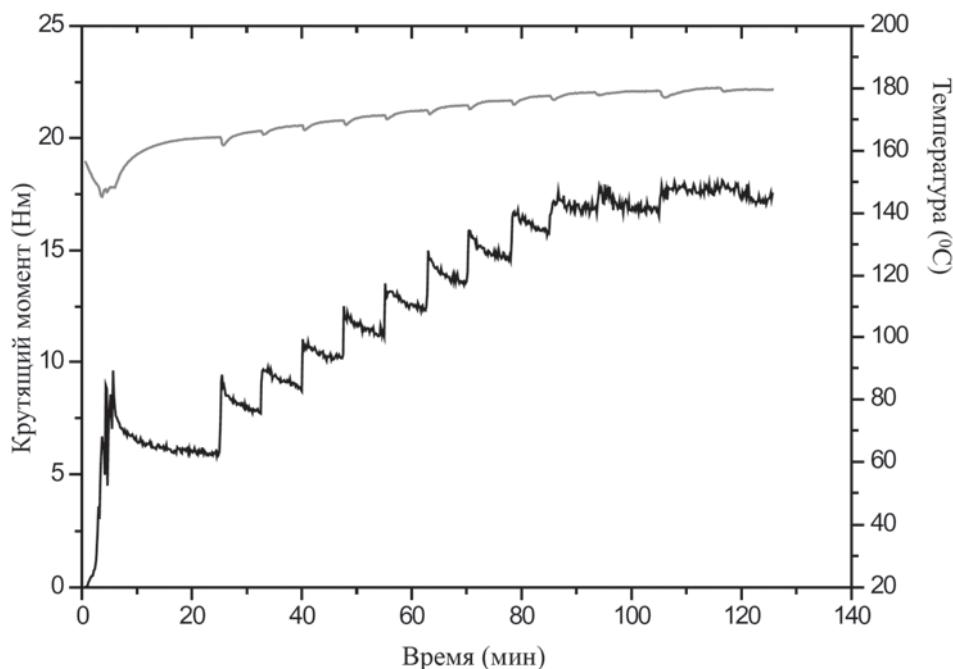


Рисунок 6 – Реологические испытания полиэтилена высокой плотности НМА-035

Полиэтилены высокой плотности выбирались на основе их химических и физических свойств. Оба полимера очень стабильны до температуры 450 °C, а их деградация происходит примерно около 500 °C. Чем выше температура перехода, тем более жесткие условия окружающей среды может выдержать конечный материал, предназначенный, в частности, для работы на фасадных частях конструкции. С другой стороны, более высокая текучесть дает возможность на более легкую финишную обработку готового ДПК.

Видимые на этом графике ступеньки показывают, что при каждом добавлении хвойных опилок происходило увеличение крутящего момента, которое соответствовало увеличению вязкости расплава, которая затем уменьшалась до равновесного состояния. Максимально возможному состоянию correspondовало содержание примерно в равном количестве опилок и ПЭВП. Последним добавленным компонентом был PE-g-MA E-226, что привело к стабилизации вязкости, то есть к усилению связи между ПЭВП и связующим. Аналогичные эксперименты были проведены для остальных типов ПЭВП, хвойных опилок различных размеров и PE-g-МА. Результаты экспериментов в зависимости от процентного содержания опилок показаны на рисунке 7.

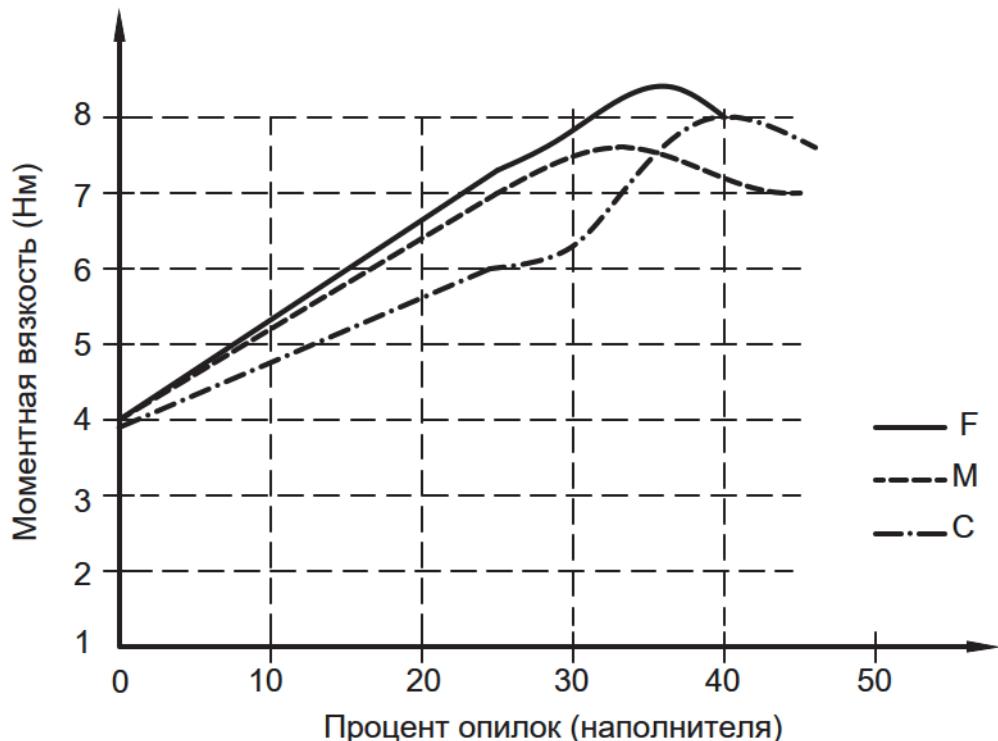


Рисунок 7 – Ротационная реометрия, использованная для оптимизации ДПК в зависимости от размеров хвойных опилок

Анализ результатов показывает, что наиболее оптимальными являются более мелкие частицы, которые позволяют получать композиты с более высоким содержанием наполнителя и, одновременно, с более низкой вязкостью. Для других термопластов были получены схожие результаты, однако существующие отличия позволили выявить наиболее оптимальные смеси. В качестве примера на рисунке 8 показано получение композита с 55% содержанием ПЭВП (что вызывает всплеск на графике) с последующим добавлением катализатора 10% (всплеск) и 35% содержанием хвойных опилок. Увеличение вязкости согласуется с увеличением процентного содержания наполнителя. Каждая ступень увеличения вязкости соответствует стадии добавления связующего и более высокой стабильности смеси.

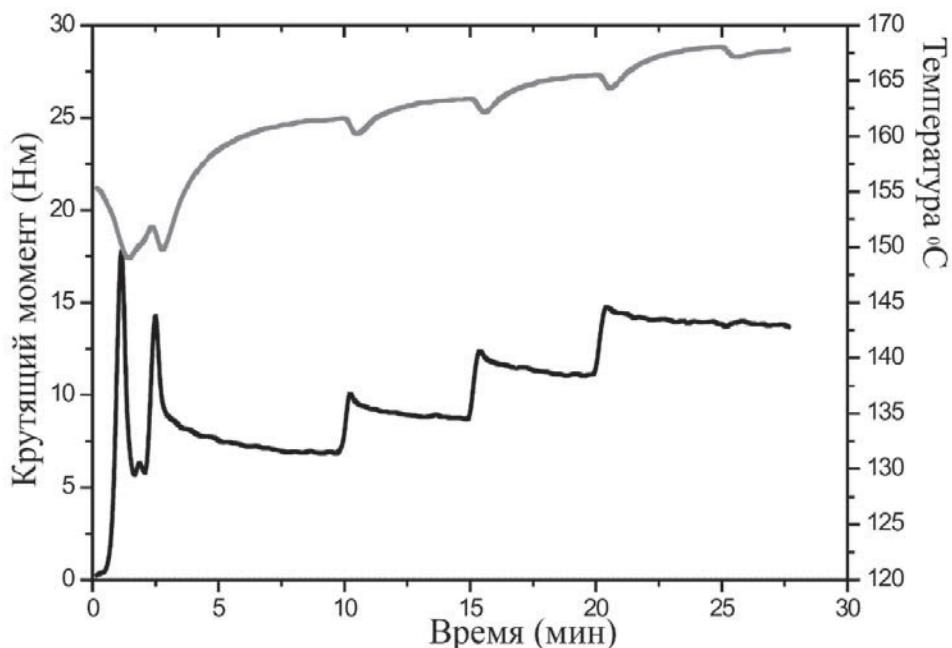


Рисунок 8 – Ротационная реометрия, использованная для ДПК с 55% ПЭВП, 35% опилок и 10% катализатора

Для оценки механических характеристик различных композитов, имеющих разные составы были проведены испытания на растяжение. Композиты имели разное процентное содержание термопласта, хвойных опилок и связующего, и, соответственно показали разные результаты в механических испытаниях. В таблице 2 приведены исходные данные по каждому композиту, а также сведены вместе результаты испытаний. На остальных рисунках показаны графические представления результатов экспериментов.

Таблица 2 – Основные характеристики материалов

Образец	ПЭВП НМА-035 (%)	Опилки (%)	PE-g-МА E-226 (%)	Максимальное напряжение (Мпа)	Максимальная деформация (%)
A	100	0	0	29	3
B	60	40	0	23,9	0,58
C	55	40	5	21,4	0,75
D	50	40	10	23,6	0,78
E	45	40	15	23,1	0,95
F	65	35	0	23,8	1,24
G	55	35	10	21,8	1,12
H	70	30	0	20,4	1,29
I	60	30	10	19,9	1,05
J	50	30	20	22,1	0,89

На рисунке 9 приведено сравнение композитов, имеющих процентное содержание опилок 40, 35 и 30 процентов и не имеющих связующего вещества.

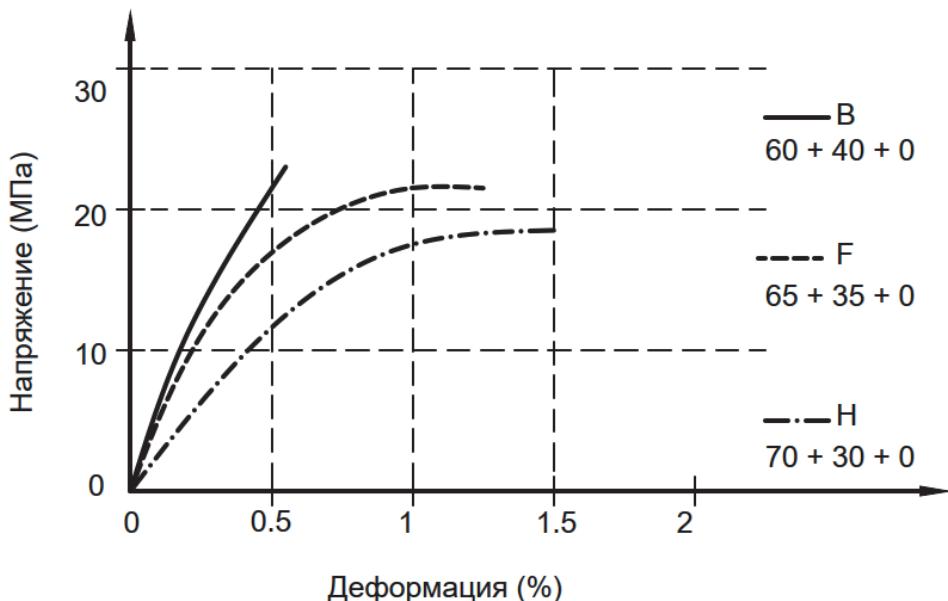


Рисунок 9 – Влияние процента содержания опилок и катализатора на свойства ДПК

Из данного рисунка следует, что с увеличением содержания в ДПК хвойного композита его жесткость возрастает, более высокие значения наполнителя дают более высокие значения прочности и жесткости ДПК. Кривая В для данного композита имеет практически линейный вид, а разрушение происходит при низкой величине деформации. А кривая Н имеет значительную нелинейность, разрушение образца происходит раньше и при большей величине деформации.

Продолжая исследования влияния количества опилок на свойства ДПК, добавим к расплаву PE-g-MA в количестве 10%. Данные приведены на рисунке 10.

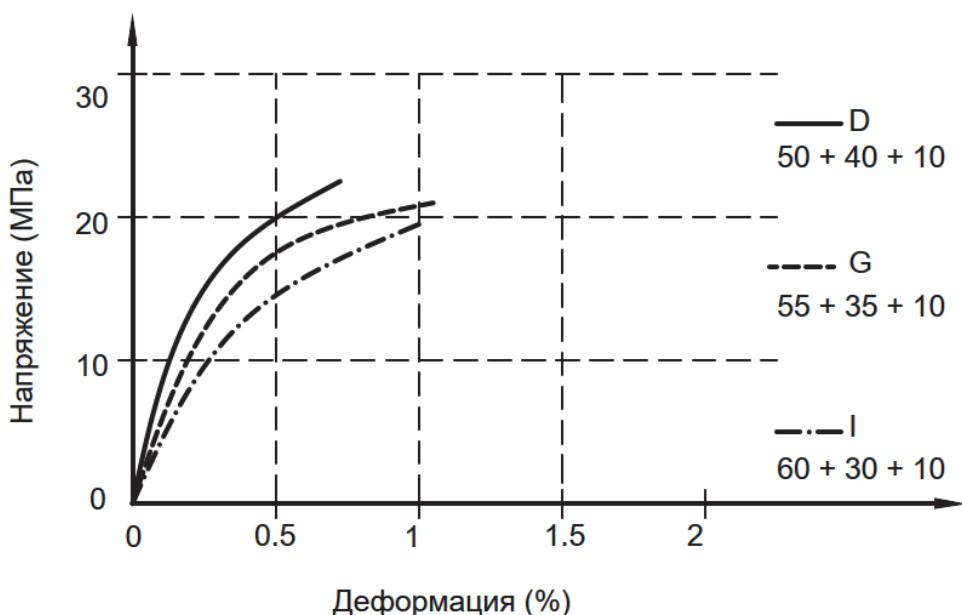


Рисунок 10 – Влияние процентного содержания наполнителя ДПК с учетом введения катализатора

Характер графиков примерно соответствует тому, что было на предыдущем рисунке (9), но только у всех образцов ДПК уменьшилась величина деформации (увеличилась жесткость). Это, скорее всего, происходит благодаря способности катализатора увеличивать между фазную адгезию ДПК, что приводит к более раннему разрушению композита (уменьшается ударная прочность). С другой стороны, можно заметить, что при максимально допустимом содержании опилок (примерно 40%) увеличение деформации ДПК происходит без снижения прочности при добавлении PE-g-MA (10%).

Рассматривая отдельно влияние содержания катализатора на механические свойства ДПК рассмотрим кривые приведенные на рисунке 11. На нем показана зависимость деформации от напряжения для ДПК с содержанием хвойных опилок около 40% и с различным процентом PE-g-MA (в данном случае использовался E226). По мере увеличения роста содержания катализатора (выступающего в роли связующего вещества) удается достичь более высоких значений общей деформации без значительного уменьшения значений напряжения растяжения. Что приводит к увеличению прочности ДПК.

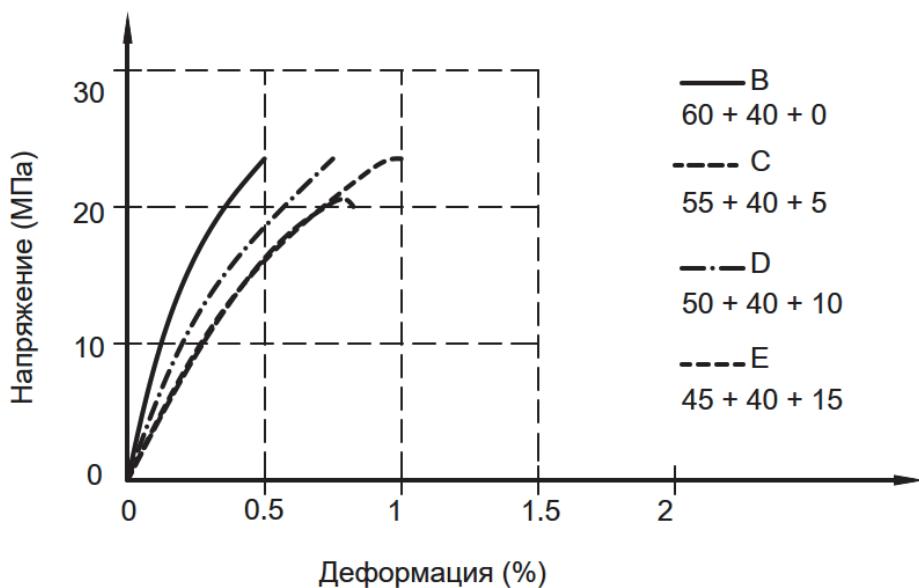


Рисунок 11 – Влияние процентного содержания связующего Е226 на прочность ДПК

Теперь сравним ДПК с одинаковым массовым содержанием хвойных опилок (около 30%), но с различным содержанием катализатора (полиэтилен с привитым малеиновым ангидридом) Е226, а также один график (К) покажет зависимость с другим катализатором Е265. Эти характеристики приведены на рисунке 12.

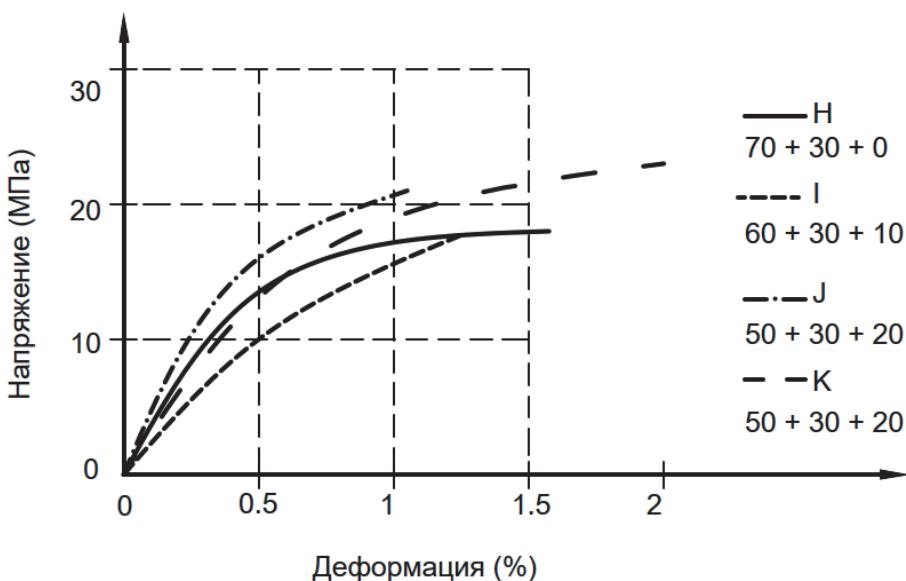


Рисунок 12 – Влияние процентного содержания различного связующего (Е226 или Е265) на прочность ДПК

По мере увеличения содержания катализатора величина деформации снова снижается, по всей видимости, снова из-за увеличения межфазной адгезии, однако добавление другого компонента (E265) изменяет поведение ДПК и получается образец с самым высоким значением напряжения и деформации, что соответствует композиту с наибольшей вязкостью, и с лучшими характеристиками напряжения деформация.

Эксперименты на определение гидрофобных свойств композита приведены в таблице 3. Угол смачивания отвечает за поверхностные свойства ДПК, набухание за удержание воды в массе композита. По мере увеличения содержания древесных опилок в составе композита ухудшаются его свойства смачивания поверхности и влагосодержания. Однако введение в состав ДПК катализатора, значительно улучшает как гидрофобность поверхности, так и отсутствие влагопоглощения. Образцы G,J,K с большим содержанием PE-g-MA даже превосходят свойства чистого ПЭВП, что видимо происходит из-за увеличения связывания между хвойными опилками и полимерной матрицей (увеличение междуфазной адгезии). Таким образом PE-g-MA влияет как на улучшение прочности, так и на увеличение гидрофобности ДПК.

Таблица 3 – Углы смачивания и набухание композитов

Образец	Угол смачивания (°)	Набухание (%)	Образец	Угол смачивания (°)	Набухание (%)
A	94	0,2	G	108	2,9
B	78	10,1	H	78	9,1
C	79	7,2	I	88	7,3
D	85	5,6	J	99	4,1
E	83	6,1	K	120	3,1
F	85	8,9			

Заключение

В работе представлены материалы по исследованию оптимизации получения композитных материалов, изготовленных из ПЭВП, хвойных опилок и полиэтилена с привитым малеиновым ангидридом (ДПК). Для оптимизации были использованы инструментальные методы определения конечных характеристик полученного композита таких как физико-механические характеристики, микроструктура, смачиваемость, разбухание и, основное, вязкость композита, которая непосредственно влияет и на качество ДПК и на процесс его изготовления (экструзия или прессование).

Установлено, что лучшими характеристиками для фасадного применения в строительстве является ДПК с содержанием НМА035 примерно 55%, и 10 процентов E226, остальное (примерно 35%) приходится на опилки хвойных пород. Такой композит может быть получен методом экструзии, имеет достаточно высокую прочность (24 МПА), которая обусловлена высоким содержанием ПЭВП, а также высокой междуфазной адгезией, являющейся результатом применения связующего (E226). Высокая связь между фазами композита обеспечивает поми-

мо прочности и высокую стойкость к воздействию влаги.

Литература

1. ГОСТ – Р 56684 2015. Композиты полимерные. Метод определения стойкости к разрушению «сэндвич»-конструкций. М., Стандартинформ. 2016. 19 с.
2. Адамс Д.Ф. Упругопластическое поведение композитов. Композиционные материалы. М.: Мир, 1978. 250 с.
3. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии. М.: Изд-во Интеллект, 2009. 352 с.
4. Батаев А.А., Батаев В.А Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: НГТУ, 2002. 381 с.
5. Бубенков И.А. Углерод-углеродные композиционные материалы на основе волокнистых наполнителей. Учебное пособие. Москва: МИСИС, 2010. 156 с.
6. Кербер М.Л, Берлин А.А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. М.: ЦОП Профессия, 2014. 592 с.
7. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 736 с.
8. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Техника и технология. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
9. Мюллер А. Окрашивание полимерных материалов СПб.: Профессия, 2006. 280 с.
10. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2009. 658 с.
11. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
12. Раувендааль К. Экструзия полимеров СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. 768 стр.
13. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы М.: Мир, 1973. 302 с.
14. Сергиенко И.В. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации. Киев: Наукова Думка, 1980. 275 с.
15. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 590 с.
16. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов. М.: Профессия, 2010. 224 с.
17. Ширяев В.И. Исследование операций и численные методы оптимизации М.: Ленанд, 2017. 224 с.

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

Site: www.unitech-mo.ru

Подписано в печать 24.06.2024
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 11,2

Тираж 500 экз.

Заказ № 97-02

Отпечатано
в типографии

ООО «Научный консультант»
г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

Тел.: +7 (926) 609-32-93,
+7 (499) 195-60-77

E-mail: keyneslab@gmail.com
Site: www.n-ko.ru