

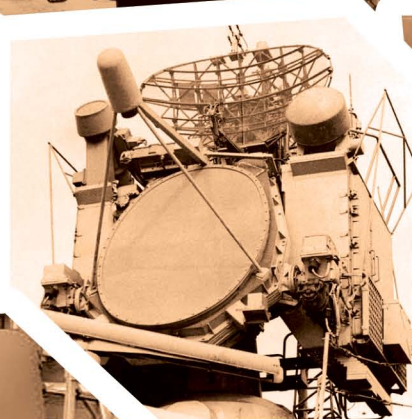
ВЕСТНИК

Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

№ 2



2023





АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»

№ 2

Июнь 2023 г.

Научно-технический журнал

Издаётся с июня 2009 года

Выходит четыре раза в год

Главный редактор

Козлов Г. В., д-р физ.-мат. наук, проф.

Редакционная коллегия

Авачёв А. П., канд. физ.-мат. наук

Агапов О. А., канд. техн. наук

Агеев П. А., канд. техн. наук

Акимов В. Н., д-р техн. наук

Акопян И. Г., д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, проф.

Албёшин Н. П., академик РАН, д-р техн. наук, проф.

Бабаев Ю. В., канд. техн. наук

Балиж К. С., канд. техн. наук

Бецофен С. Я., д-р техн. наук, проф.

Благовский О. В., канд. техн. наук

Бляхман А. Б., д-р техн. наук, проф.

Богатов А. Д., канд. техн. наук

Болошин С. Б., д-р техн. наук, проф.

Большаков Д. Ю. (зам. гл. ред.), канд. техн. наук

Борзунов А. В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Боронахин А. М., д-р техн. наук, проф.

Буров А. С., канд. техн. наук

Васильев И. В., канд. физ.-мат. наук (Республика Казахстан)

Веденеев А. В., канд. техн. наук

Вильмицкий Д. С., канд. техн. наук

Виноградов В. Н., д-р техн. наук

Витязев В. В., д-р техн. наук, проф.

Власов А. В., канд. техн. наук

Вологдин С. В., д-р техн. наук, проф.

Востров Д. О., канд. физ.-мат. наук

Высоцкая С. А., канд. техн. наук

Гаврилов Р. С., канд. техн. наук

Гамаюнова Т. В., канд. хим. наук

Гвоздарёв Р. С., канд. техн. наук

Геворкян А. Г., д-р техн. наук, проф.

Голиков В. Ф., д-р техн. наук, проф. (Республика Беларусь)

Голынский И. Ю., канд. техн. наук

Горохов М. М., д-р физ.-мат. наук, проф.

Гринчар Н. Г., д-р техн. наук, проф.

Громов Д. С., канд. техн. наук

Гульшин В. А., канд. техн. наук, доц.

Доронин В. В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.

Дорошевич В. К., д-р техн. наук

Дружин А. В., канд. физ.-мат. наук

Друзин С. В., канд. техн. наук

Дусь Т. Э., канд. пед. наук, доцент

Ерошин С. Е., канд. техн. наук

Желлов М. А., канд. техн. наук

Жуков И. А., д-р техн. наук

Зайченко И. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Зенин В. А., канд. техн. наук

Зиновьева Е. С., канд. физ.-мат. наук

Зотов А. В., канд. техн. наук

Иванов А. М., канд. техн. наук

Иванов С. Н., канд. техн. наук

Ивашов С. И., канд. техн. наук

Исаенкова М. Г., д-р физ.-мат. наук, проф.

Исаков М. А., канд. физ.-мат. наук, акад. РАН

Караваяев Я. С., канд. техн. наук

Кауфман Г. В., д-р техн. наук

Койтов С. А., д-р техн. наук

Колесников Н. П., д-р техн. наук, проф.

Колчин С. А., канд. техн. наук

Комягин Р. В., канд. техн. наук, доц.

Кондрашов В. В., канд. техн. наук

Костров Б. В., д-р техн. наук, проф.

Костров В. В., д-р техн. наук, проф.

Кошелев В. И., д-р техн. наук, проф.

Кузнецов В. С., канд. техн. наук

Кузнецов П. С., канд. техн. наук

Кулаков А. В., д-р физ.-мат. наук, чл.-корр. РАН

Лагерев А. В., д-р техн. наук, проф.

Лагерев И. А., д-р техн. наук, доц.

Ластовецкий А. Е., канд. техн. наук

Левихин А. А., канд. техн. наук

Лейман Д. В., канд. хим. наук

Леманский Д. А., канд. техн. наук, доц.

Лемешко Н. В., д-р техн. наук

Лысак В. И., академик РАН, д-р техн. наук

Мазур Н. З., д-р экон. наук, доц.

Манукьян А. А., д-р техн. наук

Матюгин С. Н., канд. физ.-мат. наук

Миронов М. В., канд. техн. наук

Мирталибов Т. А., д-р техн. наук, проф.

Михеев К. В., канд. техн. наук

Муравьев В. В., д-р техн. наук, проф.

Мурзова М. А., канд. техн. наук

Нагорных И. Л., канд. физ.-мат. наук

Наумов С. В., канд. техн. наук

Нистюк А. И., д-р техн. наук, проф.

Носатенко П. Я., д-р техн. наук

Овечкин Г. В., д-р техн. наук, проф.

Окулов Р. А., канд. техн. наук

Павлов Н. И., д-р техн. наук

Палицын А. Б., д-р техн. наук

Панфилов С. В., канд. физ.-мат. наук

Парамонова А. А., канд. техн. наук

Паршин С. Г., д-р техн. наук, доц.

Паршин Ю. Н., д-р техн. наук, проф.

Пашков И. Н., д-р техн. наук, проф.

Пирязев М. С., канд. экон. наук

Плужников А. Д., д-р техн. наук, проф.

Подгоров А. А., канд. техн. наук

Пономарев О. П., д-р техн. наук, доц.

Разин А. А., канд. техн. наук

Ракитин А. В., канд. техн. наук

Ратинский М. В., д-р техн. наук

Ростокин И. И., д-р техн. наук

Ростов А. Г., д-р техн. наук, доц.

Самохина Е. А., канд. техн. наук

Сафин Н. Р., канд. техн. наук

Сачков В. И., д-р хим. наук

Северина А. Г., канд. техн. наук, доц.

Сигов А. С., д-р физ.-мат. наук, проф., акад. РАН

Синельников А. О., канд. техн. наук

Смирнов А. С., д-р техн. наук

Смирнов В. Л., канд. техн. наук

Смирнов Е. П., канд. техн. наук

Созинов П. А., д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН

Страхов А. Ф., д-р техн. наук, проф.

Судakov М. К., канд. техн. наук, доц.

Сычёв М. М., д-р техн. наук, проф.

Сычушкин И. В., канд. техн. наук

Таричко В. И., канд. техн. наук

Теляков Р. Ф., канд. техн. наук

Терентьев М. А., канд. физ.-мат. наук

Тиготов Д. Г., канд. техн. наук

Тимашева Т. Г., канд. техн. наук

Устинов А. Н., канд. техн. наук

Фарбер В. Е., д-р техн. наук, проф.

Федосеева Е. В., д-р техн. наук, доц.

Фоктистов А. Ю., канд. техн. наук

Фёдоров Д. А., канд. техн. наук

Филимонов В. И., д-р техн. наук, проф.

Филиппов М. Ю., канд. физ.-мат. наук

Фридман Л. Б., д-р техн. наук

Фролов А. Ю., д-р техн. наук

Фролова М. Н., д-р техн. наук

Хвореньков В. В., д-р техн. наук, проф.

Худякова Ю. А., канд. техн. наук

Цапов А. В., канд. техн. наук

Царёв И. Е., канд. техн. наук

Цыганков Д. Э., канд. техн. наук

Чаплыгин Ю. А., д-р техн. наук, проф., акад. РАН

Чернов И. И., д-р физ.-мат. наук, проф.

Чернодаров А. В., д-р техн. наук, доц.

Шевцов А. А., канд. техн. наук

Шенябин А. Н., канд. воен. наук

Шиляев С. А., д-р техн. наук, доц.

Шимкин П. Е., канд. техн. наук

Шишаков К. В., д-р техн. наук, проф.

Шеглов Д. К., канд. техн. наук

Шеняцкий А. В., д-р техн. наук, проф.

Юрасов А. Н., д-р физ.-мат. наук, доц.

Якименко И. В., д-р техн. наук, доц.

Янцевич М. В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

СОДЕРЖАНИЕ



Обращение к читателям заместителя

генерального директора по заказам и поставкам

В. В. Нескородова

3

Еще раз о раундах рецензирования

Большаков Д. Ю.

4

Электроника. Радиотехника



Разработка и исследование алгоритма устранения

неоднозначности измерений для нескольких целей

в луче в режиме квазинепрерывного излучения

Зайцев А. В., Разин А. А.

5

Применение частотно-фазоманипулированных сигналов

в целях повышения скрытности излучения РЛС

Пискунов А. В., Литвинов Н. Н., Энверов А. И.

11

Космические исследования и ракетостроение



Метод измерения угла крена боеприпаса с использованием

поляризации излучения информационного поля лазерно-

лучевой системы телеориентации

Ильичев М. М., Комраков Д. В., Лысенко С. Л.,

Мещеряков М. А., Семенов А. В.

19

Использование внутрисопловых интерцепторов для

управления вектором тяги

Тищенко К. О., Брыков Н. А.

29

Выбор конструктивной схемы газотурбинной установки на

начальном этапе проектирования

Кузнецов В. И., Шпаковский Д. Д.

36

Оценка эрозийной стойкости комплексного

теплозащитного покрытия летательного аппарата

Гилева А. И., Лейман Д. В., Койтов С. А.

44



Свечение ударно сжатого слоя при обтекании тела потоком плазмы струйного диафрагменного разряда

**Калашников Е. В., Павлов Н. И., Бородин В. Г.,
Коленчиков К. К., Комаров В. М., Малинов В. А.,
Мигель В. М., Попиков В. С., Чарухчев А. В.**

53

Машиностроение



Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6

Ефремов А. Н.

66

Математика



Сравнение быстродействия методов решения задачи о назначениях при селекции в траекторной обработке

Соболев А. А.

81

Информатика



Кластеризация отчетов об исправлениях в программном обеспечении сетевого оборудования

Нарышкин К. В.

90

Решением Министерства образования и науки Российской Федерации научно-технический журнал «Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» вошел в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по специальностям научных работников:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки),
2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии их технологии (технические науки),
2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки),
2.2.16. Радиолокация и радионавигация (технические науки),
2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки),
2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов (технические науки),
2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки),
2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки).

Редакция

121471, Москва, ул. Верейская, д. 41

Тел.: +7 (495) 276-26-13

Факс: +7 (495) 276-29-81

E-mail: PRESS@almaz-antey.ru

Сайт: http://www.almaz-antey.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-65830 от 27.05.2016 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

ISSN 2542-0542

<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2>

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 79162

Учредитель

АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»

121471, Москва, ул. Верейская, д. 41

Издатель

ООО «НЭИКОН ИСП»

115114, Москва, ул. Летниковская, д. 4, стр. 5

Подписано в печать 14.06.2023

Формат 60×90/8. Печ. л. 12,5

Тираж 400 экз. Заказ № 2-2023-elp-s-47-21

Свободная цена

Типография

ООО «Медиаколор»

127273, Москва, Сигнальный проезд, д. 19, БЦ «Взлдан»

© АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», 2023

Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”

Scientific and technical journal
The journal has been published since 2009
4 issues per year

Editorial office

121471, Russian Federation, Moscow, Vereyskaya str., 41

Tel.: +7 (495) 276-26-13

Fax: +7 (495) 276-29-81

E-mail: PRESS@almaz-antey.ru

Website: http://www.almaz-antey.ru

Registered at the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor) under the number ПИ № ФС77-65830, 27.05.2016

ISSN 2542-0542

<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2>

Subscription index in the catalogue “Rospechat” – 79162

Founder

“Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, JSC

121471, Russian Federation, Moscow, Vereyskaya str., 41

Publisher

“NEICON ISP” LLC

115114, Russian Federation, Moscow, Letnikovskaya str., 4, building 5

Passed for printing 14.06.2023

Circulation 400 copies

Free price

Printing office

“Mediacolor” LLC

127273, Russian Federation, Moscow, Signalnyi proezd, 19,
Business Center “Veldan”

© “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation,
Joint Stock Company, 2023



Уважаемые читатели!

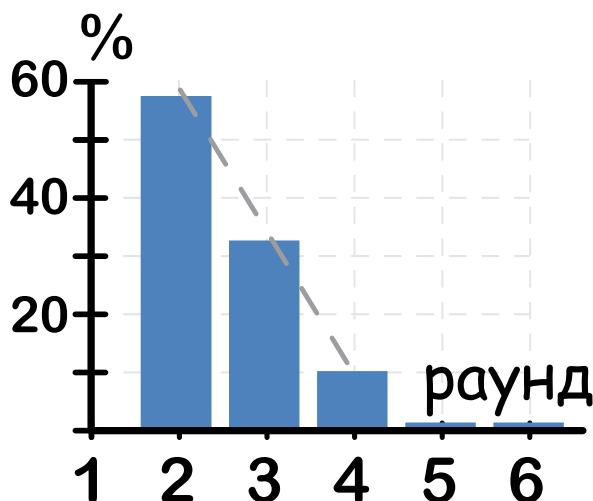
Продукция предприятий Концерна более полувека надежно защищает рубежи Родины. В наше непростое время мы успешно выполняем государственный оборонный заказ и занимаемся разработкой новой техники.

В основе нашей высокотехнологичной продукции лежат глубокие научные исследования многотысячного коллектива. При этом Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей» является авторитетной площадкой для общения ученых и специалистов.

Приглашаю заинтересованных авторов к тесному сотрудничеству с редакцией журнала.

**Заместитель
генерального директора
по заказам и поставкам**

В. В. Нескородов



Д. Ю. Большаков

Еще раз о раундах рецензирования

Статистика по раундам рассмотрения публикуемых статей за последние три года показывает, что по двум из пяти статей решение принимается в трех и более раундах рецензирования (см. рисунок).

За последние три года среднее количество раундов выросло. Это связано с высокими требованиями рецензентов к статьям и, как следствие, с увеличением

сроков доработки авторами на нескольких раундах.

Для сокращения количества раундов редакция рекомендует авторам подробно освещать вопросы научной новизны, так как прямое указание отличий статьи от описанных в литературе научных достижений помогает рецензентам принять положительное решение на более раннем раунде.

Большаков Денис Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей».



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-5-10>

УДК 621.396.96

Разработка и исследование алгоритма устранения неоднозначности измерений для нескольких целей в луче в режиме квазинепрерывного излучения

А. В. Зайцев, А. А. Разин

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», Жуковский, Российская Федерация

Предложен способ устранения неоднозначности дальности и частоты Доплера для нескольких целей в луче для средней частоты повторения зондирующих импульсов. Методом математического моделирования в среде MatLab получена оценка вероятности правильного решения неоднозначности по дальности и частоте Доплера.

Ключевые слова: квазинепрерывный сигнал, устранение неоднозначности, MatLab

Для цитирования: Зайцев А. В., Разин А. А. Разработка и исследование алгоритма устранения неоднозначности измерений для нескольких целей в луче в режиме квазинепрерывного излучения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 5–10. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-5-10>

For citation: Zaytsev A. V., Razin A. A. The development and analysis of a measurement ambiguity resolution algorithm for multiple targets in the antenna beam in the quasi-continuous radiation mode // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 5–10. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-5-10>

Поступила 24.11.2022 Отрецензирована 08.12.2022 Одобрена 26.04.2023 Опубликовано 14.06.2023

Радиолокационные станции (РЛС) в режиме квазинепрерывного излучения со средней частотой повторения зондирующих импульсов характеризуются одновременной неоднозначностью как по дальности, так и по частоте Доплера во всем диапазоне измерения этих параметров [1]. Для устранения неоднозначности известны различные методы решения [1–13]. Одним из способов устранения неоднозначности является перебор частот повторения. Однако актуальна задача устранения неоднозначности измерений при попадании в луч антенны сразу нескольких целей. Целью работы является разработка алгоритма устранения неоднозначности для нескольких целей в луче антенны и оценка вероятности правильного измерения дальности и частоты Доплера путем численного моделирования в среде MatLab.

Структурная схема математической модели для исследования алгоритма показана на рисунке 1.

В качестве входного воздействия имитировались траектории движения точечных целей. Формирование значений координат при работе модели осуществлялось в интервале времени от $t = 0$ до $T_{\text{кон}}$ с шагом Δt . Координаты целей определялись следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} X_{\text{ц}}(i) &= X_{\text{ц}}(i-1) + V_{X_{\text{ц}}} \cdot \Delta t, \\ Y_{\text{ц}}(i) &= Y_{\text{ц}}(i-1) + V_{Y_{\text{ц}}} \cdot \Delta t, \\ Z_{\text{ц}}(i) &= Z_{\text{ц}}(i-1) + V_{Z_{\text{ц}}} \cdot \Delta t. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом частота Доплера определялась через радиальную составляющую скорости цели в соответствии с (1).

Формирование неоднозначных значений частоты Доплера $F_{\text{Дн}}^n$ и времени задержки $\tau_{\text{задн}}^n$ на n -ом периоде (частоте) повторения $T_{\text{П}}^n$ ($F_{\text{П}}^n$) проводилось по формулам (2) и (3):

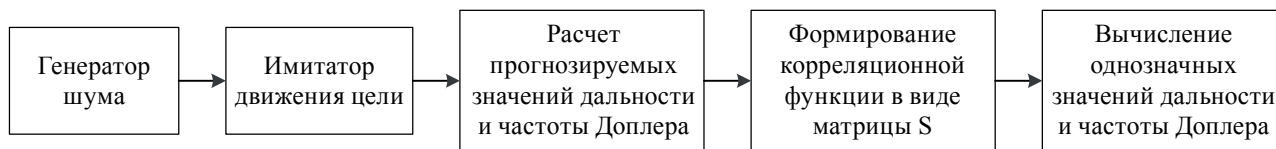


Рис. 1. Структурная схема математической модели

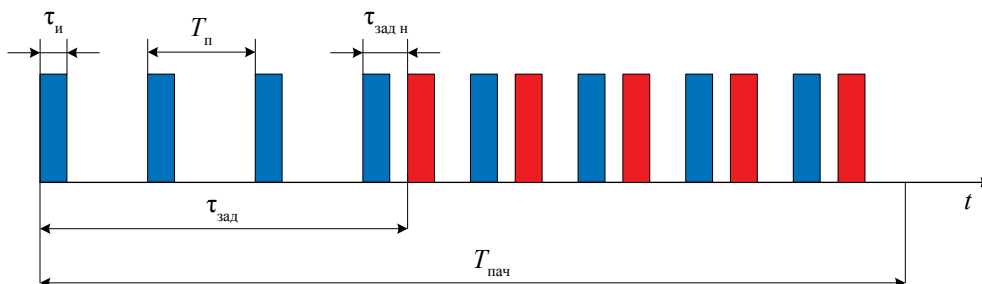


Рис. 2. Временная диаграмма образования неоднозначных отсчетов задержки

$$F_{Дн}^n = \left[\frac{F_{Д}}{F_{П}} \right]_{др.ч.} \cdot F_{П}^n [\text{кГц}], \quad (2)$$

$$\tau_{зад н}^n = \left[\frac{\tau_{зад}}{T_{П}} \right]_{др.ч.} \cdot T_{П}^n [\text{мкс}], \quad (3)$$

$$\tau_{зад в.о.}^m = \tau_{зад н обз} + m \cdot T_{П обз} [\text{мкс}], \quad (7)$$

где $m = 0 \dots M$,

где $\tau_{зад н обз}$ и $F_{Дн обз}$ – измеренные значения в обзоре.

где $F_{Д}$ и $\tau_{зад}$ – имитируемые значения частоты Доплера и задержки. Механизм образования неоднозначных отсчетов задержки показан на рисунке 2.

Предложенный алгоритм основан на методе перебора частот повторения. Алгоритм устранения неоднозначности заключается в излучении и обработке N принятых пачек сигналов, каждая из которых излучается на определенной частоте повторения. Определяется количество зон неоднозначных значений доплеровской частоты и дальности K и M :

$$K = \left[\frac{F_{Д max}}{F_{П обз}} \right]_{ц.ч.}, \quad (4)$$

$$M = \left[\frac{\tau_{зад max}}{T_{П обз}} \right]_{ц.ч.}, \quad (5)$$

где $F_{Д max}$ и $\tau_{зад max}$ – максимальные измеряемые частота Доплера и задержка, $T_{П обз}$ ($F_{П обз}$) – период повторения (частота повторения) в обзоре.

Для выбранной для «захвата» цели производится расчет возможных однозначных значений задержки и частоты Доплера:

$$F_{Д в.о.}^k = F_{Дн обз} + k \cdot F_{П обз} [\text{кГц}], \quad (6)$$

где $k = -K, -K+1, \dots, K$,

Производится расчет прогнозируемых значений на каждом периоде повторения для всех возможных однозначных значений по аналогии с (2) и (3). Каждое из полученных значений анализируется на попадание в «мертвую зону» приема, которая зависит от скважности передатчика.

В процессе решения формируется корреляционная функция в виде матрицы сумм размером $2 \cdot K \times M$. Значения матрицы являются количественной оценкой соответствия прогнозируемых значений задержки и частоты Доплера с полученными неоднозначными значениями на каждой частоте повторения.

Наполнение матрицы проводится последовательно для всех излучаемых частот повторения:

- по соответствию прогнозируемого значения и попаданию в «мертвую зону»;
- по соответствию прогнозируемого значения и всех неоднозначных значений для обнаруженных целей на каждой частоте повторения по заданному критерию разницы значений.

Последнее ограничено разрешающей способностью РЛС, что приводит к ложному наполнению корреляционной матрицы. В предложенном алгоритме дополнительно



производится наполнение матрицы за счет сравнения прогнозируемых значений и неоднозначных значений, полученных с учетом взвешивания амплитуд в соседних позиционных строках при обнаружении целей. Критерий сопоставления при наполнении матрицы при этом уменьшен.

По окончании перебора всех частот повторения производится выбор однозначных значений дальности и частоты Доплера: определяется номер зоны по дальности и скорости в соответствии с максимальным значением корреляционной матрицы.

Вероятностная оценка правильного определения дальности и частоты Доплера проводилась при следующих условиях:

- количество целей в луче 2–5;
- количество периодов повторения $N = 8-10$;
- длительность пачки 10 мс;
- периоды повторения $T_{\text{п}} = [20-100]$ мкс;
- дальность $D = [5-220]$ км;
- расстояние между целями $\Delta D = [0,5-5]$ км;
- скорость цели $\vec{V} = [300, 600, 1000, 1500]$ м/с;

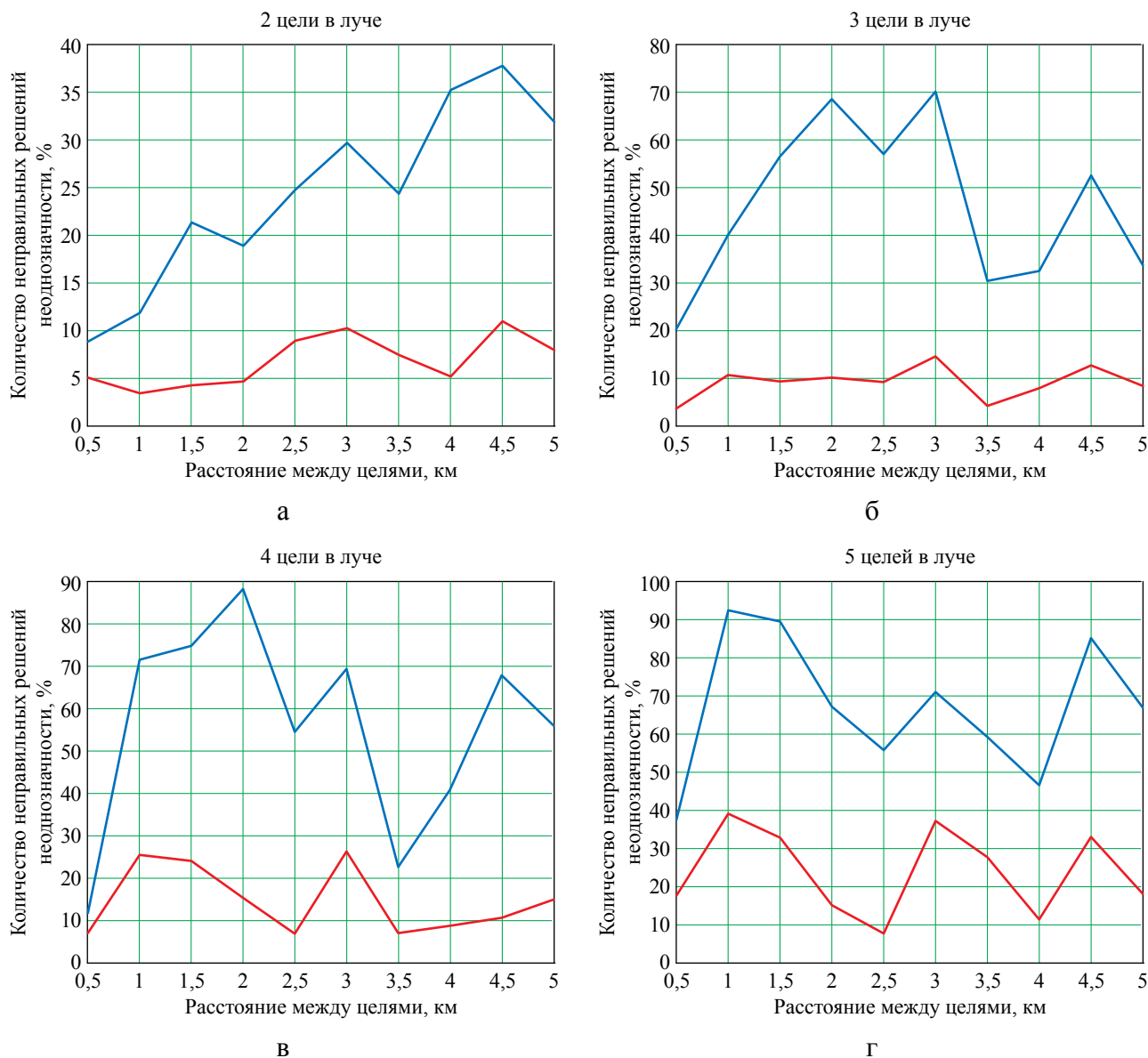


Рис. 3. Зависимости вероятности ошибочного решения неоднозначности по дальности и частоте Доплера от расстояния между целями для двух алгоритмов: а) при попадании в луч антенны 2 целей; б) при попадании в луч антенны 3 целей; в) при попадании в луч антенны 4 целей; г) при попадании в луч антенны 5 целей

— алгоритм с грубой оценкой прогнозируемых значений; — алгоритм с учетом взвешивания амплитуд

- с.к.о. измеренной неоднозначной дальности – 100 м;
- с.к.о. измеренной неоднозначной частоты Доплера – 100 Гц;
- количество численных экспериментов в каждой позиции – 1000.

Значения с.к.о., приведенные в (8), были заимствованы из экспериментальных результатов работы РЛС средней дальности при соотношении сигнал – шум 15–20 дБ.

Периоды повторения выбираются таким образом, чтобы слепые зоны по дальности или частоте Доплера, присущие одной пачке,

были свободными для другой. Совокупность N пачек должна обеспечивать просмотр всей зоны по дальности и частоте Доплера. При этом запас времени для обращения луча антенны в одну и ту же угловую позицию ограничен.

Наибольший интерес представляют результаты устранения неоднозначности измерений при попадании в луч антенны целей,двигающихся с примерно одинаковыми скоростями, так как это усложняет процесс решения неоднозначности. При моделировании имитировались траектории целей,двигающихся с одинаковой скоростью.

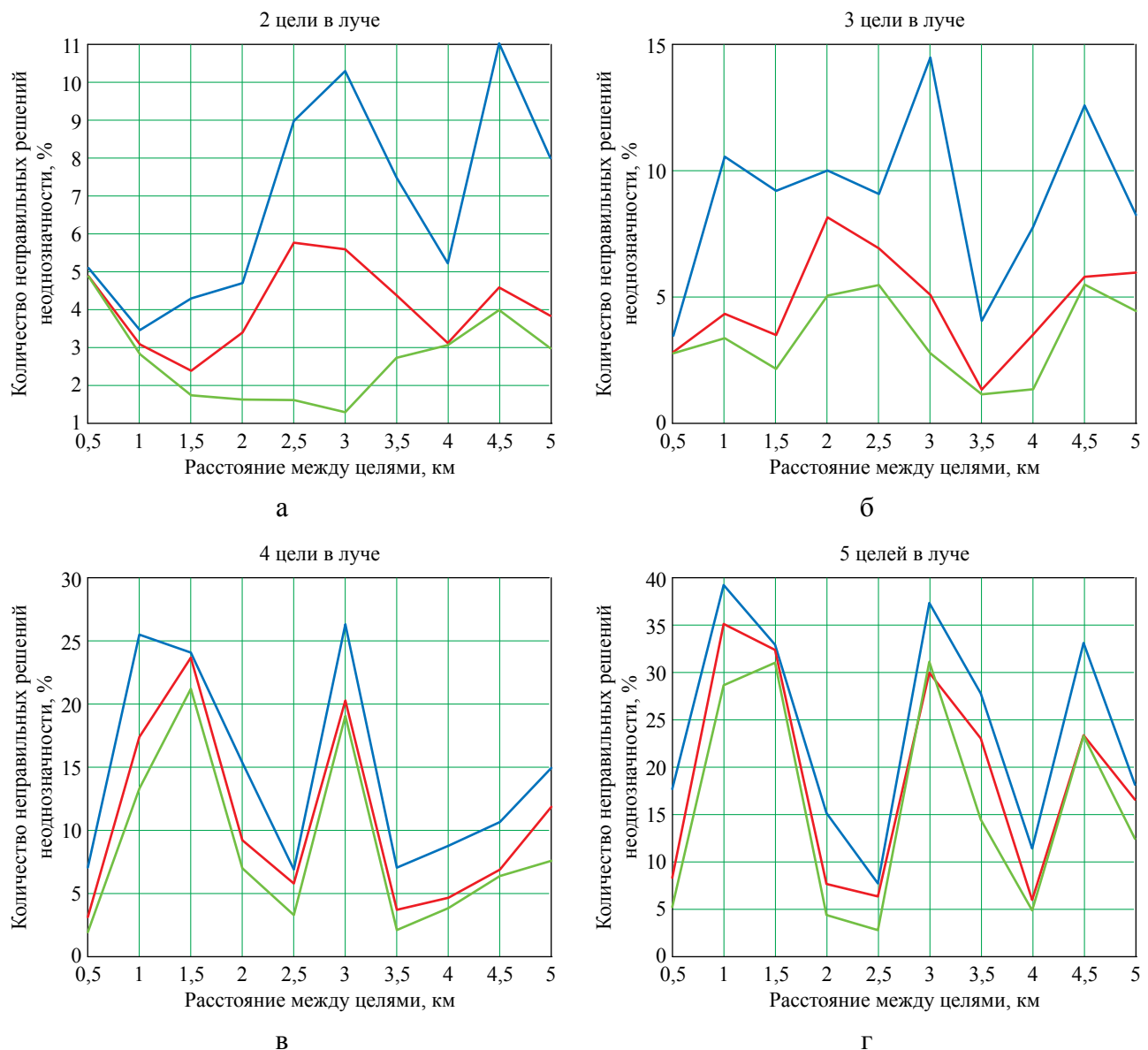


Рис. 4. Зависимости вероятности ошибочного решения неоднозначности по дальности и частоте Доплера от расстояния между целями для разного количества периодов повторения: а) при попадании в луч антенны 2 целей; б) при попадании в луч антенны 3 целей; в) при попадании в луч антенны 4 целей; г) при попадании в луч антенны 5 целей

— 8 Гц; — 9 Гц; — 10 Гц



Вероятность ошибочного решения неоднозначности определялась отношением неправильных измерений к общему числу измерений на протяжении всей траектории полета целей. Получены оценки вероятности ошибочного принятия решения алгоритмов с учетом взвешивания амплитуд в соседних позиционных строках при обнаружении целей и без:

- для разных значений расстояния между целями;
- для разного количества периодов повторения, используемых в алгоритме устранения неоднозначности.

В соответствии с результатами построены графики вероятности ошибочных значений измеренной дальности и частоты Доплера для двух алгоритмов при использовании 8 частот повторения (рисунок 3).

Также была проведена оценка вероятности ошибочного измерения дальности от количества частот повторения, используемых в алгоритме устранения неоднозначности с учетом взвешивания амплитуд. При моделировании были использованы наборы с 8, 9 и 10 частотами повторения. Графики вероятности ошибочных значений измеренной дальности и частоты Доплера для разного количества частот повторения представлены на рисунке 4.

При использовании алгоритма с учетом взвешивания амплитуд в соседних позиционных строках при обнаружении целей вероятность правильного решения неоднозначности составила:

- 90–98 % при попадании в луч антенны двух целей;
- 85–98 % при попадании в луч антенны трех целей;
- 75–96 % при попадании в луч антенны четырех целей;
- 60–96 % при попадании в луч антенны пяти целей.

Выбор количества периодов повторения может быть произведен в зависимости от числа обнаруженных целей на данной угловой позиции.

Выводы

Проведено исследование зависимости ошибки измерения однозначных значений дальности

и частоты Доплера от значения расстояния между целями при попадании в луч антенны 2–5 целей. В результате численного моделирования вероятность неправильного решения неоднозначности уменьшилась в 2 раза при дополнительном сопоставлении прогнозируемых значений и неоднозначных значений, полученных с учетом взвешивания амплитуд в соседних позиционных строках обнаруженных целей.

Использование предложенного алгоритма устранения неоднозначности в РЛС в режиме квазинепрерывного излучения со средней частотой повторения при попадании в луч антенны нескольких целей позволит получать правильное измерение дальности и частоты Доплера с более высокой вероятностью.

Список литературы

1. Антипов В. Н., Колтышев Е. Е., Кондратенков Г. С., Лепин В. Н., Фролов А. Ю., Янковский В. Т. Многофункциональные радиолокационные комплексы истребителей. М.: Радиотехника, 2014. 296 с.
2. Рындык А. Г. Алгоритмы устранения неоднозначности измерения дальности импульсно-фазовым методом // Известия вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 1986. Т. 29. № 7. С. 46–50.
3. Гульшин В. А. Изменение частоты повторения зондирующих импульсов в неоднозначных радиолокационных измерениях дальности // Вестник УлГТУ. 2000. № 3. С. 55–57.
4. Рындык А. Г., Полов К. П., Пучков С. А. Однозначное измерение дальности на фоне пассивных помех // Известия вузов МВ и ССО СССР. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31. № 4. С. 37–42.
5. Канащенков А. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф. Облик перспективных бортовых радиолокационных систем. Возможности и ограничения. М.: ИПРЖР, 2002. 176 с.
6. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
7. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
8. Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С., Корнев А. Н., Лаврукевич В. В., Пушкин А. А.



Теоретико-экспериментальное сравнение адаптивных и традиционных устройств селекции движущихся целей в импульсных РЛС // Успехи современной радиоэлектроники, 2018. № 4. С. 40–56.

9. Баранова Г. В. Квазиоптимальные алгоритмы оценивания дальности до цели в импульсно-доплеровской РЛС // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ. 2005. Вып. 1. С. 87–92.

10. Кострова Т. Г. Применение амплитудной модуляции зондирующих импульсов для устранения неоднозначных измерений дальности // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сборник научных трудов. Вып. 9. М.: Радиотехника, 2007. С. 145–150.

11. Коршунов А. Ю., Мазаян Н. Р., Николаев С. Ф., Сеницын Е. А., Фридман Л. Б.,

Шильдкрет А. Б. Метод раскрытия неоднозначности измерения дальности для первичных радиолокационных станций // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2013. № 1. С. 49–53.

12. Коврегин В. Н., Ковреги́на Г. М. Адаптивно-робастная калмановская фильтрация неоднозначных измерений при дальнометрии в импульсно-доплеровских радарх с квазинепрерывным излучением: сб. мат.-лов междунар. форума СМММ-2021 «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». СПб., 2021.

13. Зайцев А. В., Разин А. А. Исследование сигнала в виде пачки когерентных импульсов с нерегулярной структурой // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2022. № 3. С. 41–47.

Об авторах

Зайцев Алексей Вячеславович – инженер Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова», Жуковский, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

Разин Анатолий Анатольевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории Акционерного общества «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В. В. Тихомирова», Жуковский, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокационные системы, вторичная обработка радиолокационной информации.

The development and analysis of a measurement ambiguity resolution algorithm for multiple targets in the antenna beam in the quasi-continuous radiation mode

Zaytsev A. V., Razin A. A.

“V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Joint Stock Company, Zhukovsky, Russian Federation

A method for resolving the range and Doppler frequency ambiguity is proposed for multiple targets in the antenna beam for a medium sounding pulse repetition frequency. The probability of correct resolution of the range and Doppler frequency ambiguity is estimated using a mathematical modelling method in the MatLab software environment.

Keywords: quasi-continuous signal, ambiguity resolution, MatLab

Information about the authors

Zaytsev Aleksey Vyacheslavovich – Engineer, “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Joint Stock Company, Zhukovsky, Russian Federation.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.

Razin Anatoliy Anatolievich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory, “V. V. Tikhomirov Scientific Research Institute of Instrument Design”, Joint Stock Company, Zhukovsky, Russian Federation.

Science research interests: radar systems, secondary processing of radar information.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-11-18>

УДК 621.396.69

Применение частотно-фазоманипулированных сигналов в целях повышения скрытности излучения РЛС

А. В. Пискунов, Н. Н. Литвинов, А. И. Энверов

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, Ярославль, Российская Федерация

Оценена скрытность широкополосных зондирующих сигналов современных многофункциональных радиолокационных станций. Рассмотрен способ повышения структурной скрытности широкополосного сигнала путем совмещения фазово-кодовой и псевдослучайной дискретно-частотной манипуляции.

Ключевые слова: структурная скрытность, широкополосные сигналы, псевдослучайные дискретно-частотные сигналы, сигналоподобные помехи, методы технического анализа сигналов

Для цитирования: Пискунов А. В., Литвинов Н. Н., Энверов А. И. Применение частотно-фазоманипулированных сигналов в целях повышения скрытности излучения РЛС // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 11–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-11-18>

For citation: Piskunov A. V., Litvinov N. N., Enverov A. I. Application of frequency-shift and phase-shift keyed signals to improve radar emission secrecy // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 11–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-11-18>

Поступила 12.12.2022 Отрецензирована 11.01.2023 Одобрена 26.03.2023 Опубликована 14.06.2023

Введение

В условиях развития технологий и способов применения противником активных сигналоподобных помех радиоэлектронным средствам (РЭС) системы противовоздушной обороны приобретает высокую актуальность вопрос повышения их помехозащищенности.

В части, касающейся «вскрытия» работы радиолокационной станции (РЛС), радиотехническая разведка (РТР) предусматривает последовательное выполнение двух основных задач [1]: выявление факта работы РЭС (обнаружение сигнала) и определение структуры обнаруженного сигнала (на основе определения ряда его параметров). Перечисленным задачам радиотехнической разведки могут быть противопоставлены два вида скрытности сигналов: энергетическая и структурная. Энергетическая скрытность

подразумевает устойчивость РЛС к обнаружению ее излучения средством РТР по энергии зондирующего сигнала (ЗС), сконцентрированной в некоторой полосе частот, а структурная – к вскрытию и дальнейшему анализу структуры излученного сигнала.

С точки зрения противодействия сигналоподобным помехам наибольший интерес представляет структурная скрытность, так как факт обнаружения ЗС РЛС средством РТР не является достаточным условием для их создания. Следовательно, задача выбора ЗС для многофункциональной РЛС (МФ РЛС), под которой понимается радиолокатор наземного базирования с фазированной антенной решеткой, решающий весь комплекс задач по обнаружению и сопровождению целей, а также задач цифровой связи по обмену информацией с управляемыми подвижными объектами [2], удовлетворяющего требованию повышенной структурной скрытности, является актуальной. Это связано, с одной стороны, с возросшими

возможностями средств радиоэлектронной борьбы по формированию помех, а с другой – с появлением новых методов анализа структуры сигналов [3].

В современных МФ РЛС широко используются сложные энергоемкие сигналы. К примеру, реализованы в цифровой форме формирование и обработка четырех типов радиосигналов: немодулированных, квазипрерывных, фазо-кодо-манипулированных (ФКМ), линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ), различающихся временной структурой и видом фазовой модуляции. Среди них есть ФКМ и ЛЧМ радиоимпульсы (РИ) с длительностью от 100 до 400 микросекунд. Такие широкополосные сигналы (ШПС) позволяют обеспечить высокую энергетическую скрытность и требуют специальных алгоритмов их приема и обработки в средствах РТР. Создание эффективных сигналоподобных помех РЛС с такими сигналами возможно только после успешного решения задачи структурного обнаружения (определения вида модуляции) средством РТР.

Анализ существующих методов РТР

В настоящее время известно достаточно много методов технического анализа сложных сигналов в условиях априорной неопределенности

их структуры и параметров. В литературе в качестве эффективных методов определения вида модуляции зондирующих сигналов средствами РТР приводятся метод умножения полной фазы (удвоения частоты) и автокорреляционный метод, обладающие высокой помехоустойчивостью (работают в условиях отношения сигнал/помеха, близких к единице) [1, 3, 4].

Метод умножения полной фазы основан на различиях амплитудных спектров немодулированных, ЛЧМ и ФКМ РИ на основной f_0 и удвоенной частотах. В качестве разделяющего признака используется ширина спектра, которая отличается у этих сигналов на удвоенной частоте (рис. 1).

У ЛЧМ РИ ширина спектра определяется девиацией частоты Δf , а у ФКМ РИ – длительностью дискретного элемента τ_d . В [4] показано аналитически, что умножение этих сигналов самих на себя приводит к увеличению несущей частоты и девиации в два раза и демодуляции фазы при коде $[0, \pi]$. Что проявляется в расширении спектра ЛЧМ РИ в два раза и сужении спектра ФКМ РИ до величины обратно пропорциональной длительности τ_d всего ФКМ РИ.

На рисунке 1б представлены амплитудно-частотные спектры (АЧС) результата

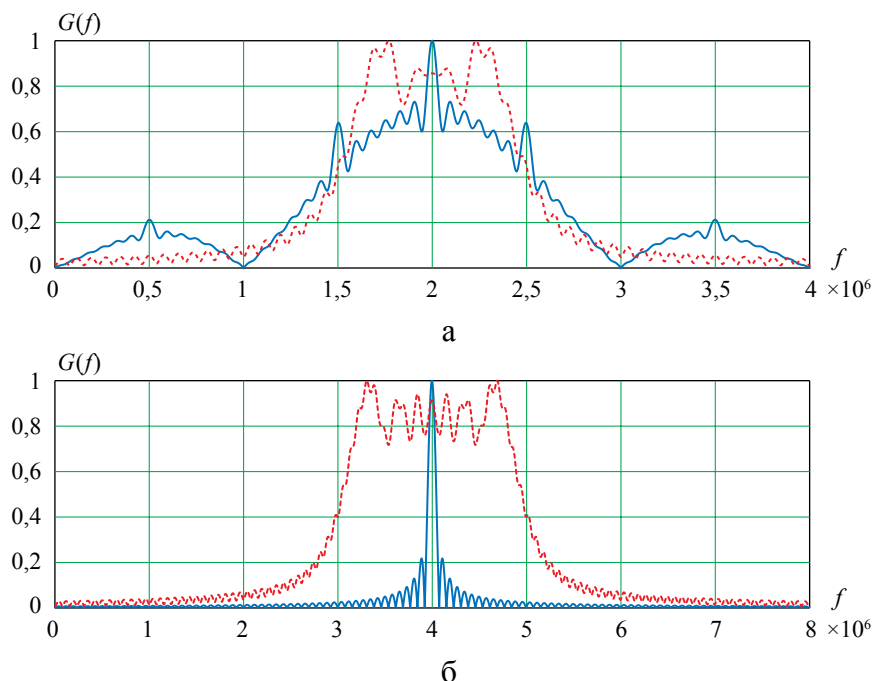


Рис. 1. АЧС ЛЧМ и ФКМ РИ при $\Delta f = 1/\tau_d$: а – на частоте f_0 ; б – на частоте $2f_0$
— ФКМ; --- ЛЧМ



умножения ФКМ и ЛЧМ РИ на самих на себя для случая $\Delta f = 1 / \tau_d$.

Следовательно, данный метод позволяет выявить структуру ФКМ и ЛЧМ РИ путем сравнения ширины их спектров на основной и удвоенной частоте.

Автокорреляционный метод определения вида внутримпульсной модуляции сигналов основан на сравнении их спектров на выходе автокорреляционной схемы при использовании в качестве опорного сигнала коррелятора входного сигнала, задержанного на время τ ($\tau \ll \tau_n$) (рис. 2). Различие выходных сигналов коррелятора, а соответственно, и их спектров (рис. 3) дает возможность распознавания данных видов модуляции по ширине амплитудно-частотных спектров (АЧС) и их положению на частотной оси [3].

Проведенный анализ показывает, что ЛЧМ и ФКМ РИ обладают низкой структурной скрытностью и, как следствие, слабой имитостойкостью [3]. Следовательно, для затруднения создания сигналоподобных помех необходим широкополосный сигнал, структура которого не вскрывалась бы методами анализа, применяемыми средствами РТР.

Анализ применения совместной фазовой и частотной манипуляции

Приведенный выше материал не позволяет численно оценить структурную скрытность исследуемых ШПС. Под скрытностью понимается способность противостоять обнаружению

и измерению параметров сигнала [5]. В настоящий момент в научной литературе нет общих принципов оценки скрытности сигналов. Чаще всего в качестве показателя скрытности используется вероятность обнаружения события, однако такой способ требует знания конкретного алгоритма раскрытия события на станции РТР, что делает затруднительным сравнение скрытностей радиосигналов разной структуры.

В работе [6] используется метод определения структурной скрытности, не требующий знания алгоритма вскрытия сигнала средством РТР. В основе метода лежит определение числа двоичных измерений (диз), среднее количество которых необходимо для раскрытия структуры сигнала. Такой подход позволяет сравнивать скрытность сигналов при некоторых фиксированных параметрах, таких как база сигнала, ширина полосы рабочих частот и т. д.

Таким образом, структурная скрытность определяется числом элементов множества возможных сменных параметров ЗС [6], которыми могут быть не только несущая частота, ширина спектра, амплитуда и длительность сигнала, но и вариант его фазово-временной (частотно-временной) кодовой структуры.

В соответствии с [6] структурная скрытность Sk (выражена в «диз») ЛЧМ и ФКМ сигналов определяется величиной их базы B (произведение длительности сигнала τ_c на ширину его спектра Δf):

$$Sk = \log_2 B. \quad (1)$$

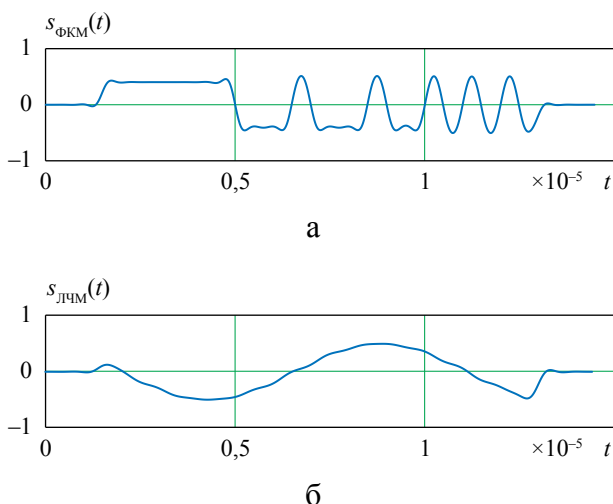


Рис. 2. Сигналы на выходе коррелятора при подаче на его вход: а – ФКМ РИ; б – ЛЧМ РИ

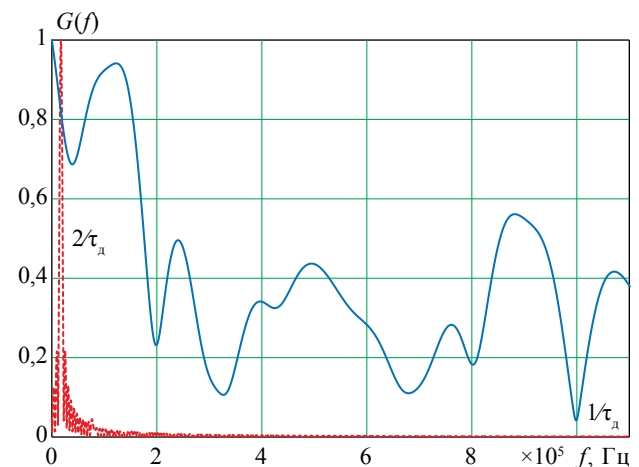


Рис. 3. АЧС ЛЧМ и ФКМ РИ на выходе коррелятора при $\Delta f = 1/\tau_d$
— ФКМ; — ЛЧМ



Вариация составляющими B в интересах повышения скрытности ЗС нежелательна, т.к. приведет к изменению разрешающих способностей РЛС по дальности и скорости.

Следовательно, при фиксированной длительности, ширине спектра и числе элементов кодовой последовательности наилучшей скрытностью будет обладать тот широкополосный сигнал (ШПС), который имеет большее число степеней свободы (перестановок элементов) его фазовой (частотной) манипулирующей последовательности. Число перестановок N -элементной кодовой последовательности зависит от количества разнотипных элементов (разных частот, фаз) и равно для частотной манипулирующей последовательности $N!$, а для фазовой с кодом $[0, \pi] - N$ [7]. Приведенные результаты отдадут предпочтение использованию частотной манипуляции при создании скрытных ШПС. Но перестановка элементов частотной манипулирующей последовательности влияет на уровень боковых лепестков ее нормированной автокорреляционной функции, и при ряде комбинаций они достигают уровня 0,5. Это накладывает ограничения на применение псевдослучайных дискретно-частотных (ДЧ) сигналов для решения радиолокационных задач.

Ввиду ортогональности манипулирующих функций возможна совместная частотно-фазовая манипуляция ЗС. При этом частотная манипуляция будет решать задачу скрытия, а фазовая – время-частотного разрешения. Структурная скрытность такого сигнала будет определяться суммой скрытностей ФКМ и псевдослучайного ДЧ сигналов:

$$Sk = Sk_{ДЧ} + Sk_{ФКМ} = \log_2(N! \cdot N). \quad (2)$$

Таким образом, предлагаемый широкополосный сигнал представляет собой совмещение двух видов сигнально-кодовых конструкций: фазовой кодовой манипуляции и псевдослучайного ДЧ РИ. Его математическая модель имеет вид:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N U(t - (i-1)\tau_d) \times \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{kodf(i-1)}{\tau_d N}\right)t + \varphi_i\right), \quad (3)$$

где N – число дискретных элементов в радиоимпульсе, τ_d – длительность дискретного

элемента, φ_i – начальная фаза i -го дискретного элемента, принимающая значения $[0, \pi]$ по закону манипулирующей кодовой последовательности, $kodf = rnd(1 \div N)$ – неповторяющаяся случайная выборка из N чисел, равномерно распределенная в диапазоне от 1 до N .

При синтезе такого сигнала должно обеспечиваться равенство ширины спектра псевдослучайного ДЧ РИ и фазовой кодовой манипулирующей последовательности, так как основное предназначение ДЧ сигнала – скрытие фазовой кодовой манипуляции.

Пример псевдослучайного ДЧ РИ с фазовой манипуляцией (ФМ) 13 разрядным кодом Баркера приведен на рисунке 4.

На рисунках 5 и 6 приведены результаты моделирования возможностей по вскрытию структуры предлагаемого сигнала методом удвоения частоты, а на рисунках 7 и 8 – автокорреляционным методом.

АЧС псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ (рис. 6б) существенно отличается от АЧС ФКМ РИ (рис. 1б) и по своей структуре близок к спектру псевдослучайного ДЧ РИ без ФМ (рис. 5б).

Анализ рисунков 5б и 6б показывает, что удвоение несущей частоты не приводит к резкому сужению спектра, как это было для ФКМ РИ (рис. 1б), так как демодуляция фазы, вызванная удвоением частоты, компенсируется расширением спектра за счет удвоения частоты перестройки сигнала от одного дискретного элемента к другому, что подтверждает выражение:

$$s(t) \cdot s(t) = \sum_{i=1}^N U^2(t - (i-1)\tau_d) \times \cos\left(2\pi\left(2f_0 + 2\frac{kodf(i-1)}{\tau_d N}\right)t + 2\varphi_i\right). \quad (4)$$

По форме АЧС также сложно судить об отсутствии (наличии) манипуляции фазы в этом сигнале.

На рисунке 7 представлены результаты компьютерного моделирования сигналов на выходе коррелятора при подаче на его вход псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ и без нее. По форме полученные графики отдаленно напоминают выходной сигнал коррелятора, полученный при анализе ФКМ РИ (рис. 2а).

Выходные сигналы коррелятора (рис. 7) близки по структуре и имеют достаточно

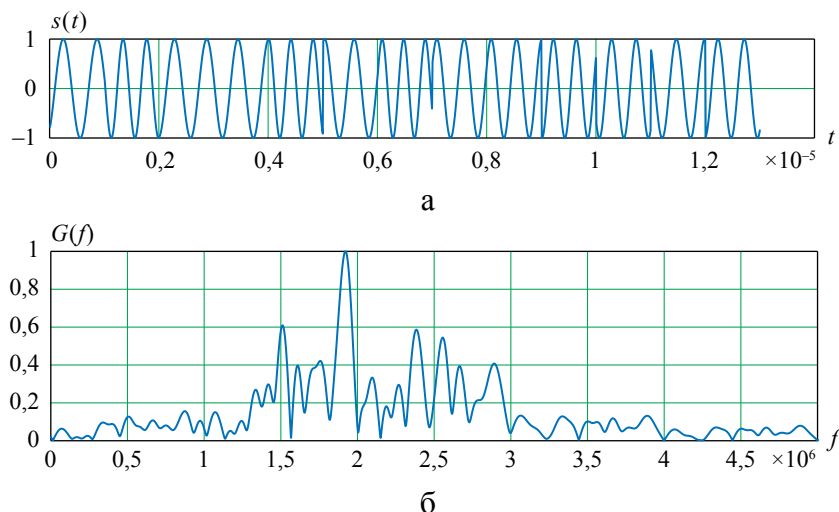


Рис. 4. Псевдослучайный ДЧ РИ с ФМ и его АЧС

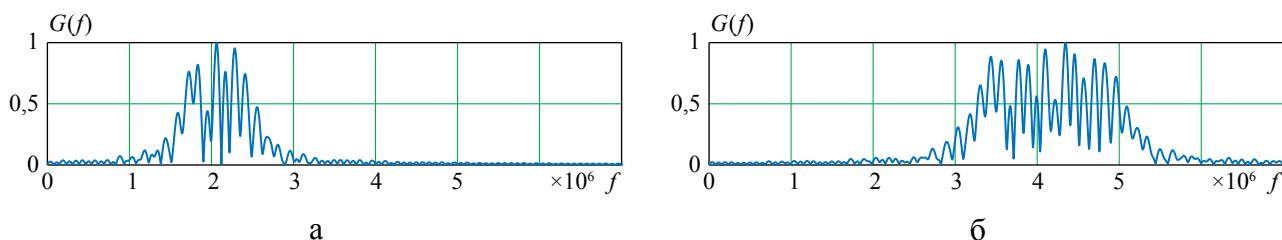


Рис. 5. АЧС псевдослучайного ДЧ РИ без ФМ: а – на частоте f_0 ; б – на частоте $2f_0$

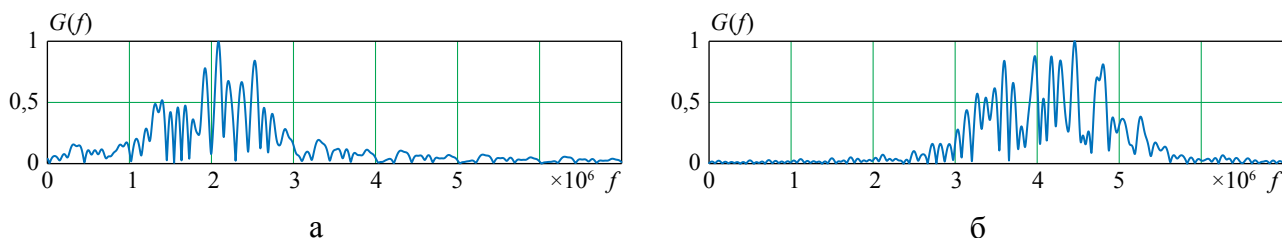


Рис. 6. АЧС псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ: а – на частоте f_0 ; б – на частоте $2f_0$

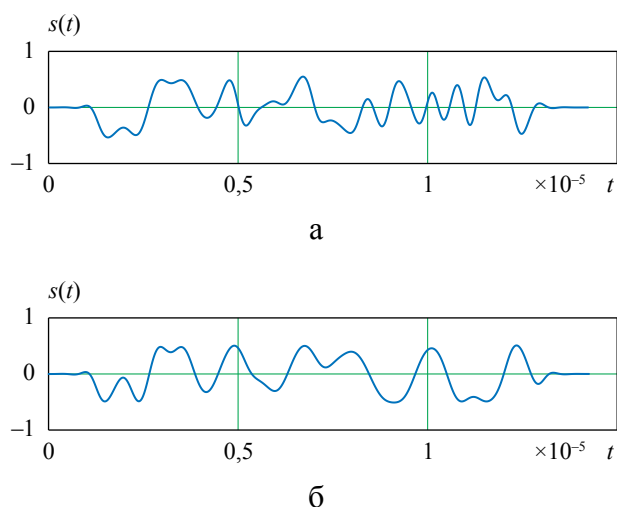


Рис. 7. Сигналы на выходе коррелятора при подаче на его вход псевдослучайного ДЧ РИ: а – с ФМ; б – без ФМ

сложную форму, вызванную рассогласованием входных сигналов в определенные моменты времени по частоте либо фазе за счет их рассовмещения на время t . Схожесть выходных сигналов коррелятора, а соответственно, и их спектров (рис. 8) не позволяет выявить наличие фазовой манипуляции в псевдослучайном ДЧ сигнале по ширине АЧС и его положению на частотной оси.

Для подтверждения выдвинутых гипотез был проведен статистический эксперимент по вскрытию структуры предлагаемого сигнала методом умножения полной фазы. В качестве разделяющего признака R_{Π} для различных структур сигналов было выбрано отношение ширины спектра сигнала на основной

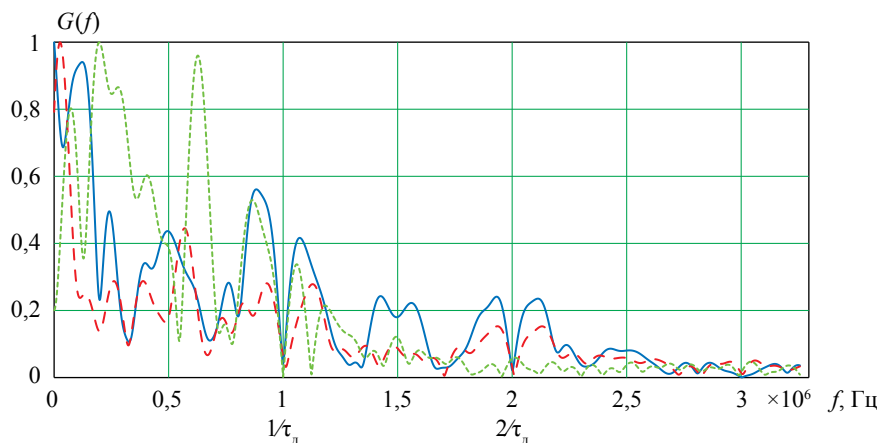


Рис. 8. Спектры ФКМ РИ и псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ и без нее на выходе коррелятора
— ФКМ; — ДЧ ФМ РИ; — ДЧ РИ

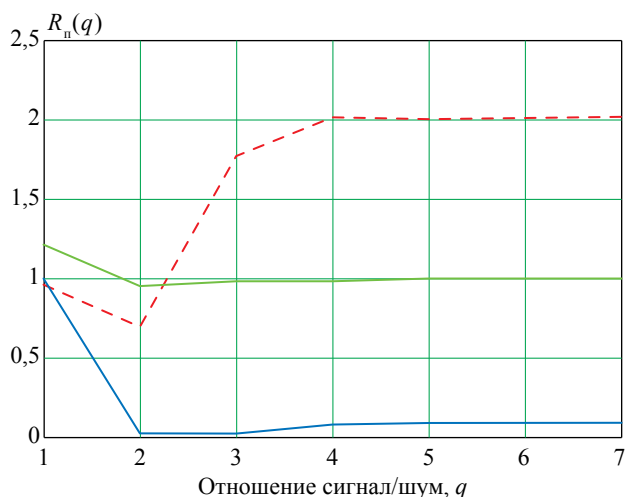


Рис. 9. Зависимости $R_n(q)$ для трех типов радиоимпульсов (ОПРИ, ЛЧМ и ФКМ)
— ФКМ; — ЛЧМ; — ОПРИ

f_0 и удвоенной частотах. Для оценки влияния отношения сигнал/шум q на точность измерения R_n были получены зависимости $R_n(q)$ для трех типов радиоимпульсов (одиночного прямоугольного радиоимпульса (ОПРИ), ЛЧМ и ФКМ), имеющих одинаковую ширину спектра (рис. 9). Полученные зависимости позволили определить пороговые уровни для параметра R_n , обеспечивающие распознавание структуры сигнала с вероятностью близкой к единице при $q > 5$. С использованием полученных пороговых уровней был проведен статистический эксперимент по отнесению предлагаемого псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ к одному из трех типов сигналов (ОПРИ, ЛЧМ и ФКМ) на основе измерения параметра R_n . Результаты эксперимента приведены на рисунке 10.

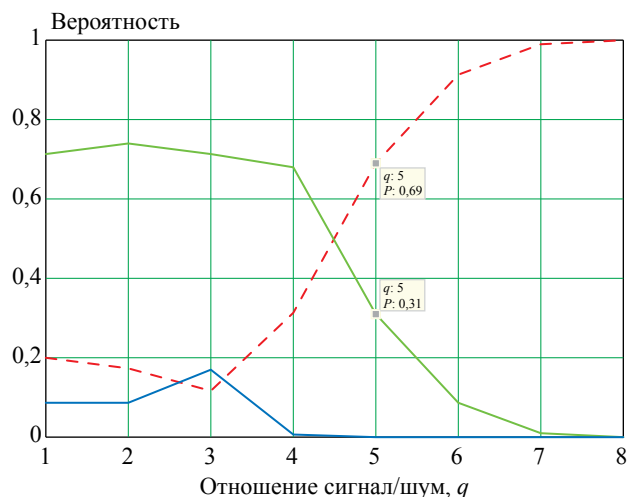


Рис. 10. Вероятность отнесения псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ к одному из трех типов сигналов для разных значений q
— ФКМ; — ЛЧМ; — ОПРИ

Анализ рисунка 10 позволяет сделать вывод, что при $q > 5$ велика вероятность перепутывания псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ с ЛЧМ РИ, следовательно, по параметру R_n эти сигналы не разрешаются и метод умножения полной фазы для вскрытия структуры псевдослучайного ДЧ РИ с ФМ неэффективен.

Полученные результаты показывают, что псевдослучайный ДЧ РИ с ФМ имеет более высокую структурную скрытность, чем ЛЧМ и ФКМ РИ и поэтому обладает более высокой имитостойкостью по сравнению с этими сигналами.

Для исключения влияния частотной манипуляции, применяемой лишь для решения задачи скрытия, на оптимальную обработку предлагаемого сигнала необходимо



осуществить предварительную демодуляцию его псевдослучайной ДЧ составляющей. Результат обработки сигнала (рис. 4а) на основе согласованной фильтрации его фазово-кодовой составляющей с предварительной демодуляцией псевдослучайной ДЧ составляющей приведен на рисунке 11. Для сравнительного анализа на рисунке 11 представлены результаты такой же обработки ЛЧМ РИ с девиацией частоты, равной ширине спектра предлагаемого сигнала. Представленные результаты для наглядности получены в отсутствие шумов.

Анализ рисунка 11 позволяет сделать вывод, что предлагаемая обработка обеспечит селекцию эхо-сигнала цели на фоне сигналоподобных помех, поставленных при условии вскрытия средством РТР параметров и структуры частотной составляющей ЗС без вскрытия его фазовой структуры.

Выводы

1. Доказано, что структуры ШПС, такие как ЛЧМ и ФКМ сигналы, в большей мере подвержены вскрытию средствами РТР, чем структуры ДЧ сигналов.

2. Предложено при фазово-кодовой манипуляции ЗС использовать псевдослучайную перестройку несущей частоты от одного дискретного элемента сигнала к другому, позволяющую существенно снизить вскрытие его фазовой структуры и, как следствие, повысить помехозащищенность РЛС в условиях воздействия сигналоподобных помех.

Список литературы

1. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И. и др. Помехозащищенность радиосистем со

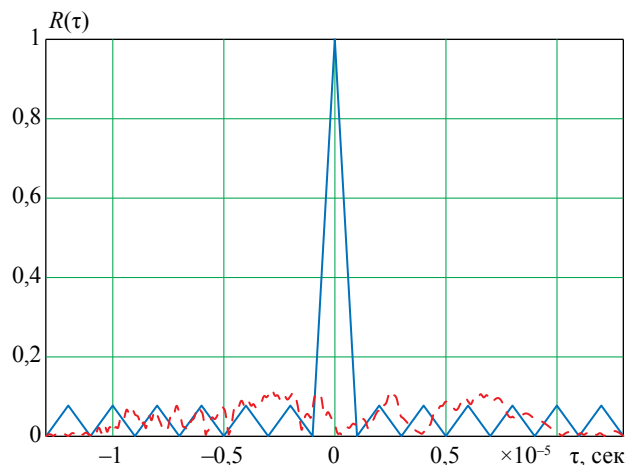


Рис. 11. Псевдослучайный ДЧ РИ с ФМ и ЛЧМ РИ на выходе предлагаемого устройства обработки
— ДЧ ФМ РИ; — ЛЧМ

сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

2. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных радиолокаторах. Методы. Алгоритмы. Аппаратура: коллективная монография / Под ред. Г. В. Зайцева. М.: Радиотехника, 2015. 376 с.

3. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М.: Воениздат, 2001. 456 с.

4. Лаврентьев А. М. Анализ возможностей средств радиотехнической разведки по структурному обнаружению зондирующих сигналов радиолокационных станций в сложной сигнальной обстановке // Вестник ЯВВУ ПВО. 2016. № 2. С. 5–17.

5. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.

6. Каневский З. М., Литвиненко В. П., Макаров Г. В. Теория скрытности. В 2 ч. Ч. 1. Основы теории скрытности: учеб. пособие, Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. 92 с.

7. Варакин Л. Е. Теория систем сигналов. М.: Советское радио, 1978. 304 с.

Об авторах

Пискунов Анатолий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшего профессионального образования, доцент кафедры радиотехнических систем Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Ярославль, Российская Федерация.

Область научных интересов: радиолокация, радиоэлектронная борьба, скрытность сигналов, моделирование радиотехнических систем, устройств формирования и обработки сигналов.



Литвинов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заместитель начальника учебно-методического отдела Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Ярославль, Российская Федерация. Область научных интересов: радиолокация, радиоэлектронная борьба, скрытность сигналов, моделирование радиотехнических систем, устройств формирования и обработки сигналов.

Энверов Александр Игоревич – адъюнкт отдела организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, Ярославль, Российская Федерация. Область научных интересов: радиолокация, радиоэлектронная борьба, скрытность сигналов, моделирование радиотехнических систем, устройств формирования и обработки сигналов.

Application of frequency-shift and phase-shift keyed signals to improve radar emission secrecy

Piskunov A. V., Litvinov N. N., Enverov A. I.

Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russian Federation

Secrecy of wide-band sounding signals of modern multifunction radars is evaluated. A method for improving the wide-band signal structural secrecy by combining phase-code and pseudorandom discrete frequency-shift keying is considered.

Keywords: structural secrecy, wide-band signals, pseudorandom discrete-frequency signals, signal-like interference, methods of technical analysis of signals

Information about the authors

Piskunov Anatoly Vladimirovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Honored Worker of Higher Professional Education, Associate Professor of Department of Radio Engineering Systems, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russian Federation.

Science research interests: radiolocation, electronic warfare, signal secrecy, modelling of radio engineering systems, signal shaping and processing devices.

Litvinov Nikolay Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Deputy Head of Curriculum and Instruction Department, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russian Federation.

Science research interests: radiolocation, electronic warfare, signal secrecy, modelling of radio engineering systems, signal shaping and processing devices.

Enverov Aleksandr Igorevich – Postgraduate, Department of Research Management and Academic and Teaching Personnel Training, Yaroslavl Higher Military School of Air Defense, Yaroslavl, Russian Federation.

Science research interests: radiolocation, electronic warfare, signal secrecy, modelling of radio engineering systems, signal shaping and processing devices.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-19-28>

УДК 623.4.027.2

Метод измерения угла крена боеприпаса с использованием поляризации излучения информационного поля лазерно-лучевой системы телеориентации

М. М. Ильичев, Д. В. Комраков, С. Л. Лысенко, М. А. Мещеряков, А. В. Семенов

АО «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», Москва, Российская Федерация

Для определения текущего угла крена управляемого по лазерному лучу боеприпаса предлагается использовать поляризацию лазерного излучения информационного поля канала управления. Угол крена боеприпаса относительно плоскости поляризации лазерного излучения определяется с помощью фотоприемного устройства с поляризатором по формуле, полученной из закона Малюса. В лазерно-лучевой системе телеориентации поляризованный лазерный луч с помощью акустооптического дефлектора сканируется в пространстве. За один полукадр сканирования по тангажу и за следующий полукадр сканирования по курсу лазерный луч несколько раз попадает на фотоприемное устройство. При каждом попадании сигнал с фотоприемного устройства обрабатывается и определяется угол крена. По сериям замеров угла крена рассчитывается время, когда угол крена совпадает с необходимым углом для выдачи команды на коррекцию траектории. Разработан алгоритм вычисления угла крена. Проведена оценка ошибки данного метода. Возможно определение текущего угла крена вращающегося боеприпаса с точностью примерно 4° . Проведена экспериментальная проверка предложенного метода.

Ключевые слова: акустооптический дефлектор, боеприпас, закон Малюса, информационное поле, лазерное излучение, лазерно-лучевая система телеориентации, поляризация излучения, угол крена, фотоприемное устройство

Для цитирования: Ильичев М. М., Комраков Д. В., Лысенко С. Л., Мещеряков М. А., Семенов А. В. Метод измерения угла крена боеприпаса с использованием поляризации излучения информационного поля лазерно-лучевой системы телеориентации // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 19–28. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-19-28>

For citation: Ilichev M. M., Komrakov D. V., Lysenko S. L., Meshcheryakov M. A., Semenov A. V. A method of measurement of the projectile roll angle using the radiation polarization of the information field of a laser beam television guidance system // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 19–28. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-19-28>

Поступила 15.11.2022 Отрецензирована 07.12.2022 Одобрена 18.05.2023 Опубликовано 14.06.2023

Введение

При решении задачи наведения вращающихся ракет на цель широко используются методы модулированного информационного поля лазерного излучения. Непрерывное лазерное излучение осуществляет горизонтальное и вертикальное сканирование пространства, в котором совершает полет боеприпас. Попадание лазерного луча в процессе сканирования

на фотоприемное устройство, установленное на боеприпасе, формирует на фотоприемном устройстве короткий электрический импульс с длительностью, равной времени засветки боеприпаса пятном сканирующего лазерного излучения. С помощью определенного закона сканирования лазерного луча и регистрации боеприпасом времени формирования электрических импульсов на фотоприемном устройстве от лазерного луча на боеприпас передается информация о его координатах и какие управляющие команды он должен выполнить.

© Ильичев М. М., Комраков Д. В., Лысенко С. Л., Мещеряков М. А., Семенов А. В., 2023

При сканировании пространства с постоянным периодом $T_{\text{кадр}}$ излучение лазера за один полукадр сканирования по вертикали несколько раз (в качестве примера примем 4 раза) попадает на фотоприемное устройство и за следующий полукадр сканирования луча по горизонтали также 4 раза попадает на фотоприемное устройство. В результате за период $T_{\text{кадр}}$ излучение лазера 8 раз попадает на фотоприемное устройство.

Для правильного выполнения команд управления необходимо знание угла крена боеприпаса, чтобы скорректировать траекторию боеприпаса в нужном направлении. Каждая команда выполняется при определенном угле крена боеприпаса. Традиционно для определения угла крена используются гироскопы: механические либо волоконные, которые устанавливают на боеприпасе. Гироскопы активизируются при старте боеприпаса и дают информацию в систему управления боеприпаса о его текущем угле крена [1, 2]. Привлекательной является возможность исключения гироскопов как относительно сложных устройств за счет использования более простых устройств определения угла крена.

Предлагается использовать для определения угла крена управляемого по лазерному лучу боеприпаса поляризацию лазерного излучения информационного поля канала управления [3] вместо гироскопических систем ориентации. По мнению авторов этой статьи, данный метод проще и надежнее гироскопического метода определения угла крена

и может позволить в ряде случаев исключить дорогостоящий прибор – гироскоп, не снижая точностных характеристик системы наведения боеприпаса.

Описание метода

Угол крена боеприпаса относительно плоскости поляризации луча определяется с помощью двух фотоприемных устройств (фотодиодов) с одинаковой чувствительностью, установленных на боеприпасе, один из которых имеет поляризатор лазерного излучения. То есть одновременно с передачей боеприпасу сканирующим лучом информации о его отклонении от линии визирования на цель дополнительно определяется угол наклона боеприпаса к направлению поляризации лазерного излучения при каждом попадании сканирующего лазерного луча на вращающийся боеприпас. Для обработки сигналов с фотоприемных устройств используется тот же процессор, что и в случае с гироскопами. Схемы существующего устройства управления боеприпасом и предлагаемая представлены на рисунках 1 и 2.

В соответствии с законом Малюса мощность плоско поляризованного лазерного излучения P , прошедшего поляризатор, ориентированный под углом β к плоскости поляризации лазерного излучения мощностью P_0 , равна

$$P = P_0 \cos^2 \beta. \quad (1)$$

Имея значения мощностей с двух фотоприемных устройств, на основании формулы (1) можно определить угол наклона боеприпаса

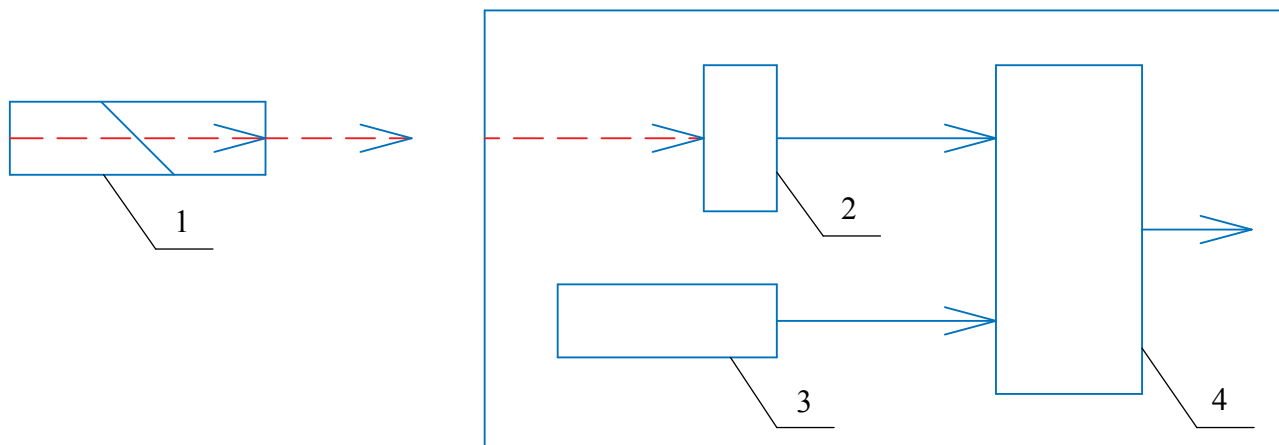


Рис. 1. Существующая схема управления боеприпасом: 1 – сканирующий лазер с поляризатором излучения. Боеприпас: 2 – фотодиод, 3 – гироскоп, 4 – процессор на основе данных фотодиода и гироскопа выдает команды на управление боеприпасом

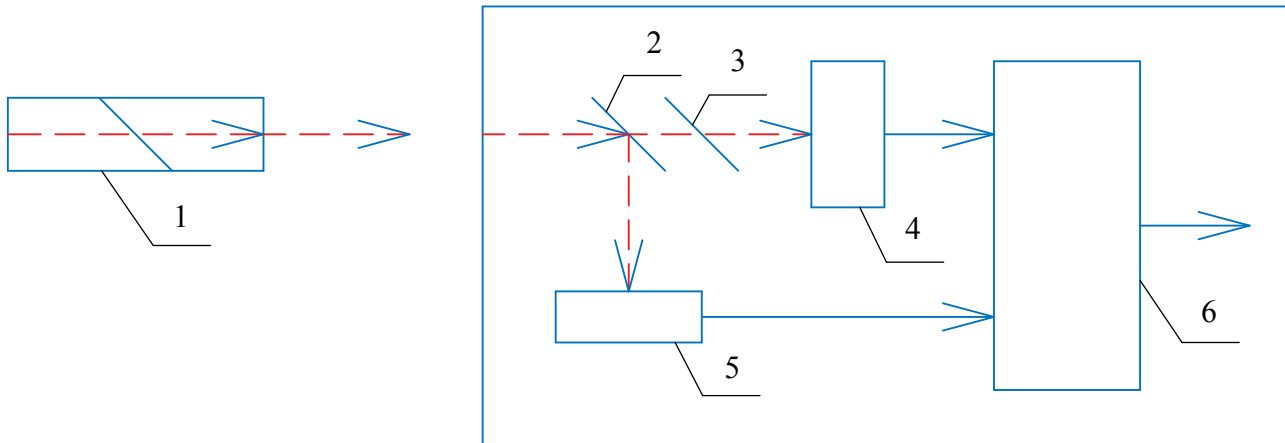


Рис. 2. Предлагаемая схема управления боеприпасом: 1 – сканирующий лазер с поляризатором излучения. Боеприпас: 2 – делительная пластина 50 %, 3 – поляризатор, 4, 5 – фотодиоды, 6 – процессор на основе данных с двух фотодиодов выдает команды на управление боеприпасом

к направлению поляризации лазерного излучения β по формуле (2) в диапазоне $[0^\circ, 90^\circ]$.

$$\beta = \arccos \sqrt{x}, \quad (2)$$

где $x = P / P_0$ – относительная мощность излучения на фотоприемнике после поляризатора, равная отношению сигналов с двух фотоприемников.

Пояснения к системе угловой ориентации боеприпаса даны на рисунке 3. Полный угол вращения боеприпаса равен

$$\varphi = \int_0^t \omega(\tau) \cdot d\tau, \quad (3)$$

где $\omega(\tau)$ – угловая скорость вращения боеприпаса в зависимости от времени.

Угол крена боеприпаса α в диапазоне $[0^\circ, 360^\circ]$ равен полному углу вращения φ , приведенному к диапазону $[0^\circ, 360^\circ]$. В этом диапазоне угол крена боеприпаса α определяется согласно таблице 1, где β определяется формулой (2). В таблице 1 задан измерительный диапазон, в котором величина $x \in [0,03, 0,97]$ согласно формуле (2). Рисунок 4 иллюстрирует метод определения угла крена. На нем показана зависимость относительной мощности излучения x на фотоприемнике после поляризатора от угла крена α с учетом измерительных диапазонов. Крестом указаны точки (возможный вариант), в которых измерена величина x .

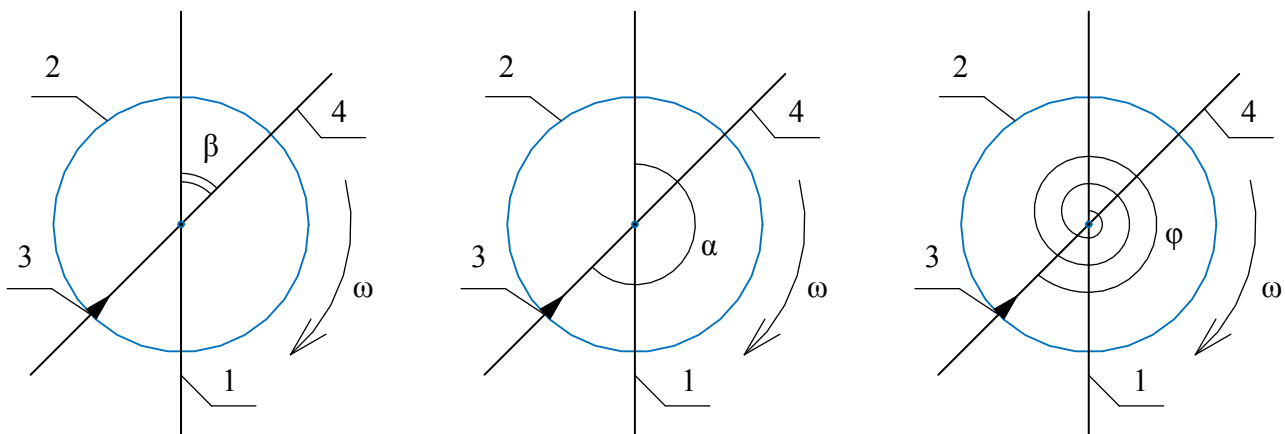


Рис. 3. Пояснения к системе угловой ориентации боеприпаса: 1 – плоскость поляризации лазерного излучения; 2 – корпус вращающегося боеприпаса; 3 – метка на боеприпасе, относительно которой ориентирована система управления направлением движения боеприпаса («вверх», «вниз», «влево», «вправо») и 4 – плоскость поляризации фотоприемного устройства; β – угол наклона – минимальный угол между плоскостями поляризации лазерного излучения и фотоприемного устройства; α – угол крена – угол между направлением «вверх» плоскости поляризации лазерного излучения и направлением на метку боеприпаса; φ – угол вращения – то же, что и угол крена, но с учетом полного числа оборотов с момента начала измерений; ω – скорость вращения боеприпаса



Таблица 1

Диапазоны измерения углов крена для различных четвертей угла поворота боеприпаса

Диапазон окружности	Угол крена α , град.	Измерительный диапазон, град.
Первая четверть (0–90°)	β	10–80
Вторая четверть (90–180°)	$180 - \beta$	100–170
Третья четверть (180–270°)	$180 + \beta$	190–260
Четвертая четверть (270–360°)	$360 - \beta$	280–350

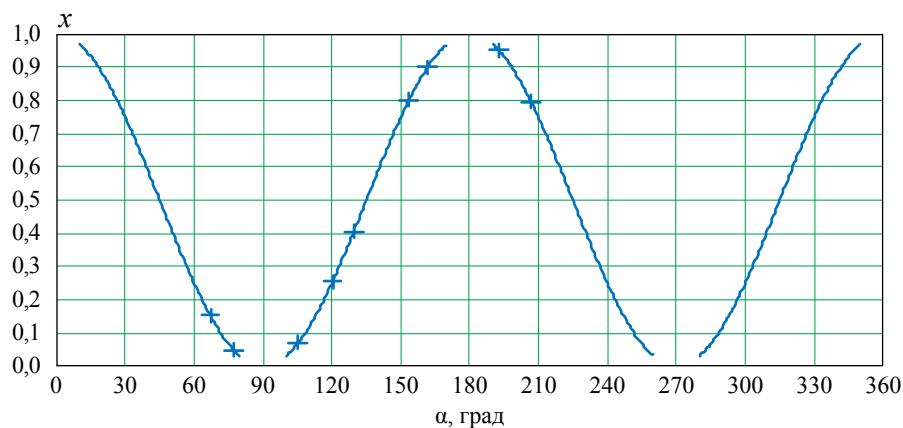


Рис. 4. Иллюстрация метода. Зависимость относительной мощности излучения x на фотоприемнике после поляризатора от угла крена α с учетом измерительных диапазонов. Крестом указаны точки (возможный вариант), в которых измерена величина x

Таким образом, для определения угла крена α надо знать две величины: угол β согласно формуле (2) и номер четверти окружности, для определения которой будем далее использовать кусочно-линейную аппроксимацию уравнения (3).

Ошибка определения угла β

Как правило, при полете ракеты в информационном поле поддерживается постоянная плотность мощности излучения, которая в сотни раз превышает фоновую засветку [3] и позволяет иметь на выходе фотоприемного устройства отношение сигнал/шум более 100. Кроме того, при использовании узкого спектрального фильтра и временной селекции, как уже говорилось, непрерывное лазерное излучение формирует на фотоприемных устройствах боеприпаса короткий электрический импульс, создают условия, что фоновой засветкой можно пренебречь, а основным источником ошибки является паразитная поляризация. Так как контраст поляризации более 100:1, то ошибка определения относительной мощности будет примерно $\delta x = \delta P / P_0 = 0,01$. Экспериментально получена величина ошибки $\delta x = 0,01$ (см. далее).

Используя формулу (2), вычисляя ее производную, получим выражение для определения ошибки угла в результате неточности определения относительной мощности.

$$\delta\beta = \frac{-1}{2\sqrt{1-x}\sqrt{x}} \cdot \delta x = k_x \cdot \delta x. \quad (4)$$

Выберем диапазон $x \in [0,03, 0,97]$ или, согласно формуле (2), $\beta \in [10^\circ, 80^\circ]$. Величина k_x в данном диапазоне имеет абсолютные значения от 1,0 до 3,0. Следовательно, ошибка определения угла β по формуле (2) не превышает согласно формуле (4) $\delta\beta = 3,0 \times 0,01 = 0,03$ рад ($1,72^\circ$). Для других четвертей окружности выбранные диапазоны для измерения угла крена боеприпаса α даны в таблице 1. Для всех диапазонов измерения диапазон величины $x \in [0,03, 0,97]$ и ошибка определения угла β такая же, как и в первой четверти.

Алгоритм обработки измеряемых величин

Для обеспечения управления боеприпасом за один его оборот информация о его отклонении от линии визирования на цель должна поступать несколько раз, и несколько раз должны передаваться команды на отклонение рулей. Для примера проанализируем ситуацию,



когда частота кадров в четыре раза выше частоты вращения боеприпаса. Т.е. время одного информационного кадра не больше времени вращения боеприпаса на четверть оборота. В течение кадра происходит 8 измерений относительной мощности излучения x на фотоприемнике после поляризатора и соответствующие им моменты времени t . В соответствии с размером диапазона измерения (см. табл. 1) большая часть измерений попадает в диапазон измерения, а потому эти углы α будут определены с ошибками от 0,01 до 0,03 рад. За пределами измеряемых диапазонов (т.е. $x < 0,03$ или $x > 0,97$), измеряемые значения отбрасываем. Таким образом, формируем измеряемую последовательность элементов (x_i, t_i) .

Вначале из последовательности (x_i, t_i) отбираем минимум три последовательных элемента, величины x_i , которых монотонно изменяются во времени. Отбрасываем первый элемент выборки (он может оказаться из другой четверти окружности) и дополняем выборку следующими из последовательности (x_i, t_i) значениями, пока монотонность выборки сохраняется. Отбрасываем последний элемент выборки (он тоже может оказаться из другой четверти окружности). Оставшаяся выборка обязательно принадлежит одной четверти окружности. Для дальнейшей обработки данных достаточно двух элементов, оставшихся в выборке, хотя реально их будет больше. Если эта последовательность убывающая, то считаем, что измерения x_i принадлежат первой четверти окружности. Если эта последовательность возрастающая, то считаем, что измерения x_i принадлежат второй четверти окружности.

На рисунке 4 показан вариант, когда элементы со второго по восьмой составляют монотонную последовательность по x , но с третьего по седьмой элементы выборки принадлежат одной четверти, а второй и восьмой принадлежат другим четвертям окружности. Поэтому их надо отбросить. В монотонной последовательности не может быть более одного элемента с каждого конца, которые принадлежат другой четверти окружности. Наличие второго элемента из другой четверти окружности на концах выборки нарушит монотонность выборки, следовательно, такого не может быть.

Для выбранной последовательности (x_i, t_i) по формуле (2) и таблице 1 находим соответствующие им значения углов крена α_i .

Считаем, скорость вращения боеприпаса изменяется за один оборот значительно меньше, чем на 1 %, а потому вместо уравнения (3) будем использовать кусочно-линейные уравнения вращения (5). На первом обороте вращения (с того момента, как боеприпас стал измерять величину x) угол вращения и угол крена совпадают, т.е. $\varphi_i = \alpha_i$. Используя значения φ_i на первом регистрируемом обороте и соответствующие им значения t_i , находим значения угловой скорости ω , начального угла θ и определяем уравнение вращения (5). Для определения ω , θ используем метод наименьших квадратов (6), (7).

$$\varphi = \omega \cdot t + \theta, \quad (5)$$

где

$$\omega = \frac{\sum_1^N \varphi_i \cdot \sum_1^N t_i - N \cdot \sum_1^N t_i \cdot \varphi_i}{(\sum_1^N t_i)^2 - N \cdot \sum_1^N (t_i)^2}, \quad (6)$$

$$\theta = \frac{\sum_1^N t_i \cdot \sum_1^N t_i \cdot \varphi_i - \sum_1^N \varphi_i \cdot \sum_1^N (t_i)^2}{(\sum_1^N t_i)^2 - N \cdot \sum_1^N (t_i)^2}, \quad (7)$$

N – число элементов в выборке. Оно может быть два и более. Далее будем наращивать это число так, чтобы число элементов выборки охватывало период, равный не менее двух кадров $2 \cdot T_{\text{кадр}}$. За счет усреднения по множеству экспериментальных элементов точность определения параметров уравнения вращения будет возрастать.

Следующие измерения и их обработку после (x_N, t_N) выполнять можно по такой циклической процедуре:

- определили (x_i, t_i) – отбросили, если x_i не в измерительном диапазоне, и последовательно перебираем результаты измерений до тех пор, пока значение x_i не будет в измерительном диапазоне, т.е. $x_i \in [0,03, 0,97]$;
- для момента времени t_i вычислили ожидаемый угол вращения φ_{i0} с использованием формулы (5),

$$\varphi_{i0} = \omega \cdot t_i + \theta, \quad (8)$$

- определили число полных оборотов боеприпаса K_i (выделили из φ_{i0} целое число раз по 360°),



- по остатку от φ_{i0} после предыдущего выделения определили, в какой четверти окружности ожидается нахождение угла крена α_i (целое число раз по 90° плюс один). С учетом хорошей точности определения углов в измерительных диапазонах и отброса ряда данных в переходном диапазоне шириной 20° мы не ошибемся в предсказании номера четверти. Чтобы ошибиться, надо определять углы с ошибкой более 20° , а в нашем случае ошибка не более 4° (см. далее);

- вычислили угол крена α_i , используя формулу (2) и таблицу 1;

- вычислили полный угол вращения $\varphi_i = \alpha_i + 360 \cdot K_i$;

- увеличиваем число выборки N до необходимого значения, а далее сохраняем число выборки N , определив очередное значение φ_i , из предыдущей выборки убираем первый элемент, а в конец выборки вставляем только что определенный и обновляем значения ω , θ по формулам (6), (7). После первой последующие выборки не состоят из монотонных последовательностей. Они последовательно заполняются новыми элементами из измерительных диапазонов, а более «старые» элементы из них удаляются. Ввиду замедления вращения боеприпаса период $2 \cdot T_{\text{кадр}}$ будет становиться все меньшей долей полного оборота боеприпаса, но количество измерений от этого не уменьшится, а, потому на точность определения угла крена это не повлияет.

Таким образом, мы организовали непрерывную, корректируемую после каждого измерения процедуру определения уравнения вращения боеприпаса с использованием постоянно измеряемых значений относительной мощности излучения x_i на фотоприемнике после поляризатора и соответствующих им моментов времени t_i .

Уравнение движения (5) используется для определения времени, когда угол крена будет равен требуемому для системы управления.

Уточнение уравнения вращения боеприпаса

Ранее мы сделали предположение, что начальные измеряемые данные относятся к первой

либо второй четверти окружности в зависимости от направления монотонности. А можно было предположить, что они относятся к третьей либо четвертой четвертям. Решим эту неоднозначность.

Сразу после старта, определив уравнение вращения боеприпаса, вычисляем момент времени для подачи какой-либо одной из команд на коррекцию движения боеприпаса («вверх», «вниз», «влево», «вправо») и даем команду на выполнение. Если команда выполнена правильно, значит, уравнение вращения определено правильно и его можно использовать и дальше. Если выполнено противоположное команде действие, то необходимо всем углам вращения добавить 180° , т.е. сдвинуть все углы на две четверти оборота.

Система управления боеприпаса постоянно получает информацию о своем положении за счет сканирующего лазерного луча. Поэтому, правильно или неправильно выполнена команда, она может определить самостоятельно. В качестве альтернативного решения система управления боеприпаса может сделать замену понятий: «вверх» ↔ «вниз», «влево» ↔ «вправо».

После этой процедуры уравнение движения будет точно привязано к соответствующим четвертям окружности. Будет осуществлена привязка уравнения вращения к реальной угловой координате боеприпаса по всем углам вращения.

Ошибка определения угла крена боеприпаса

Ошибка определения угла крена равна ошибке определения угла вращения по формуле (5)

$$\delta\varphi = \delta\omega \cdot t + \delta\theta. \quad (9)$$

Для грубой оценки ошибки рассмотрим в выборке всего лишь два элемента (первый и последний), отстоящих друг от друга на временном интервале, равном $2 \cdot T_{\text{кадр}}$. На основании уравнений (6), (7) получим

$$\delta\omega = \frac{|\delta\beta_1| + |\delta\beta_N|}{2 \cdot T_{\text{кадр}}} = \frac{\delta\beta}{T_{\text{кадр}}}, \quad (10)$$

$$\delta\theta = \delta\beta. \quad (11)$$



Если экстраполировать вращение на время $T_{\text{кадр}}$, то ошибка определения прогнозируемого угла вращения (крена) для формирования команды управления будет равна

$$\delta\varphi = \delta\omega \cdot t + \delta\theta = \delta\beta / T_{\text{кадр}} \cdot T_{\text{кадр}} + \delta\beta = 2 \cdot \delta\beta = 0,06 \text{ рад} = 3,44^\circ < 4^\circ. \quad (13)$$

Таким образом, ошибка определения угла крена по измеряемой величине x не более $1,72^\circ$, а ошибка определения прогнозируемого угла крена для формирования команды управления будет не более 4° .

С учетом усреднения по N элементам выборки с помощью уравнений (6) и (7) величины ω и θ будут определены с гораздо большей точностью, а следовательно, и экстраполяция угла вращения φ (крена α) будет более точной.

Для уменьшения ошибки определения угла крена оптический блок каждого фотоприемного устройства должен включать бленду, ограничивающую засветку фоновым и солнечным излучением, интерференционный фильтр, поляризатор и фотодиод. Нелинейности фотодиодов следует компенсировать при настройке путем введения в процессор корректирующих данных. Также необходимо, чтобы информационное поле было построено с использованием излучения с высокой степенью поляризации.

Эксперимент

С целью подтверждения возможности практического изготовления фотоприемного устройства с реальным поляризатором излучения и подтверждения рассчитанной ошибки измерения угла были проведены испытания макета устройства при использовании непрерывного лазера с плоско поляризованным излучением с длиной волны излучения 1064 нм с контрастом более 100:1. В эксперименте использовался поляризатор из двулучепреломляющего кристалла с пространственным разнесением лучей ортогональной поляризации. Поляризатор устанавливался во вращающуюся оправу. Цена делений лимба оправы равна $0,25^\circ$. За поляризатором в одном из лучей устанавливался измеритель мощности излучения фирмы OPHIR.

Вращением лимба оправы поляризатора добивались максимального пропускания

излучения в выбранном луче поляризатора. Это положение поляризатора принимали за нулевой угол, от которого в дальнейшем вели отсчет угла вращения поляризатора (величина β в таблице 2). По формуле (1) вычисляли величину ожидаемой относительной мощности поляризованного излучения в выбранном луче для установленного угла β (величина x в таблице 2). Экспериментально определенную мощность излучения в выбранном луче поляризатора при угле β делим на мощность излучения, полученную при нулевом угле (величина $x_{\text{Эксп}}$ в таблице 2). По формуле (2) вычисляли величину $\beta_{\text{Эксп}}$ для каждого $x_{\text{Эксп}}$. В таблице 2 также приведены отклонения δx , $\delta\beta$ экспериментальных значений $x_{\text{Эксп}}$, $\beta_{\text{Эксп}}$ от теоретических x , β .

Эксперименты показали, что в диапазоне изменения углов $\beta \in [10^\circ, 80^\circ]$ ошибка определения углов $\delta\beta$ не превышает $1,64^\circ$ градуса, или $0,029$ рад, а ошибка δx не превышает $0,01$ (табл. 2). Оценка по формуле (4) для диапазона $\beta \in [10^\circ, 80^\circ]$ дает величину ошибки $\delta\beta = 0,03$ рад ($1,72^\circ$). Экспериментальные значения ошибок находятся в соответствии с теоретическими оценками. Это подтверждает нашу методику расчета ошибки определения угла крена.

В процессе натурных экспериментов предложенная методика может быть упрощена и оптимизирована. Основное требование – это привязка измеряемых данных к соответствующим четвертям окружности на начальном этапе.

Особенность предложенной методики заключается в том, что вращательная ориентация боеприпаса определяется на уже летящем боеприпасе спустя пол- либо один оборот вращения, в отличие от гироскопической ориентации, которая устанавливается на старте. Поскольку на своем пути боеприпас совершает сотни оборотов, то это не имеет значения.

Выводы

Аппаратура измерения угла крена, которая содержит два фотоприемных устройства с одинаковой чувствительностью, один из которых имеет поляризатор лазерного излучения, может быть использована для измерения текущего угла крена вращающегося боеприпаса. Ошибка определения прогнозируемого для выдачи



Таблица 2

Экспериментальные результаты

β , град	x	$x_{\text{Эксп}}$	$\beta_{\text{Эксп}}$, град	$\delta x = x_{\text{Эксп}} - x$	$\delta \beta = \beta_{\text{Эксп}} - \beta$, град	$\delta \beta = \beta_{\text{Эксп}} - \beta$, рад
10	0,970	0,979	8,363	0,009	-1,637	-0,029
15	0,933	0,941	14,056	0,008	-0,944	-0,016
20	0,883	0,893	19,091	0,010	-0,909	-0,016
25	0,821	0,828	24,484	0,007	-0,516	-0,009
30	0,750	0,741	30,592	-0,009	0,592	0,010
35	0,671	0,681	34,388	0,010	-0,612	-0,011
40	0,587	0,584	40,159	-0,003	0,159	0,003
45	0,500	0,507	44,612	0,007	-0,388	-0,007
50	0,413	0,415	49,921	0,001	-0,079	-0,001
55	0,329	0,331	54,894	0,002	-0,106	-0,002
60	0,250	0,240	60,666	-0,010	0,666	0,012
65	0,179	0,175	65,261	-0,003	0,261	0,005
70	0,117	0,113	70,330	-0,004	0,330	0,006
75	0,067	0,071	74,581	0,004	-0,419	-0,007
80	0,030	0,036	79,045	0,006	-0,955	-0,017

команды управления угла крена α не более 4° при использовании измерений относительной мощности поляризованного излучения в диапазоне $x_i \in [0,03, 0,97]$ ($\beta \in [10^\circ, 80^\circ]$). Экспериментально проверено, что в диапазоне $\beta \in [10^\circ, 80^\circ]$ ошибка определения угла крена не превышает $1,64^\circ$, или $0,029$ рад, что соответствует расчетам ($1,72^\circ$, или $0,03$ рад). Показано, что, используя поляризационные характеристики лазерного излучения информационного поля лазерно-лучевой системы телеориентации боеприпаса, возможно определение угла крена боеприпаса. Это позволяет обеспечить управление вращающегося боеприпаса даже в тех случаях, когда применение других приборов ориентации невозможно.

Таким образом, с помощью небольшой доработки существующих систем управления вращающихся боеприпасов: заменой гироскопа на два фотоприемных устройства (фотодиода) с одним поляризатором можно определять прогнозируемый для выдачи команды управления угол крена боеприпаса с ошибкой не более 4° .

Полученные в работе результаты имеют практическое значение для внедрения в системы лазерно-лучевой ориентации с целью упрощения и удешевления систем управления, не снижая их точностных характеристик.

В качестве примера возможного использования поляризованного излучения для измерения угла крена может быть рассмотрена лазерно-лучевая система телеориентации разработки АО «ГРПЗ» [4], основанная на формировании передающим устройством светового раstra (информационного поля) с пространственно-кодированными направлениями, центр которого совпадает с линией визирования цели.

Список литературы

1. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов (баллистических и зенитных ракет). М.: «Высшая школа», 1976. С. 236–238.
2. Гусев А. В., Морозов В. И., Недосекин И. А., Минаков В. М., Тарасов В. И. Способ управления по лучу вращающейся по крену ракетой и управляемая по лучу вращающаяся по крену ракета. Описание изобретения к патенту № 2460966 от 14.03.2011.
3. Костяшкин Л. Н., Бондаренко Д. А., Скотников И. Н. Лазерно-лучевая телеориентация управляемого оружия // Информационно-аналитический журнал «Радиоэлектронные технологии». 2016. № 3. С. 54–57.
4. Костяшкин Л. Н., Блохин А. Н., Скотников И. Н. Оптико-электронные и лазерные



системы для ЗРК малого и среднего радиуса действия // Информационно-аналитический

журнал «Радиоэлектронные технологии». 2017. № 5. С. 32–37.

Об авторах

Ильичев Михаил Михайлович – начальник направления – заместитель главного конструктора по лазерной технике акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», г. Москва, Российская Федерация.

Область интересов: лазерная техника, оптико-электронные устройства, схемотехника.

Комраков Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, инженер 1 категории акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», г. Москва, Российская Федерация.

Область интересов: электроника.

Лысенко Сергей Леонидович – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», г. Москва, Российская Федерация.

Область интересов: лазерная техника, оптико-электронные устройства.

Мешчеряков Михаил Александрович – и. о. начальника отдела «Разработки лазерной техники» акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», г. Москва, Российская Федерация.

Область интересов: лазерная техника, оптико-электронные устройства.

Семенов Александр Васильевич – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер акционерного общества «Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана», г. Москва, Российская Федерация.

Область интересов: лазерная техника, оптико-электронные устройства.

A method of measurement of the projectile roll angle using the radiation polarization of the information field of a laser beam television guidance system

Ilichev M. M., Komrakov D. V., Lysenko S. L., Meshcheryakov M. A., Semenov A. V.

Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow

The polarization of laser radiation of the control link information field is proposed to determine the actual roll angle of a laser-guided projectile. The roll angle of a projectile relative to the plane of laser radiation polarization can be determined with the help of a photodetector with a polariser, using the formula derived from the Malus law. In a laser beam television guidance system, the polarized laser beam is scanned in the space using an acousto-optic deflector. A photodetector receives the laser beam several times per a single half-frame of pitch scanning followed by a half-frame of course scanning. Each time the beam is received by a photodetector, its signal is processed to determine the roll angle. Series of roll angle measurements allow to calculate the time when the roll angle matches the angle required for sending a flight trajectory correction command. A roll angle computation algorithm is developed. The error of the method is estimated. The method allows to determine the actual roll angle of a spinning projectile with an accuracy of around 4°. The proposed method is tested experimentally.

Keywords: acousto-optic deflector, projectile, Malus law, information field, laser radiation, laser beam television guidance system, radiation polarization, roll angle, photodetector.



Information about the authors

Ilichev Mikhail Milkhailovich – Chief of Branch – Deputy Chief Designer for Laser Engineering, Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: laser engineering, optoelectronic devices, circuit design.

Komrakov Dmitry Vyacheslavovich – Candidate of Engineering Sciences, Design Engineer of the 1st category, Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: electronics.

Lysenko Sergey Leonidovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lead Engineer, Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: laser engineering, optoelectronic devices.

Meshcheryakov Mikhail Aleksandrovich – Acting Head of “Laser Engineering and Development” Department, Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: laser engineering, optoelectronic devices.

Semenov Aleksandr Vasilyevich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Engineer, Joint Stock Company “Nudelman Precision Engineering Design Bureau”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: laser engineering, optoelectronic devices.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-29-35>

УДК 629.7.036.54

Использование внутрисопловых интерцепторов для управления вектором тяги

К. О. Тищенко, Н. А. Брыков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Один из способов улучшить маневренность летательных аппаратов – управление вектором тяги сопла. Тяга сопла может регулироваться внутрисопловыми интерцепторами – устройствами различной формы, выдвигающимися в сопловой канал из его стенок. Интерцепторы воздействуют на поток в сопловом канале, перераспределяют давление на его стенках для отклонения вектора тяги от осевого направления. В рамках работы рассматривались управляющие устройства в форме рампы и в форме пластины, выдвигающиеся из стенок сопла. Произведен анализ картин течения газа по сопловому каналу с органами управления, получены их аэродинамические характеристики.

Ключевые слова: вектор тяги, сопловой канал, пластинчатый интерцептор, ракетный двигатель, течение газа

Для цитирования: Тищенко К. О., Брыков Н. А. Использование внутрисопловых интерцепторов для управления вектором тяги // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 29–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-29-35>

For citation: Tishchenko K. O., Brykov N. A. Using nozzle interceptors for thrust vector control // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 29–35. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-29-35>

Поступила 16.01.2023 Отрецензирована 27.01.2023 Одобрена 27.02.2023 Опубликовано 14.06.2023

Введение

Управление летательным аппаратом может осуществляться аэродинамическими и газодинамическими способами [1]. Аэродинамические органы управления устанавливаются на наружной поверхности корпуса летательного аппарата и взаимодействуют с набегающим потоком. Газодинамические органы управления взаимодействуют с продуктами сгорания топлива – они устанавливаются на срезе сопла или внутри него и изменяют силу тяги сопла двигателя. К таким способам управления тягой относятся вдув газа [8] или впрыск жидкости в проточную часть сопла, применение поворотных сопел, сопловых насадков и газовых рулей. Перечисленные традиционные способы управления тягой имеют ряд недостатков.

Для вдува газа требуется организация хранения инжектируемого рабочего тела на борту, его запас ограничен. Для поворотных сопел и насадков требуются сложные системы подвесов и приводов. Эти системы имеют большой вес и уменьшают дальность полета.

Сопловые интерцепторы

Один из газодинамических способов управления вектором тяги – применение внутрисопловых интерцепторов [3, 6]. Эти устройства имеют простую конструкцию, могут прятаться в стенках соплового канала и не оказывать влияние на поток, когда управление не требуется. Применение интерцепторов в качестве органов управления предлагается как альтернативный способ управления вектором тяги ракетных двигателей, способный заменить традиционные способы [4, 5].

Отклоняющиеся от стенки сопла ramпы или щитки [7] являются разновидностями сопловых интерцепторов. Когда орган управления не нужен, он примыкает к внутренней стенке соплового канала, повторяя ее форму. Когда требуется внесение изменений в траекторию полета, устройство выдвигается в поток и поворачивает вектор тяги.

Применение интерцепторов внутри сопел целесообразно из-за простоты устройства такой системы. Орган управления легко привести в движение: устройство изменяет свое положение за счет механического или гидравлического привода, отсутствует необходимость нести на борту баки с рабочим телом для вдува или сложную систему шарниров для изменения геометрии проточной части. Эти преимущества делают летательный аппарат более конкурентоспособным за счет снижения его веса и увеличения

дальности полета на том же количестве топлива [2].

Варианты развития картины течения в сопловом канале по мере отклонения пластинчатого интерцептора от стенки показаны на рисунке 1. Когда угол отклонения мал, картина течения соответствует случаю на рисунке 1а. В этом случае отсутствует отрыв потока перед органом управления, отрывная зона за интерцептором не велика. При дальнейшем отклонении пластины отрывная зона появляется и перед препятствием. Отрывная зона позади щитка увеличивается и место присоединения потока к стенке приближается к срезу сопла, как показано на рисунке 1б. При достижении некоторого критического угла отклонения зона 4 сливается с окружающей средой, образуя зону 9 с обратным течением 8, как показано на рисунках 1в и г [1].

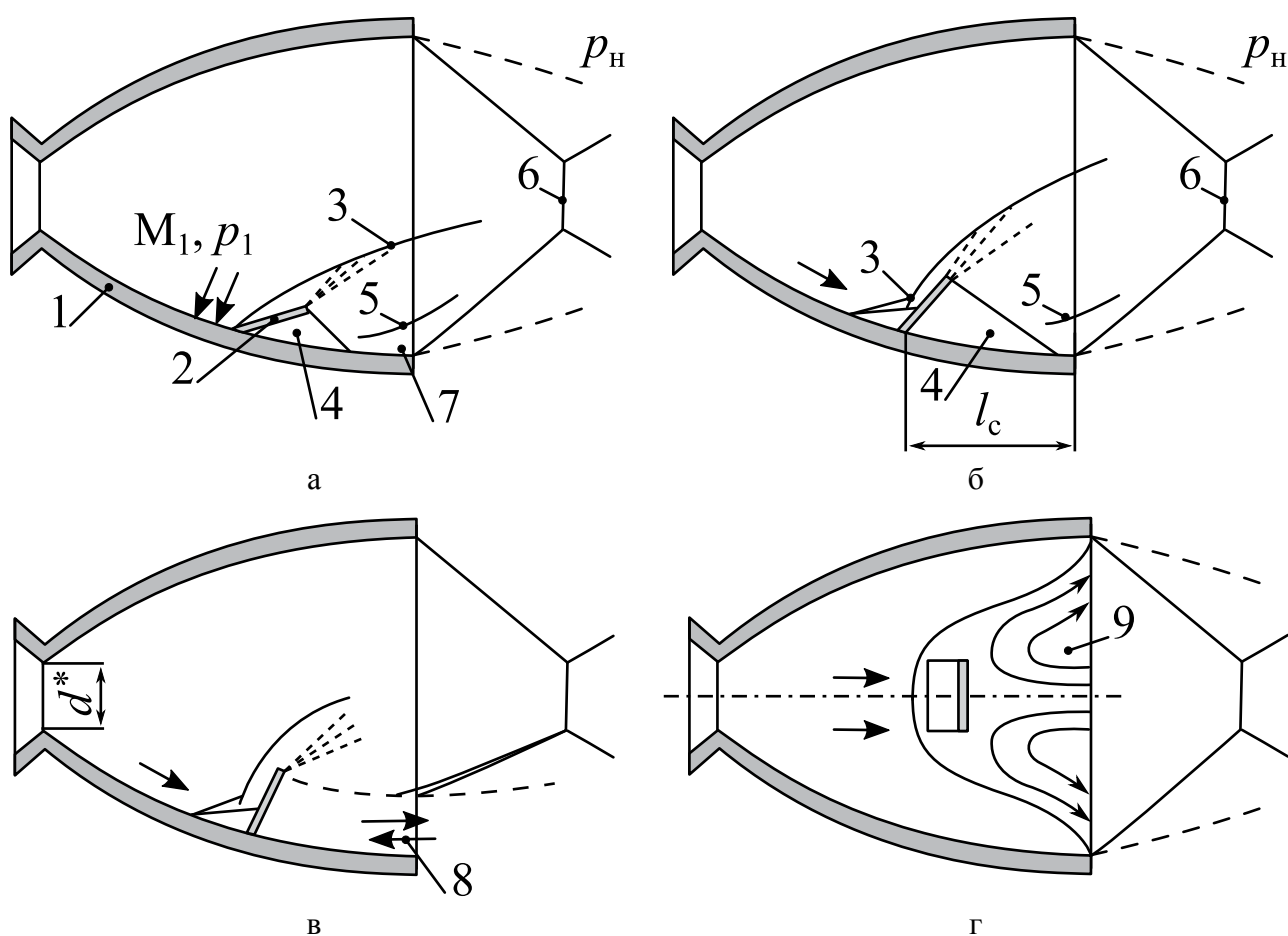


Рис. 1. Варианты структуры обтекания интерцептора в форме отклоняющейся пластины: 1 – сопло, 2 – управляющий щиток, 3 – скачок уплотнения перед щитком, 4 – зона пониженного давления, 5 – скачок уплотнения за интерцептором, 6 – система скачков уплотнения за соплом, 7 – область присоединения, 8 – возвратное течение, 9 – зона возвратного течения. Варианты а–г – пояснения в тексте



Применение интерцепторов для управления тягой сопла имеет и некоторые недостатки. Орган управления подвержен перегреву и эрозии содержащимися в топливе металлическими частицами. Проблема может быть решена использованием современных прочных термостойких композитных материалов для изготовления органа управления. Также защиту от частиц может обеспечить вдув воздуха с лицевой поверхности интерцептора или вдув перед ней из стенок сопла. При этом количество носимого на борту рабочего тела требуется гораздо меньшее, чем требовалось бы для управления тягой только за счет вдува. Еще одним недостатком является разрушение холодного пристеночного слоя, требуемого для охлаждения стенок сопла. Таким соплам требуется дополнительная система охлаждения стенок в горячей зоне.

Постановка задачи

Отклоняющееся от стенки сопла тело может иметь разные геометрические формы. В работе рассматриваются интерцепторы в форме рампы и интерцепторы в форме щитка, выдвигающиеся из стенки канала. Изображение этих органов управления в сопловых каналах приведено на рисунке 2. Преимущества рампы в ее большей жесткости, в возможности полезного использования ее внутреннего пространства; туда могут быть подведены трубки с охлаждающей средой, с легкостью может быть организован впрыск вспомогательного рабочего тела с лицевой поверхности рампы. Преимущества щиткового интерцептора

в его компактности – он может быть размещен в тонкой стенке сопла. Пневматический или гидравлический привод для приведения его в движение может воздействовать на погруженную в стенку сопла часть пластины и приводить ее в движение. Герметизация внутривнутренней камеры может осуществляться термостойкими эластичными вставками, помещенными между неподвижной стенкой сопла и пластиной. Целью работы является сравнение влияния двух типов интерцепторов на тягу сопла методами трехмерного CFD-моделирования. С целью возможной дальнейшей верификации результатов расчетов экспериментом в условиях лаборатории в качестве рабочего тела рассматривается воздух при температуре 300 К.

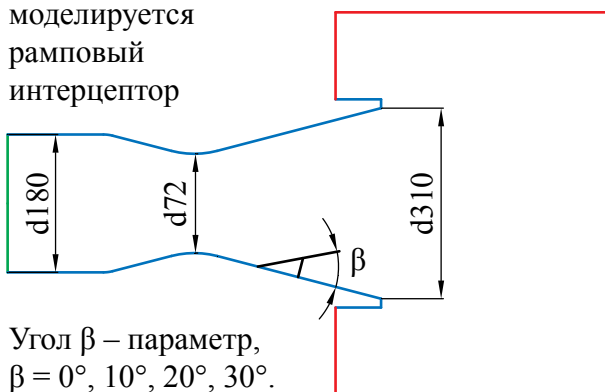
В моделировании будем рассматривать произвольное сопло ракетного двигателя. Геометрия с основными размерами не в масштабе, а также геометрические формы рассматриваемых интерцепторов показаны на рисунке 2. Давление в камере сгорания двигателя 200 ата, температура 300 К. Рабочее тело – воздух со свойствами совершенного газа. Обтекание исследуется при разных углах отклонения интерцептора.

Математическая модель

Моделирование выполняется CFD-методами на структурированной гексаэдрической вычислительной сетке [9] в среде современного вычислительного программного пакета. Сеточная модель для задачи обтекания пластинчатого интерцептора изображена на рисунке 3.

Случай 1:

моделируется
рамповый
интерцептор



Случай 2:

моделируется
интерцептор-
щиток

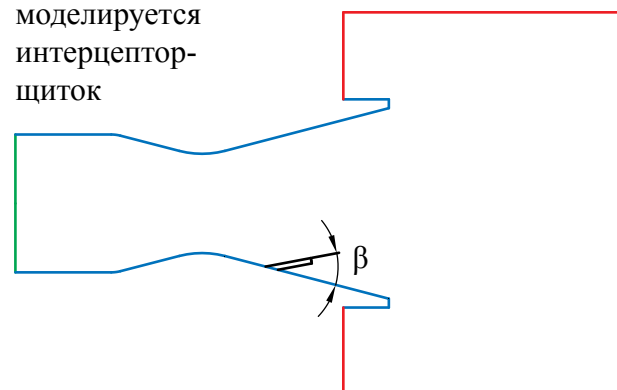


Рис. 2. Модели с рампой и с щитком

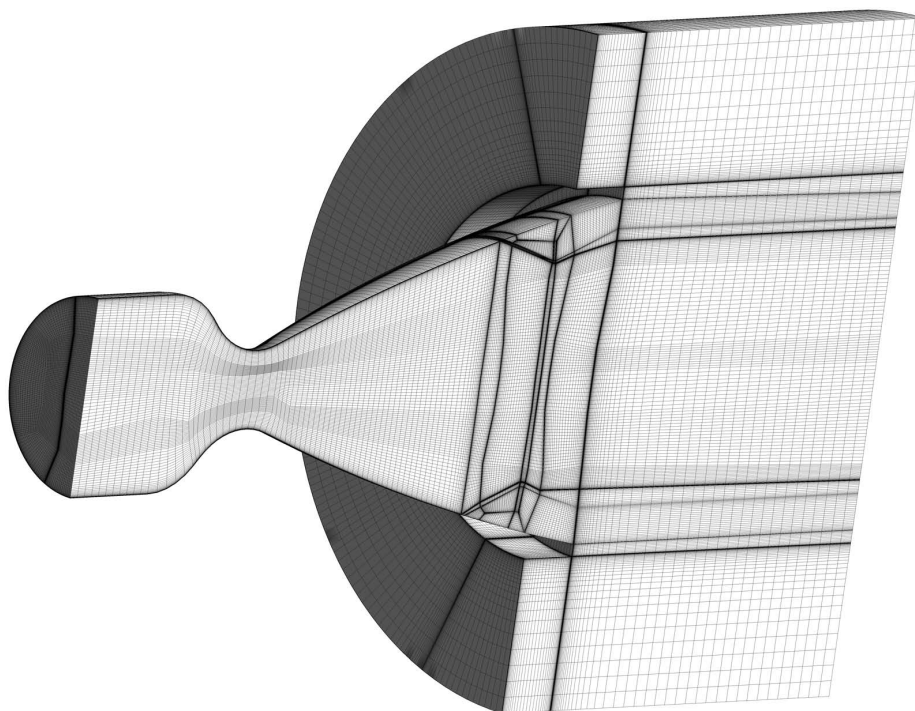


Рис. 3. Блочная структурированная сетка задачи с пластинчатым интерцептором

Решается система уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Система замыкается уравнениями модели турбулентности $k-\omega$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) &= -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}); \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) &= -\nabla(k_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \bar{v})); \\ p &= \rho RT. \end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность среды, v – скорость, $\bar{\tau}$ – тензор напряжений, E – внутренняя энергия, p – давление, R – газовая постоянная, T – температура, k_{eff} – эффективная теплопроводность, определяется $k+k_t$, то есть сумма теплопроводности среды и теплопроводности, определяемой моделью турбулентности.

Результаты исследования

В результате расчетов получены данные по тяговым характеристикам сопел с интерцепторами двух типов. При моделировании фиксировались значения силы тяги в проекции на геометрическую ось сопла и в проекции на перпендикулярную ей ось, соответствующую направлению поворота вектора тяги. Картины обтекания пластины

и ramпы изображены на рисунке 4а и б соответственно.

Картины течения в обоих случаях получились похожие, но есть разница в зонах обратного затекания. На пластину и на стенку сопла, к которой она примыкает, действует давление зоны обратного затекания, близкое к атмосферному. В случае ramпы это давление приходится на стенку и на тыльную поверхность интерцептора.

На рисунках 5 и 6 представлены зависимости осевой и боковой компонент силы тяги от угла отклонения интерцептора для рассматриваемых случаев. Анализ полученных результатов показывает, что управляющее усилие практически нисколько не различается у обоих органов управления, а осевая тяга при обтекании пластины теряется ощутимо сильнее, чем при обтекании ramпы.

Rамповый интерцептор показал свою большую эффективность как орган управления. В совокупности с остальными преимуществами такая форма является более предпочтительной для использования в соплах. Пластинчатый интерцептор применим на соплах с тонкими стенками в сверхзвуковой части канала, где его конкурент не может использоваться по конструктивным причинам.

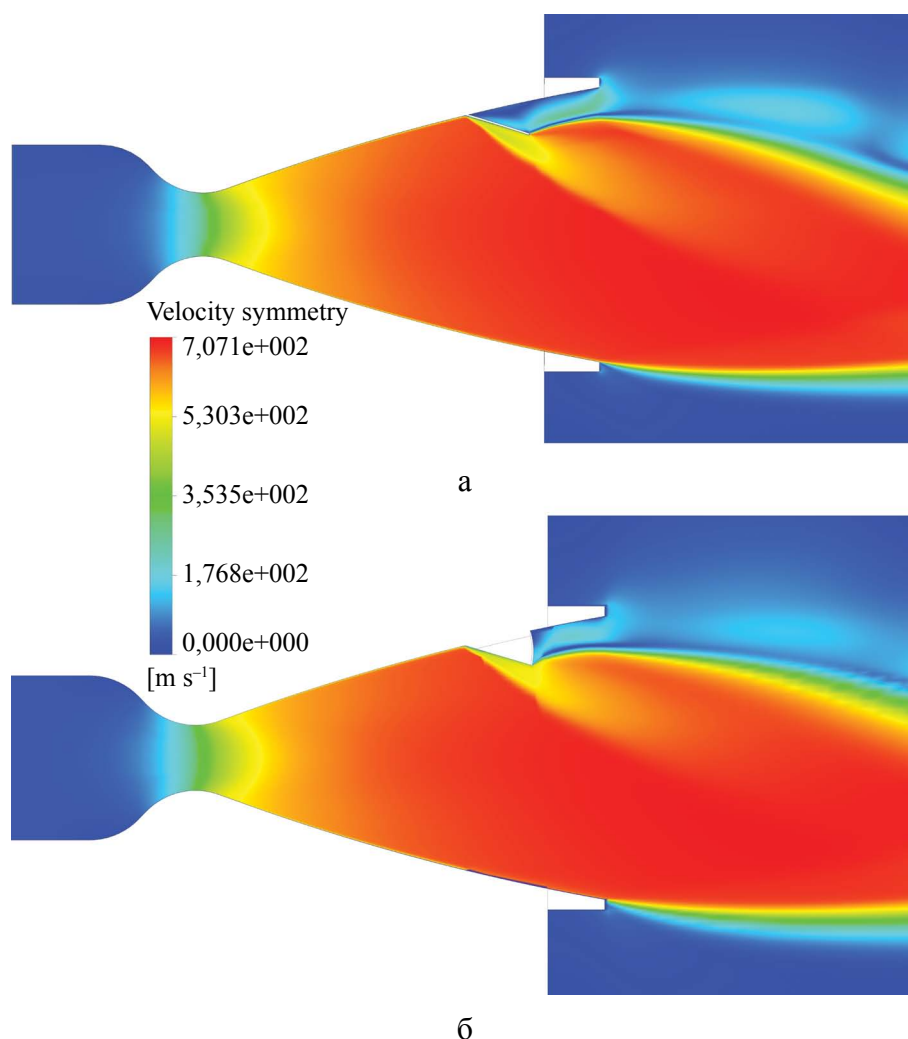


Рис. 4. Картина течения в сопловом канале. Распределение скорости на плоскости симметрии: а) обтекание пластины, б) обтекание ramпы

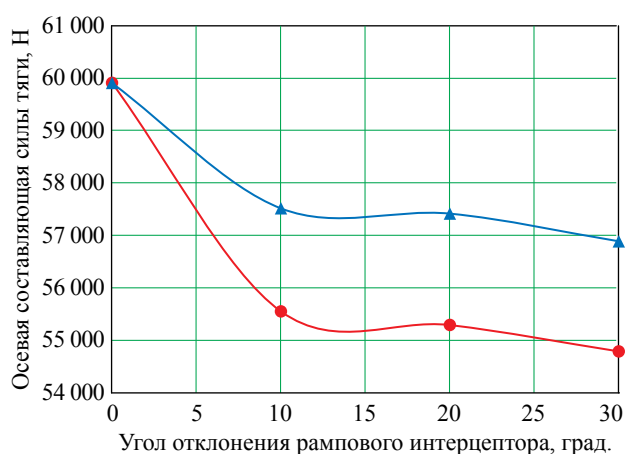


Рис. 5. Зависимость осевой составляющей силы тяги от угла отклонения интерцептора
— осевая тяга ramпы; — осевая тяга пластины

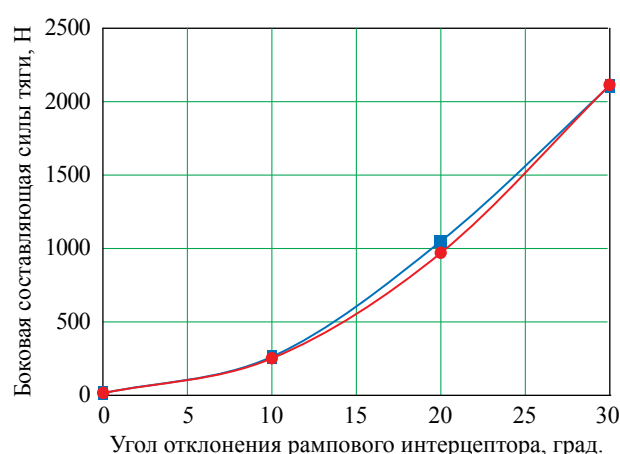


Рис. 6. Зависимость боковой составляющей силы тяги от угла отклонения интерцептора
— боковая тяга ramпы; — боковая тяга пластины

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00100, <https://rscf.ru/project/21-79-00100/>

Список литературы

1. Калугин В. Т. Аэродинамика органов управления полетом летательных аппаратов.



- М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 688 с.
2. Tiran W., Cavalleri R., Readey H. Thrust vector control using movable probes // 28th Joint Propulsion Conference, AIAA 90-0562, 1990. DOI: 10.2514/6.1990-562
 3. Тищенко К. О., Брыков Н. А., Беляева А. С. Параметрическое исследование влияния размещения и высоты стержневого интерцептора на характеристики сопла реактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 52–58. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-52-58
 4. Tiran W., Cavalleri R. CFD evaluation of an advanced thrust vector control concept // 26th Joint Propulsion Conference, AIAA Paper 90-1900, 1990. DOI: 10.2514/6.1990-1900
 5. Tiran W., Cavalleri R., Lewis L. Experimental and theoretical comparison of the probe thrust vector control concept // 27th Joint Propulsion Conference, AIAA 91-2476, 1991. DOI: 10.2514/6.1991-2476
 6. Srinivas L., Sridhar B.T.N. Experimental study of internal forces and moments generated by strut injection in a supersonic cross-flow in a C-D nozzle // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2021. Vol. 43. No 84. DOI: 10.1007/s40430-020-02771-y
 7. Каун Ю. В. Численное моделирование процессов, сопровождающих работу системы управления вектором тяги // Восьмые Уткинские чтения. Труды Общероссийской научно-технической конференции. 2019. С. 228–233.
 8. Волков К. Н., Емельянов В. Н., Яковчук М. С. Многопараметрическая оптимизация органов управления вектором тяги, основанных на вдуве струи газа в сверхзвуковую часть сопла // Выч. мет. программирование. 2018. Т. 19. Вып. 2. С. 158–172.
 9. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Реализация лагранжевого подхода к описанию течений газа с частицами на неструктурированных сетках // Выч. мет. программирование. 2008. Т. 9. Вып. 1. С. 19–33.

Об авторах

Тищенко Кирилл Олегович – аспирант кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: численное моделирование массообменных процессов в сопловых течениях.

Брыков Никита Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Область научных интересов: численное моделирование процессов внутренней газодинамики энергоустановок.



Using nozzle interceptors for thrust vector control

Tishchenko K. O., Brykov N. A.

D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation

Nozzle thrust vector control is one of the methods that allow to improve aircraft manoeuvrability. The nozzle thrust is controllable with the help of nozzle interceptors – devices of various shape that extend into the nozzle channel from its walls. Interceptors have a certain effect on the flow in the nozzle channel, causing uneven distribution of pressure along the walls of the nozzle channel in order to deflect the thrust vector from the axial direction. In this paper, ramp-shaped and plate-shaped interceptors extending from the nozzle walls were considered. The patterns of the gas flow in the nozzle channel with interceptors are analyzed and their aerodynamic characteristics are determined.

Keywords: thrust vector, nozzle channel, plate-shaped interceptor, rocket engine, gas flow

Information about the authors

Tishchenko Kirill Olegovich – Post-Graduate Student, Department of “Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering”, D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: numerical modelling of mass exchange processes in nozzle flows.

Brykov Nikita Aleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of “Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering”, D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, Russian Federation.

Science research interests: numerical modelling of internal fluid dynamics processes of power plants.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-36-43>

УДК 621.45

Выбор конструктивной схемы газотурбинной установки на начальном этапе проектирования

В. И. Кузнецов¹, Д. Д. Шпаковский²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация

² Филиал Публичного акционерного общества «ОДК – Сатурн» – Омское моторостроительное конструкторское бюро, Омск, Российская Федерация

Рассмотрен вопрос применения методики термодинамического расчета с определением КПД компрессора и турбины на основе статистических данных по отдельным ступеням для оценочного расчета удельного расхода топлива газотурбинной установки (ГТУ). Предлагаемая методика на начальном этапе проектирования ГТУ позволяет сделать обоснованный выбор конструктивной схемы в зависимости от потребной эквивалентной мощности.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, удельный расход топлива, термодинамический расчет

Для цитирования: Кузнецов В. И., Шпаковский Д. Д. Выбор конструктивной схемы газотурбинной установки на начальном этапе проектирования // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 36–43. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-36-43>

For citation: Kuznetsov V. I., Shpakovsky D. D. Selection of the gas turbine power plant design arrangement at the initial design stage // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2023. No. 2. P. 36–43. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-36-43>

Поступила 17.01.2023 Отрецензирована 08.02.2023 Одобрена 27.02.2023 Опубликована 14.06.2023

В состав бортовых электросистем самоходных артиллерийских установок (САУ), тактических ракетных систем и зенитных ракетных комплексов входят ГТУ со встроенными электрогенераторами. В частности, газотурбинная установка ГТА-18 мощностью в 18 кВт установлена на САУ «Мста-С», а электроснабжение ЗРК «Бук» обеспечивается энергетической установкой на базе газотурбинного двигателя ГТД-5(М) с номинальной мощностью на выходном валу 29,4 кВт. В большинстве эксплуатируемых в настоящее время ГТУ в качестве двигателя используется одновальный газотурбинный двигатель (ГТД). Двухвальные ГТД со свободной турбиной применяются в случаях, когда располагаемая мощность $N_{\text{ЭКВ}} > 65$ кВт.

У каждой из конструктивных схем ГТД есть свои преимущества и недостатки. Одновальный ГТД имеет более простую конструкцию, а значит – лучшие массогабаритные показатели и обладает большей надежностью в сравнении с двухвальной схемой. Кроме того, спроектировать свободную турбину с расходом газа $G_T < 0,5$ кг/с и мощностью на валу $N_{\text{ЭКВ}} < 65$ кВт зачастую не представляется возможным. В настоящее время отмечается устойчивая тенденция к повышению требований к располагаемой мощности и экономичности модернизируемых и вновь проектируемых ГТУ. Однако для одновальных ГТД характерен повышенный удельный расход топлива в сравнении с двухвальным ГТД со свободной турбиной, который определяется следующими конструктивными особенностями:

© Кузнецов В. И., Шпаковский Д. Д., 2023



- располагаемый теплоперепад не полностью срабатывается турбиной компрессора, и с отработанными газами, имеющими избыточное давление и высокую температуру, в окружающую среду выбрасывается значительная часть энергии;

- генератор электрического тока соединен с валом газогенератора через двухступенчатый редуктор, что предопределяет большой момент инерции на валу газогенератора и длительный запуск с нерасчетным повышенным расходом топлива;

- необходимость в двухступенчатом редукторе для согласования частоты вращения вала газогенератора и вала генератора электрического тока, что предопределяет высокие механические потери энергии.

Перечисленные выше недостатки одновального ГТД возможно устранить при переходе к турбовальной схеме. С этой целью за турбиной компрессора устанавливается одноступенчатая свободная турбина с коротким переходным каналом. Между турбиной компрессора и свободной турбиной отсутствует механическая связь, а вал свободной турбины соединяется с валом генератора электрического тока через редуктор. Наличие свободной турбины в турбовальной схеме позволяет практически полностью преобразовывать энергию газового потока в полезную механическую работу на выходном валу с малой величиной степени расширения в выходном патрубке при $\pi_C^* \leq 1,05$. Для рассматриваемых ГТД диапазон частот вращения турбокомпрессора составляет $n_{TK} = 54\,000\text{--}120\,000\text{ мин}^{-1}$. Меньшие значения n_{TK} соответствуют ГТД со свободной турбиной. Частота вращения вала свободной турбины может быть существенно ниже (на 30–40 %) частоты вращения газогенератора, что позволит вместо двухступенчатого редуктора применить одноступенчатый редуктор с малым передаточным числом или совсем отказаться от редуктора.

Таким образом, правильный выбор конструктивной схемы ГТД на начальном этапе проектирования коренным образом определяет уровень его технического совершенства. Для оценки уровня технического совершенства обычно используются два параметра:

эквивалентный расход топлива $C_{ЭКВ}$ и удельный вес двигателя $\gamma_{дв}$. Определение удельных параметров проектируемого ГТД начинается с термодинамического расчета исходного режима работы. Выбор термодинамических параметров, таких как температура газа в камере сгорания T_r^* , суммарная степень сжатия π_Σ^* , и последующий анализ зависимостей $C_{ЭКВ} = f(T_r^*, \pi_\Sigma^*, \dots)$ выполняется при постоянных значениях потерь и КПД узлов. Прямая аналитическая взаимосвязь параметров термодинамического цикла и КПД основных узлов для конкретного двигателя невозможна. В работах [1, 2] была рассмотрена возможность установления связи между параметрами T_r^* , π_Σ^* и максимально возможным КПД с целью определения минимально достижимого удельного расхода топлива. Основой метода является использование зависимостей максимально возможного политропного КПД ступени компрессора или турбины $\eta_{пол\,0}^{*max}$ от величины нагрузки на ступень, предварительно полученных на основе статистических данных, заимствованных из работ [3, 4] и других литературных источников. Далее выполняется расчет адиабатического КПД всего компрессора η_k^* или турбины η_t^* с использованием параметров термодинамического цикла.

В данном случае рассматривается возможность использовать методику, описанную в работах [1, 2], для решения задачи выбора конструктивной схемы ГТД на начальном этапе проектирования. Задача рассматривается применительно к «переходной» области, определяемой эквивалентной мощностью ГТД в диапазоне $N_{ЭКВ} = 40\text{--}80\text{ кВт}$. Вне данного диапазона выбор конструктивной схемы ГТД в большинстве случаев успешно может быть выполнен на основе предшествующего опыта проектирования. В данной задаче критерием, определяющим преимущество одной конструктивной схемы над другой, выбран эквивалентный расход топлива $C_{ЭКВ}$. Приведенный расход воздуха через компрессор $G_{в\,пр}$ выбран как дополнительный критерий, определяющий габаритно-массовые параметры двигателя, а при одинаковой располагаемой мощности – и удельный вес $\gamma_{дв}$. Примеры возможных конструктивных схем

ГТД представлены на рисунках 1а и 1б. На рисунке 1а показана принципиальная схема одновального ГТД, а на рисунке 1б принципиальная схема двухвального ГТД со свободной турбиной и выходным валом, соединяющимся через редуктор или напрямую с электрогенератором.. Все обозначенные на схеме элементы ГТД учитываются в последующих расчетах.

Различие с предшествующей работой [2] заключается в использовании среднестатистического политропного КПД ступени компрессора или турбины $\eta_{ПСТ}^*$ вместо максимально

возможной величины $\eta_{пол 0}^{*max}$. Величина $\eta_{пол 0}^{*max}$ показывает предельный уровень КПД ступени, который может быть достигнут при текущем научно-техническом уровне, а величина $\eta_{ПСТ}^*$ – некоторый усредненный уровень КПД, уже достигнутый в серийном производстве. Кроме того, компрессор и турбины в рассматриваемой задаче имеют одну ступень, что существенно упрощает процедуру расчета.

Исходными данными для определения КПД центробежного одноступенчатого компрессора являются: степень повышения

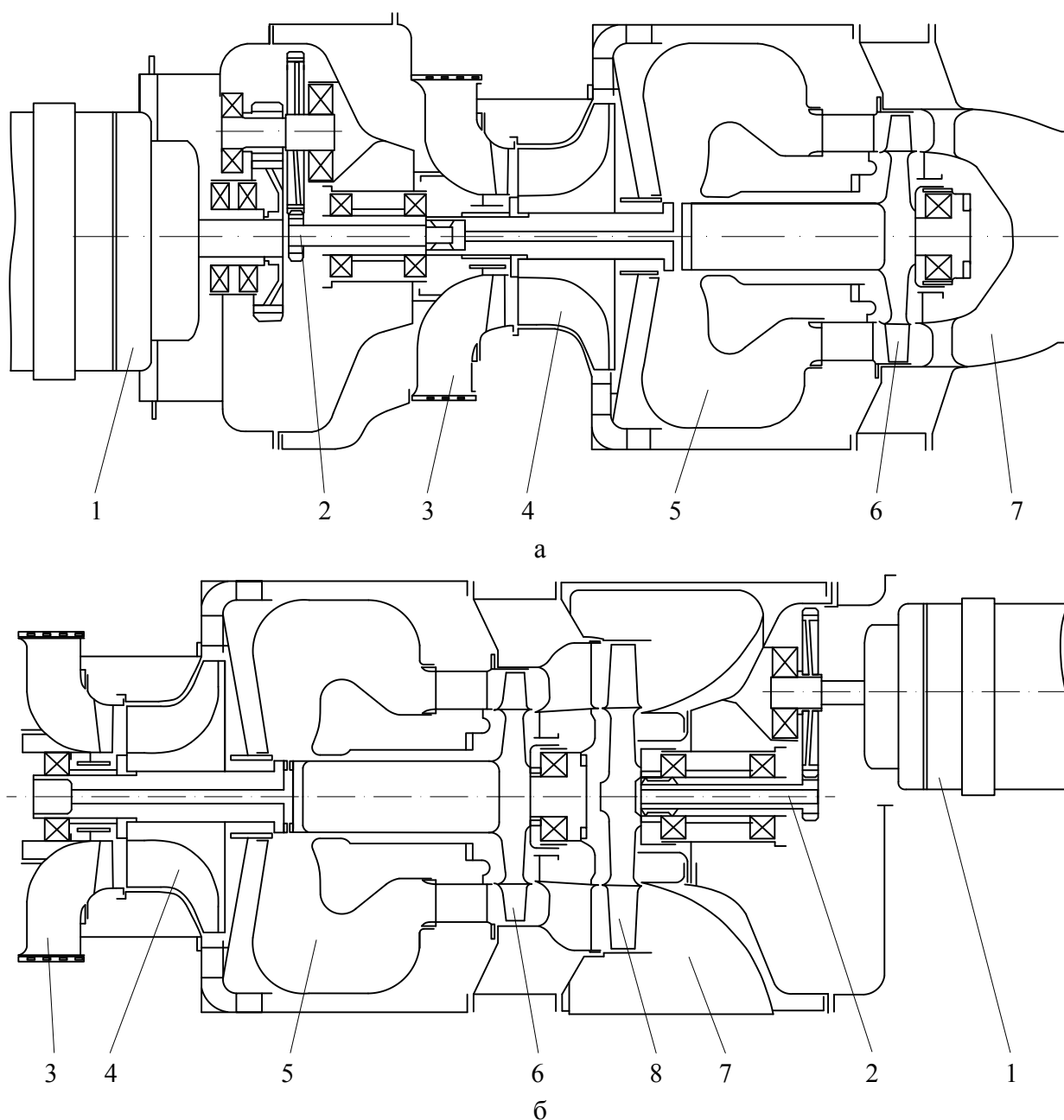


Рис. 1. Схемы ГТД: а) одновальная схема, б) двухвальная схема со свободной турбиной.
Обозначения: 1 – электрогенератор, 2 – редуктор, 3 – воздухозаборник, 4 – центробежный компрессор, 5 – камера сгорания, 6 – турбина компрессора, 7 – выпускной патрубок, 8 – свободная турбина



полного давления π_k^* , изменение энтальпии в компрессоре Δi_k^* и приведенный расход воздуха через ступень $G_{в.пр.}$. Политропный КПД ступени и поправка на политропный КПД определяются следующими зависимостями:

$$\eta_{пср}^* = f(\Delta i_{ст}^*), \Delta \eta_{п}^* = f(G_{в.пр.}). \quad (1)$$

Статистическая зависимость $\eta_{пср}^* = f(\Delta i_{ст}^*)$, представленная на рисунке 2, аппроксимировалась с помощью логарифмической регрессии на основе данных по однотипным существующим центробежным ступеням. В данном случае для одноступенчатого центробежного компрессора $\Delta i_{ст}^* = \Delta i_k^*$. Аналогичным образом на основе данных работы [5] определялась среднестатистическая величина снижения КПД $\Delta \eta_{п}^* = f(G_{в.пр.})$, представленная на рисунке 3. Поправка на политропный КПД $\Delta \eta_{п}^*$ учитывается при расходах воздуха $G_{в.пр.} < 10$ кг/с.

Политропный и адиабатический КПД центробежной ступени определяется зависимостями

$$\eta_{п}^* = \eta_{пср}^* - \Delta \eta_{п}^*, \eta_k^* = \frac{\pi_k^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\pi_k^{*\eta_{п}^* \frac{k-1}{k}} - 1}, \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты для воздуха.

Исходными данными для определения КПД турбины компрессора и свободной турбины являются: теплоперепад на ступени Δi_T^* , пропускная способность турбины A_T и степень понижения полного давления π_T^* . Политропный

КПД ступени турбины и поправка на политропный КПД определяются следующими зависимостями:

$$\eta_{пср}^* = f(\Delta i_{ст}^*), \Delta \eta_{п}^* = f(A_T). \quad (3)$$

Статистическая зависимость $\eta_{пср}^* = f(\Delta i_{ст}^*)$ также представлена на рисунке 2. В данном случае для одноступенчатой турбины компрессора $\Delta i_{ст}^* = \Delta i_{ТК}^*$, $A_T = A_G$, а для свободной турбины $\Delta i_{ст}^* = \Delta i_{ТС}^*$, $A_T = A_Z$. На основе данных работы [5] определялась среднестатистическая величина снижения КПД $\Delta \eta_{п}^* = f(A_T)$, представленная на рисунке 4. Поправка на политропный КПД $\Delta \eta_{п}^*$ учитывается при пропускной способности осевой турбины $A_T < 40 \text{ кг} \times \text{К}^{0,5} \text{ см}^2 / (\text{кгс} \times \text{с})$. Применительно к малогабаритным ГТД полагаем, что осевая турбина компрессора и свободная турбина имеют практически одинаковую конструкцию проточной части, поэтому величина $\Delta \eta_{п}^*$ для них описывается единой зависимостью.

Политропный и адиабатический КПД для ступени турбины определяется зависимостями

$$\eta_{п}^* = \eta_{пср}^* - \Delta \eta_{п}^*, \eta_T^* = \frac{1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k_T-1}{k_T}} \eta_{п}^*}}{1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{k_T-1}{k_T}}}}, \quad (4)$$

где k_T – показатель адиабаты для продуктов сгорания.

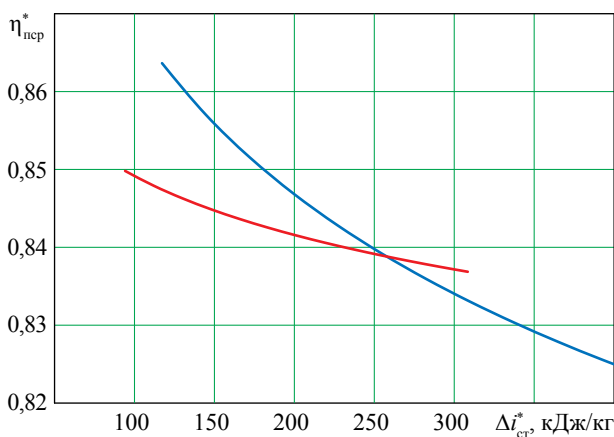


Рис. 2. Политропный КПД осевой турбины и центробежной ступени компрессора
— турбина; — центробежный компрессор

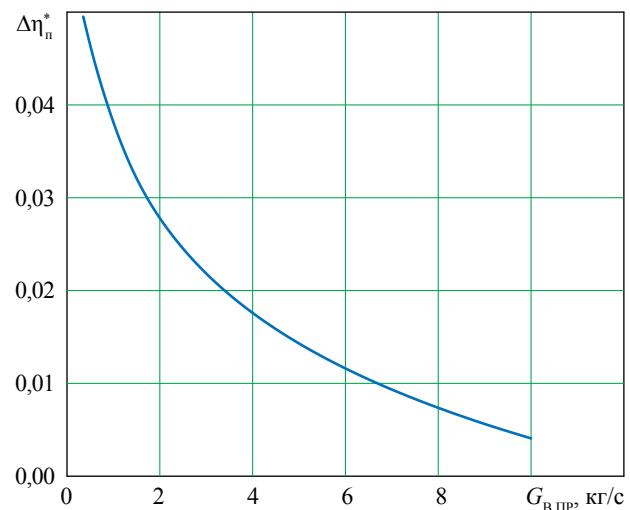


Рис. 3. Поправка на политропный КПД центробежной ступени компрессора



Расчет относительной величины отбора воздуха на охлаждение турбин выполнен по зависимости [5]

$$\Delta \bar{G}_{\text{охл}} = 0,001 \cdot T^* - 0,115, \quad (5)$$

где T^* – температура газового потока на входе в турбину компрессора $T^* = T_{\Gamma}^*$ или на входе в свободную турбину $T^* = T_Z^*$.

Механический КПД на валу компрессора, учитывающий, в том числе, отбор мощности на привод агрегатов масляной и топливной системы ГТУ, в данном случае был принят равным $\eta_m = 0,975$ с учетом данных [6]. Механический КПД редуктора задавался в диапазоне значений $\eta_{\text{ред}} = 0,97\text{--}0,98$ в зависимости от числа ступеней и передаваемой мощности. Влияние воздухозаборника учтено через потери полного давления, которые имеют малый интервал значений. Для коленообразного входного канала выбрано постоянное среднее значение $\sigma_{\text{вх}}^* = 0,97$.

Электромеханический КПД генератора электрического тока определяется по теоретической зависимости на рисунке 5, составленной по данным работы [7]. Зависимость используется для определения избыточной мощности на валу турбины компрессора или на валу свободной турбины при заданной электрической мощности генератора.

Рассмотренные выше процедуры определения КПД основных узлов ГТД используются как составные части термодинамического

расчета исходного режима двигателя, выполненные в виде отдельных подпрограмм. Методика термодинамического расчета исходного режима является общеизвестной, поэтому она исключается из рассмотрения. Расчет термодинамических функций для воздуха, топлива и продуктов сгорания построен на термодинамических таблицах отдельных веществ [8] и подробно рассмотрен в [9].

Для рассматриваемой методики расчета установлены следующие допущения и ограничения:

- процесс в двигателе рассматривается как термодинамически равновесный и адиабатический;
- приняты постоянные гидравлические потери по газозаборному тракту;
- область применения методики ограничивается малоразмерными ГТД малой мощности, используемыми для привода электрогенераторов.

Для оценки возможностей методики был выполнен ряд вариационных расчетов для одновального ГТД и ГТД со свободной турбиной в диапазоне значений эквивалентной мощности $N_{\text{ЭКВ}} = 20\text{--}90$ кВт. Расчеты выполнены для стандартных атмосферных условий на входе в ГТД $H = 0$, $M = 0$, $T_H = 288,15$ К. Диапазон варьируемых основных параметров термодинамического цикла выбран исходя из опыта проектирования рассматриваемых ГТД $\pi_K^* = 2\text{--}6$, $T_{\Gamma}^* = 900\text{--}1250$ К. Первая группа расчетов

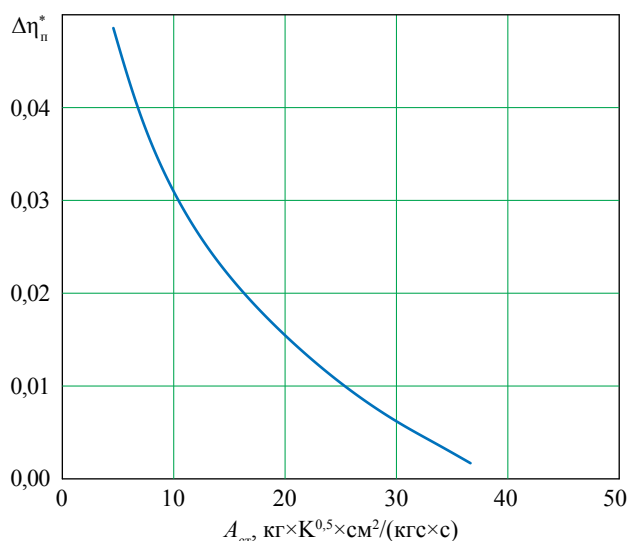


Рис. 4. Поправка на политропный КПД ступени турбины

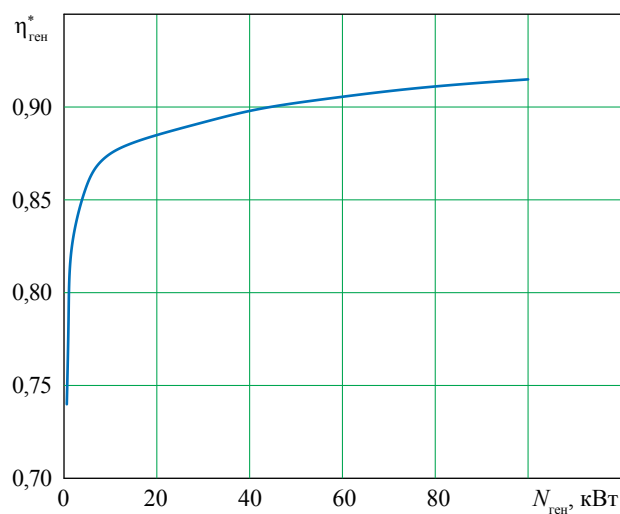


Рис. 5. Электромеханический КПД генератора электрического тока



была выполнена для номинальной мощности генератора $N_{ГЕН} = 20$ кВт. Результаты в виде зависимостей основных данных ГТД $C_{ЭКВ}$, $G_{В ПР}$ от задаваемых параметров термодинамического цикла π_K^* , $T_{Г}^*$ представлены на рисунках 6а и 6б. Полученные данные говорят о нецелесообразности создания ГТА со свободной турбиной при заданных параметрах по нескольким причинам. В зоне минимальных величин $C_{ЭКВ} < 0,57\text{--}0,65$ кг/(кВт×ч) при $\pi_K^* = 4\text{--}5,5$ и $T_{Г}^* = 1100\text{--}1150$ К получаемые значения составляют $G_{В ПР} = 0,20\text{--}0,26$ кг/с, что предопределяет малые размеры каналов проточной части ГВТ. Это приводит к сильному снижению расчетного КПД основных узлов и большим технологическим проблемам при их производстве. Высота канала лопаточного диффузора компрессора может быть менее 4 мм, а высота лопаток турбины компрессора менее 5–6 мм. При снижении температуры и увеличении расхода воздуха значения $C_{ЭКВ}$ увеличиваются до неприемлемо высоких значений. Разрабатываемый ГТД будет иметь низкую экономичность по топливу в сравнении с аналогами – одновальными ГТД без свободной турбины. Кроме того, с ростом $G_{В ПР}$ происходит снижение $\pi_{ТС}^*$ до величин менее 1,5, что приводит к проблемам при профилировании межлопаточного канала свободной турбины. Последующие расчеты были выполнены

для $N_{ГЕН} = 40\text{--}80$ кВт с целью определения минимальной величины его загрузки, при которой параметры $C_{ЭКВ}$, $G_{В ПР}$ и $\pi_{ТС}^*$ проектируемого ГТД имеют приемлемые значения. При значении $N_{ЭКВ} < 60$ кВт проектируемые ГТД со свободной турбиной имеют недостатки, описанные выше.

Из общего массива полученных данных выберем результаты расчетов, наиболее соответствующих текущей практике проектирования. Температура газов в камере сгорания для ГТД обычно выбирается $T_{Г}^* = 1150\text{--}1200$ К, чтобы получить приемлемую работу цикла, но при этом стараются исключить охлаждение соплового аппарата и рабочих лопаток турбины компрессора. Это позволяет упростить конструкцию, снизить стоимость ГТД и одновременно повысить назначенный ресурс горячей части. В нашем случае выбираем $T_{Г}^* = 1200$ К. Другим ограничением выберем условие максимума удельной работы на выходном валу ГТД $N_{уд} = N_{уд}^{max}$, которое эквивалентно минимуму по расходу воздуха и минимальным размерам проточной части ГТД. Выборка данных, выполненная по этим правилам, представлена на рисунке 7 в виде зависимостей $C_{ЭКВ} = f(N_{ЭКВ})$, $G_{В ПР} = f(N_{ЭКВ})$. Во всем диапазоне значений $N_{ЭКВ}$ ГТД со свободной турбиной имеет меньший эквивалентный расход топлива $C_{ЭКВ}$ и приведенный расход воздуха

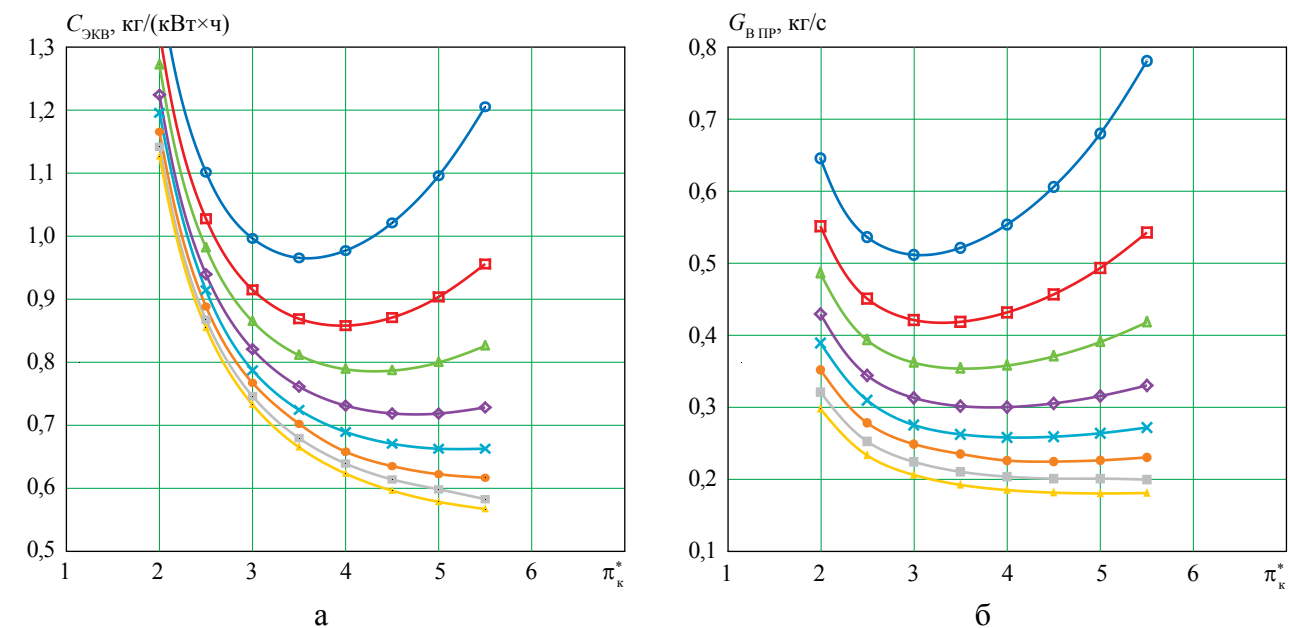


Рис. 6. Результаты расчетов: а) зависимость $C_{ЭКВ} = f(\pi_K^*, T_{Г}^*)$, б) зависимость $G_{В ПР} = f(\pi_K^*, T_{Г}^*)$.

— $T_{Г}^* = 900$ К; — 950 К; — 1000 К; — 1050 К; — 1100 К; — 1150 К; — 1200 К; — 1250 К

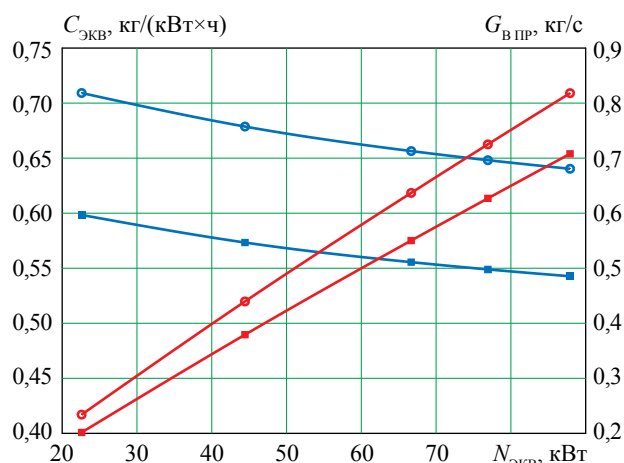


Рис. 7. Удельный расход топлива и приведенный расход воздуха ГТД
— $C_{\text{экр}}$; — $G_{\text{впр}}$; ○ — одновальный ГТД;
■ — ГТД со свободной турбиной

$G_{\text{впр}}$ в сравнении с одновальным ГТД. Однако не все сочетания $G_{\text{впр}}$ и $N_{\text{экр}}$ для ГТД со свободной турбиной достижимы на практике.

Из опыта проектирования известно, что центробежные турбины применяются при $G_{\text{т}} < 0,5\text{--}0,6$ кг/с, при больших расходах возможно применение осевых турбин, в том числе свободных турбин. Поскольку для ГТД расход газа через турбину практически равен приведенному расходу воздуха через компрессор $G_{\text{впр}}$, то для области существования ГТД со свободной турбиной можно установить условие $G_{\text{впр}} > 0,55$ кг/с. Это ограничение, связанное с размерностью проектируемой турбины, по данным рисунка 7 может быть заменено на условие $N_{\text{экр}} > 60$ кВт. Таким образом, величина эквивалентной мощности $N_{\text{экр}} = 60$ кВт может быть принята за минимально возможную мощность для двухвального ГТД со свободной турбиной.

Используемые в расчете зависимости $\eta_{\text{ПСР}}^* = f(\Delta i_{\text{СТ}}^*)$, $\Delta \eta_{\text{П}}^* = f(G_{\text{впр}})$, $\Delta \eta_{\text{П}}^* = f(A_{\text{Т}})$ получены на основе обработки данных для ступеней компрессора и турбины с различной геометрией проточной части и технологией производства. Поэтому представленные выше результаты расчета являются только примером реализации разработанной методики расчета. Для получения более достоверных количественных результатов следует формировать статистическую выборку по центробежным ступеням компрессора и осевым ступеням

турбины с однотипными конструктивными элементами и технологиями производства. Например, центробежные ступени должны иметь подобие по геометрии радиального диффузора, радиально-осевой полости и осевого спрямляющего аппарата. Такой подход может быть реализован на предприятиях, обладающих опытом проектирования и производства ГТД.

Разработанная методика имеет преимущество в сравнении с классическим термодинамическим расчетом исходного режима, поскольку учитывает взаимосвязь КПД основных узлов с параметрами термодинамического цикла, что позволяет выполнить оценку влияния размерности на основные данные ГТД $C_{\text{экр}}$, $G_{\text{впр}}$. Полученные результаты показывают, что данная методика позволяет определить область рационального применения каждого варианта конструктивной схемы ГТД с учетом его размерности. Таким образом, на начальном этапе проектирования или этапе согласования технического задания может быть сделан обоснованный выбор конструктивной схемы ГТД.

Список литературы

1. Кузнецов В. И., Шпаковский Д. Д. Оценочный расчет КПД основных узлов газотурбинного двигателя // Общероссийский науч.-техн. журнал «Полет». 2015. № 10. С. 8–14.
2. Кузнецов В. И., Шпаковский Д. Д. Методика оценочного расчета удельного расхода топлива двухконтурного турбореактивного двигателя // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2. С. 93–102.
3. Илюшкин В. А. Методика оценки погрешности косвенно измеренных параметров характеристик центробежных компрессоров при проведении стендовых испытаний // Сб.: Лопаточные машины и струйные аппараты (ЦИАМ, Труды № 1242). М.: ЦИАМ, 1989. Вып. 10. С. 75–82.
4. Данилов М. А. Автоматизированное проектирование и многодисциплинарный расчет лопаточных машин малоразмерного ГТД с учетом технологии изготовления // ICAM-2020. Международная науч.-техн. конф. по авиационным двигателям. Москва, 18–21 мая 2021 г.:



Сб. тезисов докладов. М.: ЦИАМ, 2021. Т. 1. С. 441–442.

5. Герасимов М. В., Григорьев В. А. Учет влияния малоразмерности турбомашин газотурбинных двигателей на их эффективность // Вестник Самарс. гос. аэрокосм. ун-та. Проблемы и перспективы двигателестроения. Вып. 2, Ч. 2. Самара, 1998. С. 162–167.

6. Кулагин В. В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических

установок: Учебник. М.: Машиностроение, 2003. 616 с.

7. Дьяконов В. И. Типовые расчеты по электрооборудованию. М.: Высшая школа, 1990. 161 с.

8. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 286 с.

9. Термодинамический расчет воздушно-реактивного двигателя: метод. указания / сост. В. И. Кузнецов, Д. Д. Шпаковский. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 41 с.

Об авторах

Кузнецов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», Омск, Российская Федерация.

Область научных интересов: теория воздушно-реактивных двигателей, аэрогазодинамика.

Шпаковский Денис Данилович – кандидат технических наук, ведущий инженер отдела испытаний и термодинамических расчетов Филиала Публичного акционерного общества «ОДК-Сатурн» – Омского моторостроительного конструкторского бюро, Омск, Российская Федерация.

Область научных интересов: теория воздушно-реактивных двигателей, термодинамика.

Selection of the gas turbine power plant design arrangement at the initial design stage

Kuznetsov V. I.¹, Shpakovsky D. D.²

¹ Federal State Educational Institution of Higher Education “Omsk State Technical University”, Omsk, Russian Federation

² Branch of PJSC “UEC-Saturn” – Omsk Engine Design Bureau, Omsk, Russian Federation

The paper considers the application of the thermodynamic calculation method with the compressor and engine efficiency determined on the basis of statistical data in terms of individual turbine stages for estimating the specific fuel consumption of a gas turbine power plant (GTPP). The proposed method to be applied at the initial stage of gas turbine power plant design allows to make a reasonable choice of the design arrangement, depending on the equivalent power requirements.

Keywords: gas turbine engine, specific fuel consumption, thermodynamic calculation

Information about the authors

Kuznetsov Viktor Ivanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor at Department of “Aviation and Rocket Engineering”, Federal State Educational Institution of Higher Education “Omsk State Technical University”, Omsk, Russian Federation.

Science research interests: theory of air-jet engines, fluid dynamics.

Shpakovsky Denis Danilovich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Engineer, Department of Testing and Thermodynamic Calculations, Branch of PJSC “UEC-Saturn” – Omsk Engine Design Bureau, Omsk, Russian Federation. Science research interests: theory of air-jet engines, thermodynamics.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-44-52>

УДК 661.174

Оценка эрозионной стойкости комплексного теплозащитного покрытия летательного аппарата

А. И. Гилева, Д. В. Лейман, С. А. Койтов

Акционерное общество «ОКБ «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация

Показана целесообразность применения огнезащитной вспучивающейся композиции в качестве поверхностного слоя комплексного теплозащитного покрытия летательного аппарата. Проведены испытания, подтвердившие достаточную устойчивость образцов с нанесенным огнезащитным слоем в условиях воздействия высокоскоростного газового потока. Определено, что данного типа вспучивающееся покрытие за счет физико-химических превращений компонентов способно выдерживать динамический газовый поток с создаваемой на поверхности температурой порядка 1100 °С в течение не менее 60 с.

Ключевые слова: тепловая защита, теплозащитное покрытие, огнезащитное вспучивающееся покрытие, эрозионная стойкость, высокоскоростной газовый поток, плазмотрон

Для цитирования: Гилева А. И., Лейман Д. В., Койтов С. А. Оценка эрозионной стойкости комплексного теплозащитного покрытия летательного аппарата // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 44–52. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-44-52>

For citation: Gileva A. I., Leiman D. V., Koitov S. A. Evaluation of the erosion resistance of aircraft thermal protective composite coating // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 44–52. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-44-52>

Поступила 27.03.2023 Отрецензирована 13.04.2023 Одобрена 26.05.2023 Опубликована 14.06.2023

Введение

С целью обеспечения нормального температурного режима в установках и аппаратах, которые работают в условиях подведения к поверхности значительных тепловых потоков, предполагается использование тепловой защиты, широко распространенной в авиационной и ракетной технике. В основном теплозащита предназначена для летательных и космических аппаратов, движущихся в плотных слоях атмосферы, для защиты от аэродинамического нагрева, а также для обеспечения сохранности камер сгорания и сопел воздушно-реактивных и ракетных двигателей [1–3].

В качестве теплозащитных материалов наиболее распространенного разрушающегося типа широко применяют волокнистые или армированные, обладающие такими

достоинствами, как высокое сопротивление механическому и тепловому удару, высокая эрозионная и окислительная стойкость, возможность формования в процессе изготовления крупногабаритных изделий. Наиболее распространенными теплозащитными материалами этого класса являются стеклопластики, представляющие собой композиты на основе кремнеземных или кварцевых волокон, основным связующим для которых являются эпоксидные смолы [4].

Помимо того, что применяемые в качестве тепловой защиты стеклопластики обладают такими достоинствами, как высокая прочность, низкая плотность, невысокая стоимость изготовления, у них есть существенный недостаток, заключающийся в недостаточной для перспективных летательных аппаратов (ЛА) термоэрозионной стойкости под воздействием высокоскоростного газового потока.

© Гилева А. И., Лейман Д. В., Койтов С. А., 2023



Одним из способов повышения термоэрозионной устойчивости тепловой защиты из стеклопластиков является применение в качестве поверхностного слоя огнезащитного вспучивающегося покрытия (ОВП).

В основном применение подобного типа покрытий широко распространено для защиты от пожара металлических конструкций промышленного и гражданского назначения [5], объектов транспортировки нефтепродуктов [6, 7] и других элементов нефтегазовой отрасли [8].

В настоящее время имеется небольшое количество научных публикаций, подтверждающих эффективность применения ОВП для защиты конструкций из стеклопластика, однако полученные данные относятся к такому понятию, как повышение огнестойкости полимерных композиционных материалов (ПКМ) [9–11].

В частности, в работе [9] отмечается интерес к повышению огнестойкости ПКМ вследствие их широкого применения для изготовления ответственных элементов различных образцов военной техники, таких как контейнеры, бункеры, емкости, баки, экраны для защиты личного состава и техники, амортизаторы и т.д. Большое количество конструкций и изделий из ПКМ используется на кораблях Военно-морского флота (переборки, надстройки, емкости, контейнеры и т.д.). На надводных кораблях и, в особенности, на подводных лодках имеется большое количество резинотехнических, в частности гидроакустических, изделий и амортизаторов, что повышает вероятность возгораний и развития пожара в период их эксплуатации и особенно на стадии проведения ремонтно-восстановительных работ.

Проведенный авторами работы [10] анализ показал, что значительного повышения огнестойкости ПКМ и конструкций из них можно добиться за счет применения огнезащиты. Наличие данного типа защиты позволяет при огневом воздействии установленной продолжительности обеспечить температуру защищаемых конструкций из ПКМ не выше уровня, при котором происходит существенное падение прочности материала и начинается его интенсивная термическая деструкция.

Для типичных стеклопластиков на эпоксидном связующем этот температурный диапазон составляет от 80 до 150 °С.

Типичными примерами огнезащитных материалов, способных обеспечить возможность снижения температуры защищаемых элементов до указанных значений в течение заданного времени теплового воздействия, являются негорючие плитные или рулонные материалы, обмазки (штукатурки). Однако во многих случаях для конструкций из композитов это может быть неприемлемо по различным причинам. В частности, нанесение огнезащитных штукатурок нетехнологично и возможно только при применении арматурных сеток, что приводит к значительному увеличению массы конструкции. Применение плитных и рулонных материалов в определенных случаях возможно, но, как и предыдущий вариант огнезащиты, снижает такое значительное преимущество конструкций из ПКМ, как низкая масса [11].

Наиболее приемлемым средством повышения огнестойкости конструкций из ПКМ являются лакокрасочные огнезащитные вспучивающиеся покрытия. Но существует ряд ограничений, которые не позволяют применять такие покрытия так же успешно, как, например, для металлоконструкций. Такими ограничениями являются сложность обеспечения высокой адгезии между покрытиями и ПКМ, а также требуемой эксплуатационной стойкости (например, при воздействии атмосферной влаги). В настоящее время только ограниченное количество вспучивающихся составов обеспечивают подобные характеристики. Тем не менее применение таких материалов является возможным и перспективным [10].

Работа [12] также подтверждает значительное повышение огнестойкости конструкций из полимерного композиционного материала – стеклопластика – за счет применения огнезащитных вспучивающихся составов.

Таким образом, на текущий момент для композиционных материалов, широко применяющихся в разных областях промышленности, имеются проведенные исследования, касающиеся повышения огнестойкости композитов в условиях пожара – статического



теплового воздействия, однако почти нет сведений о повышении термоэрозионной стойкости в условиях высокотемпературного динамического воздействия теплового потока.

Механизм действия, предлагаемого для повышения термоэрозионной стойкости ОВП, протекает в несколько стадий, ключевой из которых является стадия вспучивания и превращения в пенококсы поверхностного слоя материала, подверженного воздействию высоких температур [13]. Вспучившийся поверхностный слой покрытия является углеводородной субстанцией, образование пор в которой происходит за счет задержки в углеводородном каркасе выделяющихся в процессе разложения материала газов. Пенококсы выступают в качестве барьера между подложкой и агрессивной средой, блокируя проникновение тепловых потоков вглубь защищаемого материала [14] благодаря таким своим свойствам, как негорючесть [15], низкая теплопроводность [16] и плотность от $3 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ г/см³ [15].

Слой ОВП толщиной 1–2 мм за счет низкой теплопроводности пенококсов и выделения газов при горении обеспечивает снижение интенсивности поступающих в подложку тепловых потоков в течение 1–1,5 ч. Современные ОВП обладают кратностью вспучивания порядка 20–40 раз, пористостью пенококсов порядка 0,95–0,98, коэффициентом теплопроводности приблизительно 0,04–0,10 Вт/(м·К) [14].

Температура начала интенсивного термического разложения полимерных матриц, применяемых для изготовления композиционных материалов, обычно соответствует температуре от 200 до 300 °С. Одной из важных характеристик ОВП, характеризующих эффективность их использования, является температура начала вспучивания, обычно находящаяся в диапазоне от 150 до 250 °С. Чем ниже температура начала вспучивания, тем быстрее начинается процесс образования пенококсов, который позволяет значительно увеличить время прогрева защищаемого материала до 200 °С, что обеспечивает повышение предела термической стойкости изделий из полимерных композиционных материалов и позволяет отсрочить их преждевременную деструкцию [11].

На сегодня практический интерес к ОВП в разных сферах промышленности обусловлен небольшим вкладом в вес готового изделия, возможностью нанесения, в том числе с применением механизированных методов (например, воздушным распылением), тонкого слоя такого покрытия на защищаемый материал, высокими теплоизоляционными свойствами пенококсов [17].

Снижение интенсивности теплового потока, воздействующего на теплозащитное покрытие (ТЗП) ЛА в процессе прогрева и вспучивания огнезащитного покрытия, способствует увеличению времени накопления теплоты в поверхностном слое ТЗП и замедлению развития и скорости абляционных процессов в теплозащитном материале.

Целью данной работы является оценка эрозионной стойкости огнезащитного вспучивающегося покрытия в теплозащитной системе летательного аппарата.

Для достижения поставленной цели была произведена оценка сохраняемости теплозащитного материала с нанесенным ОВП при воздействии на образцы динамического высокотемпературного газового потока.

Объекты исследования

Объектами исследования выступили образцы в виде пластин-подложек, покрытых вспучивающейся композицией.

В качестве материала подложки использовали композиционный материал ТЗМКТ-8, полученный методом пропитки под давлением. ТЗМКТ-8 представляет собой композит, в качестве связующего для которого используется ЭДТ-10 (эпоксидная смола КДА, отвердитель ТЭАТ – триэтаноламинтитанат), в качестве наполнителя – упрочняющий материал из кремнеземной ткани объемного переплетения [18].

ОВП представляет собой двухкомпонентную композицию, состоящую из эпоксидной смолы, содержащей комплекс функциональных добавок, и алифатического полиаминного отвердителя.

Толщину наносимого слоя ОВП на стеклопластиковую подложку определяли в разных точках образца в начальном (без покрытия)



Таблица 1

Характеристики образцов

№ обр.	Размеры обр., мм	Материал	Средняя толщина ОВП, мм
1	200×60×9	ТЗМКТ-8	0,81
2			0,52
3			Нет покрытия
4	150×150×6		Градиентное нанесение ОВП (рис. 2)
5			
6			

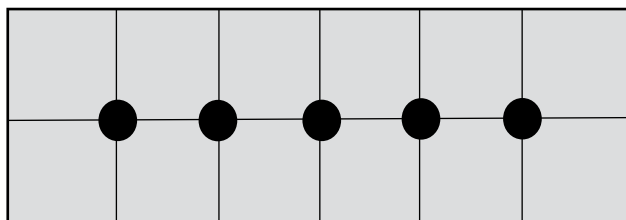


Рис. 1. Схема расположения основных точек для замера толщины подложки микрометром на образцах № 1–3

и конечном состоянии (с покрытием) с помощью микрометра. Средняя толщина ОВП для каждого образца, определенная по результатам измерений в 5 точках (рис. 1), представлена в таблице 1, содержащей подробные характеристики образцов для испытаний.

Вспучивающуюся композицию на материал подложки из ТЗМКТ-8 наносили шпательно-кистевым способом.

Стоит отметить, что вспучивающееся покрытие на образце № 1 обладало некоторой неравномерностью нанесения в отличие от образца № 2, что выражалось в наличии небольших наплывов лакокрасочного покрытия. Такие неровности характерны для шпательно-кистевых способа нанесения композиции. Покрытие на образце № 2 было более равномерное за счет меньшей толщины.

На образцы № 4–6 ОВП было нанесено градиентно, имитируя неравномерность нанесения кистью, для проверки характера вспучивания ОВП. На рисунке 2 схематично представлено конечное распределение толщины ОВП на каждом образце.

Методика определения эрозионной стойкости образцов

Исследование эрозионной стойкости образцов с ОВП проводили на испытательной установке

плазменного напыления «Термоплазма 50-03», оснащенной плазмотроном «ПНК-50».

Установка включает общий пульт управления, источник постоянного тока, газораспределительную систему, систему водяного охлаждения, дозатор порошка для случая напыления. Использованный в работе плазмотрон постоянного тока «ПНК-50» (номинальная мощность 50 кВт) выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой, рассчитан на работу в турбулентном, переходном и ламинарном режимах истечения плазменных струй, что позволяет с высокой эффективностью осуществлять испытания для оценки термоэрозионной стойкости покрытий.

Образцы № 1–3 размещали таким образом, чтобы угол между осью сопла плазмотрона и поверхностью образца составлял 45°, а образцы № 4–6 – под углом 90°, что способствует попаданию потока плазмы в центральную часть образца. Выбор угла в 45° обусловлен предположением о равномерном сходе высокотемпературного газового потока по поверхности стеклопластика. Угол в 90° был выбран для моделирования более жестких условий воздействия динамического теплового потока.

Расстояние от среза сопла плазмотрона до поверхности испытуемого образца

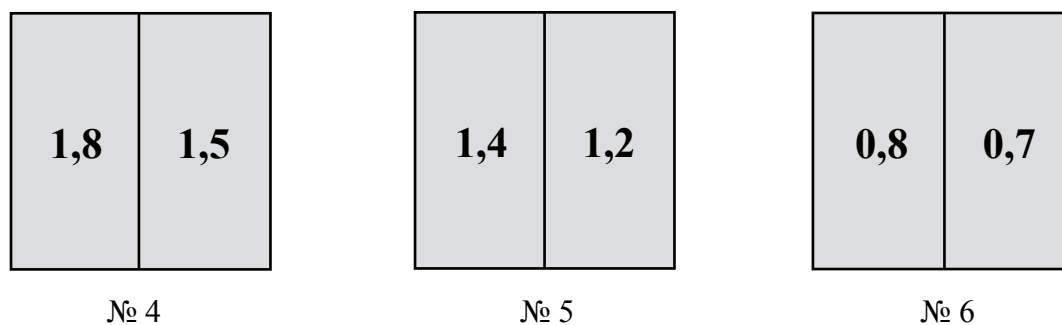


Рис. 2. Распределение толщины (в мм) ОВП на поверхности ТЗМКТ-8

по предварительным испытаниям составляло 230 мм, что позволяет обеспечить температуру, создаваемую высокотемпературным газовым потоком на поверхности образца порядка 1000–1100 °С.

Температуру поверхности определяли в ходе проведения испытаний посредством наведения лазерного пирометра DEKO CWQ02, точность которого составляет $\pm 1,5^\circ$, в центральную часть образца.

В качестве плазмообразующего газа использовался воздух.

Для надежной фиксации образцов из стеклопластика использовали оснастку цехового изготовления.

Скорость потока на срезе сопла плазмотрона является технологической характеристикой и составляет порядка 300 м/с.

Время испытаний для образцов № 1–3 составляло 10 и 50 с. После каждого промежутка времени воздействия плазменной струи производился осмотр образцов на предмет сдува вспучивающегося покрытия и его отслоения от защищаемой подложки. Суммарное время воздействия плазменной струи на каждый образец составило 60 с. Перерыв для первичного осмотра между 10 и 50 с испытаний был порядка 1 мин.

Время испытаний для образцов № 4–6 составило 60 с без перерыва на первичный осмотр.

Результаты испытаний

На образцах № 1 и 2 (см. табл. 2) после воздействия высокотемпературного газового потока образовался слой пенококса. Также на образце № 1 наблюдались разлом и растрескивание ОВП. Вспучивание слоя ОВП на образце № 2 произошло равномерно. Вероятно, растрескивание ОВП обусловлено его неравномерным



Рис. 3. Образец № 3 без покрытия ОВП после 60 с воздействия высокотемпературного газового потока

нанесением. Стеклопластик ТЗМКТ-8 на каждом образце с ОВП сохранился полностью.

Образец № 3 без ОВП за то же время обуглился и прококсовался приблизительно на 80 % глубины стеклопластика (рис. 3).

Таким образом, было показано, что наибольшую устойчивость к воздействию высокотемпературного газового потока показал образец № 2 стеклопластика ТЗМКТ-8 с равномерно нанесенным ОВП толщиной 0,52 мм.

В таблице 3 приведены фотографии образцов с градиентным нанесением ОВП.

На образцах № 4 и 5 в начале испытаний сразу появилась глубокая трещина в ОВП, что повлекло за собой скорейшее проникновение плазменного потока к нижележащему стеклопластику. Образование щели в ОВП связано с расположением образцов под углом 90° к оси сопла плазмотрона, что в данном случае является моделированием наиболее жестких условий воздействия высокотемпературного газового потока. На образце № 5 (рис. 4) после испытаний можно отметить области характерного белого цвета – следы плавления присутствующего в ОВП неорганического наполнителя. Применение минеральных наполнителей в составе огнезащитных материалов позволяет увеличить термическую, химическую и огневую стойкость покрытия [19].

Образец № 6 продемонстрировал стойкость при испытаниях, несмотря на появившуюся при вспучивании ОВП небольшую трещину – воздействие газового потока на материал не привело к возгоранию стеклопластика.



Рис. 4. Образец № 5 после проведения испытаний



Таблица 2

Фотографии образцов при проведении испытаний на плазмотроне

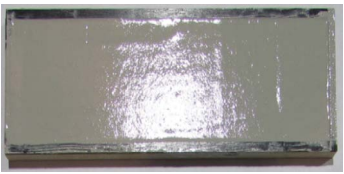
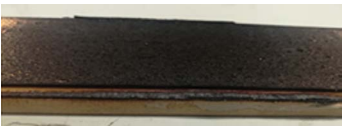
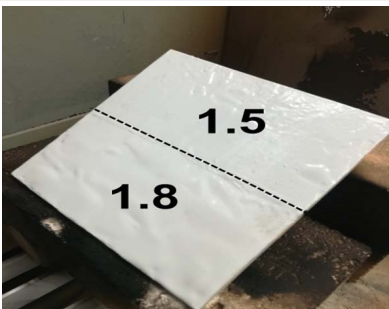
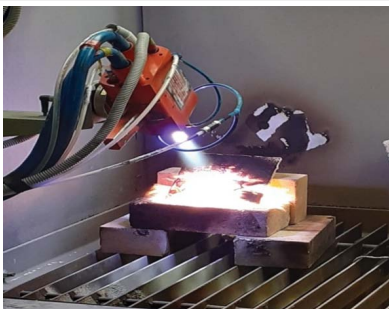
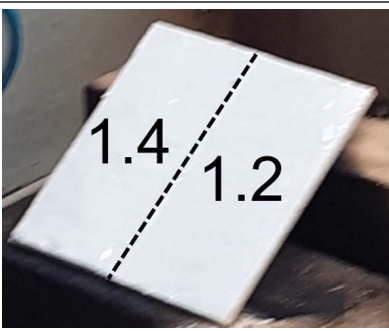
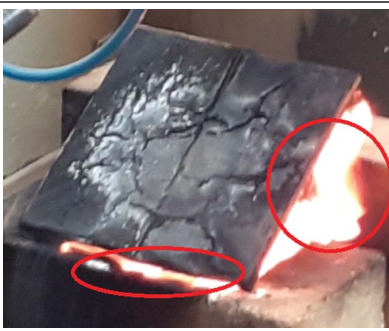
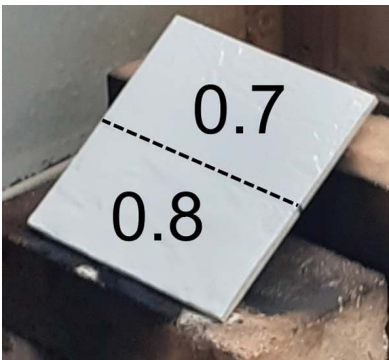
№ обр.	Толщина ОВП	До испытаний	После 10 с	После 60 с
1	0,81			
2	0,52			
3	Нет покрытия			

Таблица 3

Проведение испытаний на плазмотроне образцов с ОВП

№ обр.	До испытаний	Во время испытаний	После испытаний
4			
5			
6			

Примечание: цифры указывают толщину (в мм) ОВП каждой половины образца.



На рисунках в таблице 3 красными кругами отмечены места возгораний покрытия после 60 с воздействия плазменного потока. В основном это части материала, не защищенные ОВП.

В целом, ОВП позволяет максимально эффективно блокировать высокотемпературный динамический поток на защищаемых им поверхностях.

Выводы

- Образцы с ОВП, имитирующие комплексное теплозащитное покрытие, выдерживают температуру порядка 1100 °С при воздействии высокотемпературного газового потока длительностью 60 с.
- Наибольшую устойчивость к высокотемпературному потоку плазмы продемонстрировал образец с наиболее равномерно нанесенным ОВП.

Заключение

Произведена оценка эрозионной стойкости вспучивающегося покрытия, которая подтвердила возможность и целесообразность применения огнезащитного состава подобного типа в теплозащитной системе летательного аппарата.

На комплексное теплозащитное покрытие металлических конструкций планера высокоскоростных летательных аппаратов, включающее в качестве поверхностного слоя огнезащитное вспучивающееся покрытие, получен патент № 2771553 [20].

Список литературы

1. Авдусевский В. С., Галицейский Б. М. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 1975. 623 с.
2. Душин Ю. А. Работа теплозащитных материалов в горячих газовых потоках. Л.: Химия, 1968. 224 с.
3. Мартин Дж. Вход в атмосферу: Введение в теорию и практику. Монография. М.: Мир, 1969. 320 с.
4. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
5. Ковалев А. И., Дашковский В. Ю. Исследование огнезащитной способности покрытия

«Amotherm Steel Wb» для защиты металлических конструкций расчетно-экспериментальным методом // Safety & Fire Technology. 2014. Vol. 35. Issue 3. P. 107–113.

6. Филиппов В. Н. и др. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 11. С. 41–51.

7. Иванов А. В. и др. Исследование эксплуатационных характеристик наномодифицированных огнезащитных вспучивающихся композиций в условиях углеводородного пожара на объектах транспортировки нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 10. С. 5–19.

8. Андрюшкин А. Ю., Киршина А. А., Кадочникова Е. Н. Оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30. № 4. С. 14–26.

9. Гаращенко А. Н., Берлин А. А., Кульков А. А. Способы и средства обеспечения требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композитов (обзор) // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. № 2. С. 9–30.

10. Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П., Каледин В. О. Обеспечение требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью огнезащиты // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 8. С. 143–149.

11. Гаращенко А. Н. и др. Огнезащита конструкций из полимерных композитов и оценка ее эффективности // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18. № 5. С. 15–24.

12. Лобанова М. С. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия на основе перхлорвинилового смолы для стеклопластика // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 8. С. 207–210.

13. Гравит М. В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 5. С. 33–37.

14. Страхов В. Л., Крутов А. М., Давыдкин Н. Ф. Огнезащита строительных конструкций. Т. 2. М.: ТИМР, 2000. 433 с.



15. Павлович А. А. и др. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия // Лакокрасочная промышленность. 2012. № 5. С. 22–27.
16. Кошелев В. А., Орлов А. А. Принципы обеспечения огнезащитных свойств материалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2019. Т. 19. № 2. С. 50–54.
17. Зверев В. Г., Теплоухов А. В., Цимбалюк А. Ф. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 8/2. С. 148–153.
18. Койтов С. А., Мельников В. Н. Исследование теплоемкости, теплопроводности гетерофазных композиционных теплозащитных материалов с непрерывной полимерной фазой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2012. № 12. С. 182–186.
19. Еремина Т. Ю., Гравит М. В., Дмитриева Ю. Н. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 7. С. 52–56.
20. Комплексное теплозащитное покрытие металлических конструкций планера высокоскоростных летательных аппаратов. Патент РФ № 2771553. Заявка № 20211112925, приоритет изобретения: 04.05.2021. Дата опубликования патента: 05.05.2022. Бюл. № 13. 9 с.

Об авторах

Гилева Анна Игоревна – инженер-химик I категории конструкторского отдела АО «ОКБ «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация

Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Лейман Дмитрий Владимирович – кандидат химических наук, ведущий инженер-конструктор конструкторского отдела АО «ОКБ «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация.

Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Койтов Станислав Анатольевич – доктор технических наук, главный химик – заместитель начальника конструкторского отдела АО «ОКБ «Новатор», Екатеринбург, Российская Федерация.

Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.



Evaluation of the erosion resistance of aircraft thermal protective composite coating

Gileva A. I., Leiman D. V., Koitov S. A.

“EDB “Novator” JSC, Yekaterinburg, Russian Federation

The paper gives grounds for the application of an intumescent composite coating as a surface layer of the aircraft composite thermal protective material. Tests are conducted to verify a sufficient resistance of specimens coated with a fireproof layer exposed to a high-speed gas flow. Thanks to physical and chemical transformations of its components, the intumescent coating of a given type is found to be resistant to a dynamic gas flow with a surface temperature of around 1100 °C within at least 60 s.

Keywords: thermal protection, thermal protective coating, intumescent coating, erosion resistance, high-speed gas flow, plasmatron

Information about the authors

Gileva Anna Igorevna – Chemical Engineer of the I category, Design Department, “EDB “Novator” JSC, Yekaterinburg, Russian Federation.

Science research interests: development of brand-new composite materials and advanced product manufacturing technologies.

Leiman Dmitry Vladimirovich – Cand. Sci. (Chemistry), Lead Design Engineer, Design Department, “EDB “Novator” JSC, Yekaterinburg, Russia.

Science research interests: development of brand-new composite materials and advanced product manufacturing technologies.

Koitov Stanislav Anatolievich – Dr. Sci. (Engineering), Chief Chemist – Deputy Head of the Design Department, “EDB “Novator” JSC, Yekaterinburg, Russian Federation.

Science research interests: development of brand-new composite materials and advanced product manufacturing technologies.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

УДК 533.9:537.52

Свечение ударно сжатого слоя при обтекании тела потоком плазмы струйного диафрагменного разряда

Е. В. Калашников, Н. И. Павлов, В. Г. Бородин, К. К. Коленчиков,
В. М. Комаров, В. А. Малинов, В. М. Мигель, В. С. Попиков, А. В. Чарухчев

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения»,
Сосновый Бор, Ленинградская область, Российская Федерация

Целью исследования является физическое моделирование и получение экспериментальных данных по свечению ударно сжатого слоя (УСС) и собственной атмосферы, характерных для высокоскоростных объектов, с использованием метода формирования высокоскоростного потока, обтекающего модельное тело, на основе струйного диафрагменного разряда. В работе описан многоканальный комплекс, созданный для диагностики УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы со скоростью в диапазоне от 4 до 50 км/с, в условиях пониженного атмосферного давления. Показано, что совокупность реализованных оптических и спектральных методов позволяет диагностировать огибающий модельное тело поток с регистрацией снимков структуры УСС вблизи носка модельного тела и спектров излучения УСС.

Ключевые слова: ударно сжатый слой, струйный диафрагменный разряд, эрозионная плазма

Для цитирования: Калашников Е. В., Павлов Н. И., Бородин В. Г., Коленчиков К. К., Комаров В. М., Малинов В. А., Мигель В. М., Попиков В. С., Чарухчев А. В. Свечение ударно сжатого слоя при обтекании тела потоком плазмы струйного диафрагменного разряда // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 53–65. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

For citation: Kalashnikov E. V., Pavlov N. I., Borodin V. G., Kolenchikov K. K., Komarov V. M., Malinov V. A., Migel V. M., Popikov V. S., Charukhchev A. V. Luminescence of the shock-compressed layer produced by a plasma flow around the body, using a jet diaphragm discharge // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 53–65. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-53-65>

Поступила 14.04.2023 Отрецензирована 24.04.2023 Одобрена 30.04.2023 Опубликовано 14.06.2023

Введение

Известно, что сильное свечение, исходящее от объектов, летящих в разреженной атмосфере со скоростями 5 Махов и более, в значительной мере обусловлено особенностями обтекания корпуса набегающим потоком атмосферного газа [1, 2]. За фронтом ударной волны возникает высокотемпературный ударно сжатый слой (УСС), в котором кинетическая энергия молекул атмосферных газов преобразуется в их внутреннюю энергию

с протеканием процессов электронного возбуждения, распада на отдельные атомы (диссоциации) и ионизации. Происходящие процессы усложняются идущими химическими реакциями с участием продуктов абляции материалов корпуса. Ударная волна обтекает летящий объект, сжатый слой воздуха за ударной волной, сливаясь с пограничным слоем у поверхности объекта, образует ударно сжатый слой газа, который является источником мощного собственного свечения в диапазоне волн от ультрафиолета (УФ) до инфракрасной (ИК) области спектра. Интенсивное свечение наблюдается в отдельных линиях атомарных газов и в молекулярных полосах продуктов,

© Калашников Е. В., Павлов Н. И., Бородин В. Г., Коленчиков К. К., Комаров В. М., Малинов В. А., Мигель В. М., Попиков В. С., Чарухчев А. В., 2023



содержащихся в УСС и спутном следе, включая продукты абляции. Известной проблемой является адекватная оценка соотношения долей равновесного и неравновесного излучений, исходящих из УСС [3].

Существующие расчетные модели излучения в силу сложности учитываемых физических процессов требуют верификации, которая, в свою очередь, должна быть обеспечена необходимыми экспериментальными данными. Аэродинамические трубы и баллистические трассы достаточно дороги в эксплуатации, имеют ограничения по физическому моделированию и диагностике процессов обтекания тел в части моделируемых скоростей набегающего потока, внешнего атмосферного давления, количества каналов размещаемой диагностической аппаратуры и т.д. [1–5]. В этой связи актуальной является реализация нового метода экспериментального моделирования УСС с использованием струйного диафрагменного разряда (СДР) [6, 7]. Указанный метод позволяет получать УСС и структуру течений около модельного тела высокоскоростных (до нескольких десятков километров в секунду) потоков практически любого химического и ионизационного состава [8].

Ниже представлено краткое описание созданной лабораторной моделирующей установки на основе СДР с многоканальным комплексом диагностики УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы со скоростью в диапазоне от 4 до 50 км/с в условиях пониженного атмосферного давления до 10^{-2} Па. Показано, что комплекс диагностики позволяет регистрировать структуру набегающей на модельное тело струи с оценкой параметров потока: распределения скорости потока, температуры, статического и полного давления. Особое внимание уделено получению результатов экспериментальных исследований структуры УСС вблизи носовой части (носки) модельных тел и исходящего от УСС излучения, так называемой критической области обтекания модельных тел разной конфигурации. Показано, что согласно полученным спектрам основной вклад в излучение дают атомы

и ионы продуктов эрозии основного состава плазмообразующего материала диафрагмы СДР. Однако при этом также устойчиво регистрируются полосы таких атмосферных газов, вовлекаемых в набегающий на модельное тело поток, как молекулы азота (N_2), кислорода (O_2), монооксида азота (NO). Также показано, что обработка спектров с использованием данных о полуширинах и интенсивностях спектральных линий атомов и молекулярных полос позволяет оценить для выбранных излучающих участков УСС концентрацию электронов N_e , температуру T_e энергетического распределения электронов, а также вращательную, колебательную и поступательную температуры.

Метод физического моделирования УСС и лабораторная установка на основе СДР

На рисунке 1 представлена схема СДР, где изображена плазмообразующая диафрагма 1 с диаметром отверстия $2r_0$, кольцевой анод 2 с диаметром отверстия $2R$, кольцевой катод 3 с диаметром отверстия $2R$. На рисунке 1 также показано:

 – направление линий азимутально-го магнитного поля H_ϕ собственного тока разряда;

 – направление истечения в анодной и катодной частях разрядного промежутка плазменных струй V ;

 – направление тока разряда I .

Скорость V_∞ плазменного потока в плоскости кольцевого электрода определяется из соотношения [6–8]

$$V_\infty = 0,5V_{кр} \left\{ [2/(\gamma - 1)] \left[1 - \left(\frac{P_{вак}}{P_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} \right] \right\}^{1/2} + \mu\mu_0 i^2 (4\pi\omega)^{-1} \ln(R/r_0), \quad (1)$$

где $V_{кр}$ – скорость потока в критическом сечении на срезе отверстия диафрагмы, м/с;

$P_0 = (1 + \gamma)P_{кр}$ – проталкивающее давление в центре отверстия диафрагмы, Па [6–8];

$P_{кр} = [0,14 i^{1,34} (2l_0)^{0,93}] / [r_0^{2,95} (1 + r_0/2l_0)^{0,67}]$ – давление в критическом сечении на срезе отверстия диафрагмы, Па [6–8];

$P_{вак}$ – давление в вакуумной камере, Па;

$\gamma = c_p/c_v \approx 1,2$ – постоянная адиабаты с учетом энергии ионизации плазмы;

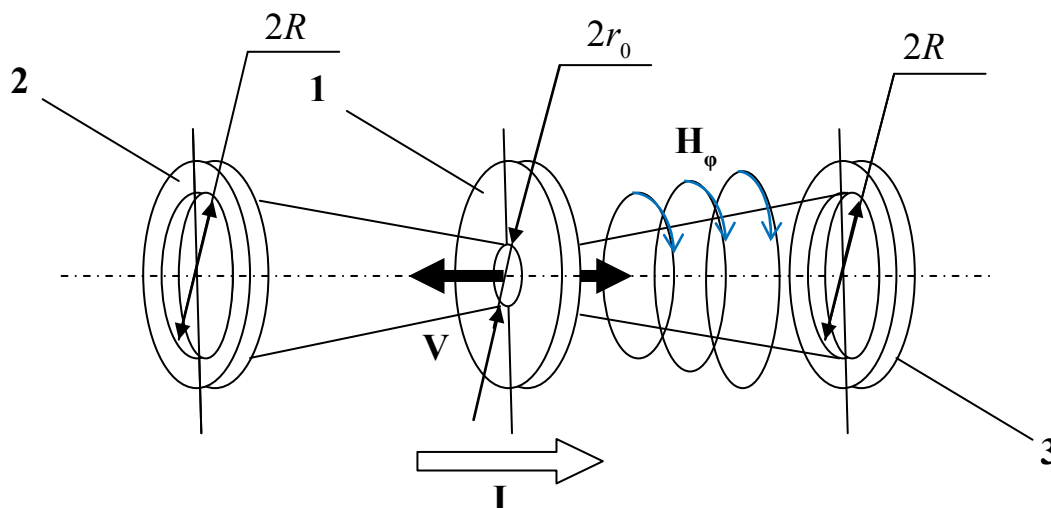


Рис. 1. Схема СДР: 1 – диафрагма; 2 и 3 – кольцевые электроды

ω – средняя скорость уноса массы плазмообразующего материала диафрагмы, кг/с;
 $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;
 i – сила тока разряда, А;
 r_0 – радиус отверстия в диафрагме, м;
 $2l_0$ – толщина диафрагмы, м;
 R – радиус отверстия в кольцевом электроде, м.

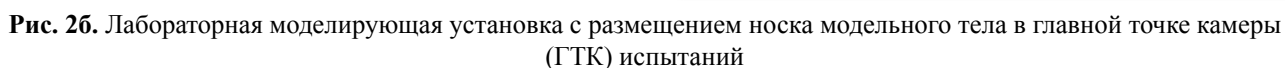
При этом компонентный состав потока плазмы соответствует выбранному составу плазмообразующего материала внутренней стенки расходного сопла в отверстии диафрагмы и определяется составом химических элементов и стехиометрическими коэффициентами его исходной формулы. В опорном режиме используются плазмообразующие диафрагмы из текстолита марки ПТК со стехиометрическими коэффициентами состава $(C_{37}H_{47}O_{16})_n$ с размерами отверстия $2r_0 = 4,0$ мм и $2l_0 = 4,0$ мм.

Для исследования свечения УСС при обтекании тела набегающим потоком эрозионной плазмы СДР и возможности использования полученных данных исследования для наблюдения высокоскоростных объектов в атмосфере создана лабораторная установка с многоканальным диагностическим комплексом и рассмотрены свойства высокоскоростной струи за кольцевым электродом (рис. 2а, б).

Структура истекающей струи за кольцевым электродом, имеющим вид цилиндрического (или конического) сопла в сторону объема камеры с модельным телом, соответ-

ствует начальному участку истечения с недорасширением в затопленное пространство («первая бочка Маха») [9] с расчетными параметрами: распределениями в меридиональном сечении и по оси струи скорости потока V_∞ , температуры T_∞ , статического давления P_∞ , числа Маха M_∞ , числа Рейнольдса Re_∞ , числа Кнудсена Kn_∞ . На рисунке 2а справа показаны сечения потока докатодной струи на разрядном промежутке диафрагма–катод: «0–0» – срединное сечение (центр отверстия в диафрагме); «1–1» – срез отверстия в диафрагме; «2–2» – устье струи; «3–3» – срединное сечение струи; «4–4» – прикатодное сечение струи; «5–5» – срез кольцевого катода на входе; а также характерные зоны: I – устьевая зона струи; II – осевая зона струи; III – приосевая зона струи; IV – оболочка струи. Рисунок 2б справа иллюстрирует состав лабораторной моделирующей установки с размещением носка модельного тела в главной точке вакуумной камеры: 1 – вакуумная камера испытаний; 2 – источник плазмы СДР; 3 – вакуумная система откачки; 4 – имитатор солнечного коротковолнового излучения; 5 – вакуумметр; 6 – модельное тело; 7 – держатель модельного тела. Слева в укрупненном масштабе отображены модельное тело, где носок модельного тела размещен в главной точке камеры (ГТК), и истекающая струя.

При размещении вершины модельного тела (носка) в главной точке камеры испытаний, находящейся в области потока


$$M_{\infty} = \{(\sin \theta_c)^2 - 0.5(\gamma + 1)[\sin \theta_c \cdot \sin \beta_{\kappa\lambda} / \cos(\theta_c - \beta_{\kappa\lambda})]\}^{-1/2}. \quad (2)$$
$$A_\infty = (\frac{\gamma P_\infty}{\rho_\infty})^{1/2} = [\Delta h_\infty(\gamma - 1)]^{1/2}, \quad (3)$$

Соответственно, скорость потока V_{∞} за кольцевым электродом равна

$$V_{\infty} \approx A_{\infty} \cdot M_{\infty}. \quad (4)$$

Параметры режима электропитания и параметры СДР при проведении экспериментов включали: напряжение емкостного накопителя энергии $U_0 = 5,0$ кВ, амплитуда импульса тока $i_{\max} = 50$ кА, общая длительность импульса тока 400 мкс. Регистрация наблюдаемой области УСС осуществлялась высокоскоростной цифровой камерой с частотой $f = 77\,000\text{--}125\,000$ кадр/с и длительностью экспозиции $t_{\text{эк}} = 1$ мкс; для кадров, приведенных на рисунках 3

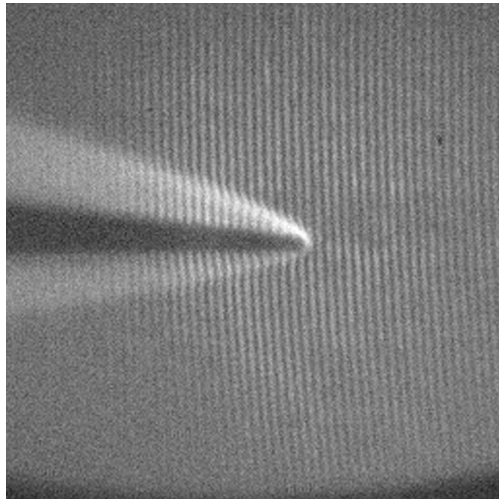


и 4, момент регистрации кадра соответствовал $t_p \approx 80$ мкс от начала токовой фазы разряда.

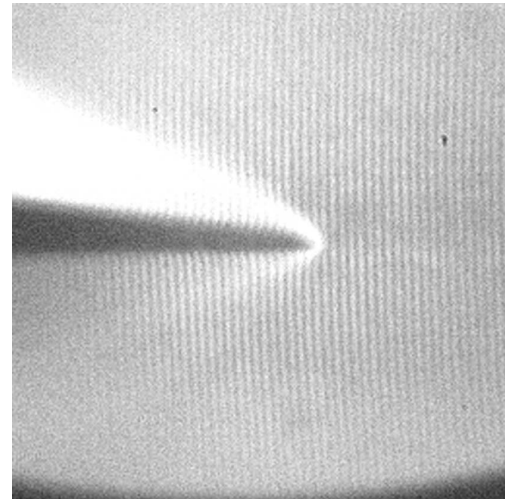
На рисунках 3 и 4 представлены снимки структуры УСС вблизи модельных тел в виде клина с углом $\beta_{кл} = 8^\circ$ (при кадровой частоте $f = 77\,000$ кадр/с) и конуса с углом при вершине $2\theta_{кон} = 90^\circ$ (при кадровой частоте $f = 125\,000$ кадр/с). Снимки иллюстрируют структуру УСС, характерную для критической области торможения набегающего потока, включающую ударную волну (УВ), зону между УВ и пограничным слоем, прилегающим к поверхности тела, и сам пограничный слой. При этом показательно уменьшение интенсивности ударной волны, размера и свечения критической области (области торможения,

совпадающей с главной точкой камеры испытаний) и области течения за вершиной модельного тела при понижении давления в окружающей среде с $p_{вак} = 290$ Па (рис. 3б и 4б) до $p_{вак} = 4 \times 10^{-2}$ Па (рис. 3а и 4а).

На рисунке 5а приведена осциллограмма импульса излучения в УФ области спектра ($\Delta\lambda = 240\text{--}320$ нм) для области УСС в критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела в форме клина, $\beta_{кл} = 8^\circ$, полученная на фотоэлектрическом канале на основе фотоприемного устройства с TeCs фотокатодом. В результате обработки сигнала получено значение спектральной плотности яркости в критической области размером ~ 12 мм, $L_{\max\lambda} \approx 16 \pm 2$ мВт/(см²ср·нм).

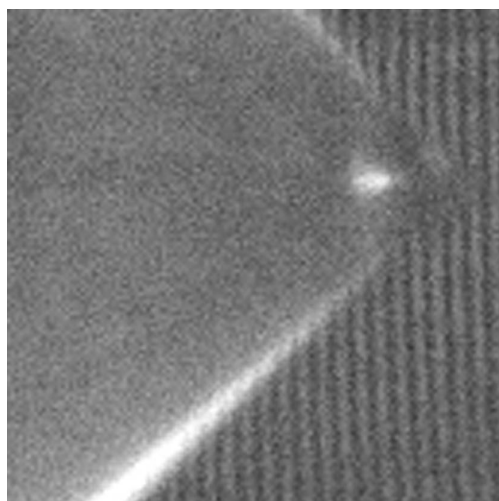


а

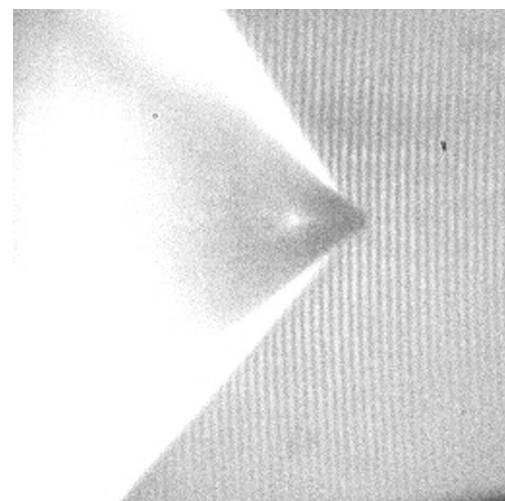


б

Рис. 3. Интерферограмма УСС при обтекании клина с $\beta_{кл} = 8^\circ$ высокоскоростным потоком плазмы за кольцевым катодом СДР



а



б

Рис. 4. Интерферограмма УСС при обтекании конуса с углом при вершине $2\theta_{кон} = 90^\circ$ высокоскоростным потоком плазмы за кольцевым катодом СДР

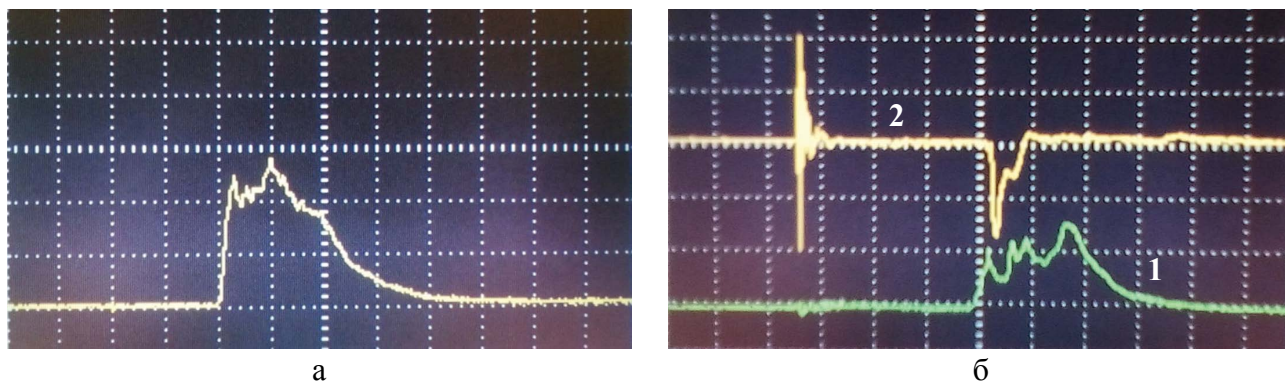


Рис. 5. Осциллограмма импульса излучения в диапазоне волн $\Delta\lambda = 240\text{--}320$ нм (а); осциллограмма 1 импульса излучения в диапазоне $\Delta\lambda = 250\text{--}260$ нм и осциллограмма 2 импульса давления (б); модельное тело в форме клина, $\beta_{\text{кл}} = 8^\circ$.

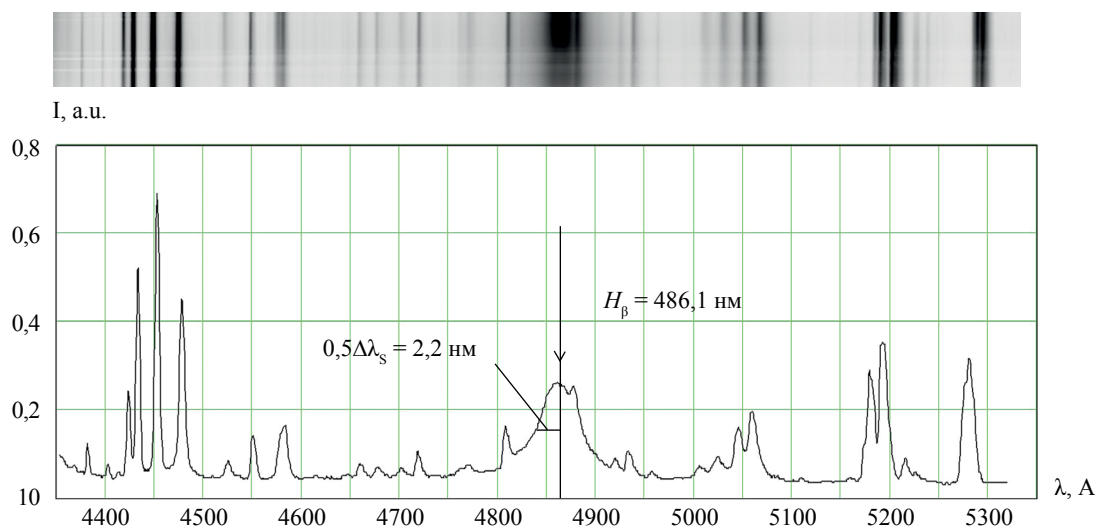


Рис. 6. Спектр излучения УСС в критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин, $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$)

На рисунке 5б приведена осциллограмма 1 импульса излучения в более узком спектральном интервале волн $\Delta\lambda = 250\text{--}260$ нм с полученной оценкой значения спектральной плотности яркости $L_{\text{max}\lambda} \approx 5 \pm 2$ мВт/см²ср·нм.

Для определения значения статического давления в набегающем высокоскоростном потоке при обтекании модельного тела использовался пьезоэлектрический датчик, размещенный перпендикулярно оси на расстоянии 10 мм от оси потока и расстоянии 20 мм от среза конического сопла (катода). Для указанного выше режима электропитания СДР измеренное абсолютное значение статического давления не превышает $P_{\text{стат.мах}} \approx 2,7 \cdot 10^5$ Па, осциллограмма 2 импульса давления приведена на рисунке 5б сверху.

Для измерения значения полного давления скоростного потока $P_{\text{полн, эксп}}$ использовался

также пьезоэлектрический датчик, но размещенный вдоль оси потока в ГТК. При этом измеренное максимальное абсолютное значение составило $P_{\text{полн, эксп}} \approx 28 \cdot 10^5$ Па.

Измерение спектров излучения УСС

Для получения спектров излучения высокоскоростного потока в видимом диапазоне ($\Delta\lambda = 400\text{--}800$ нм) использовался диагностический канал, собранный на основе дифракционного спектрометра с цифровой камерой. На рисунке 6 показан характерный вид спектра излучения УСС в критической области торможения потока эрозионной плазмы вблизи носка модельного тела – одностороннего клина $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$; $p_{\text{вак}} = 290$ Па.

Спектры, полученные в видимом диапазоне, позволяют, используя метод на основе эффекта уширения Штарка спектральной



линии и зависимость полуширины спектральных линий H_β атома водорода от концентрации электронов N_e (см^{-3}) при различных температурах плазмы [11], определить текущее значение и распределение концентрации электронов N_e в различных зонах потока и УСС. По данным спектра на рисунке 6 величина полуширины спектральной линии атома водорода H_β ($\lambda = 486,1$ нм) составила $0,5\Delta\lambda_s = 2,2$ нм, а концентрация электронов N_e в критической области торможения потока равна $N_e \approx 7,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Одновременно с регистрацией газодинамической структуры при моделировании обтекания потоком плазмы СДР модельных тел использовался диагностический канал, где регистрировалось излучение потока и УСС с помощью спектрометра в УФ диапазоне спектра (200–400 нм) со спектральным разрешением до 0,2 нм и временем экспозиции от 100 мкс до 10 мс.

На рисунке 7 показан спектр излучения на оси потока эрозионной плазмы на срезе конического сопла кольцевого катода в относительных единицах, полученный на канале УФ спектрометра, $p_{\text{вак}} = 290$ Па.

Данные, полученные после первичной обработки спектра, использовались для определения температуры T_e энергетического распределения электронов по отношению интенсивностей спектральных линий ионов CaII ($\lambda = 396,8$ нм и $\lambda = 317,9$ нм), а также для определения вращательной температуры $T_{\text{вр}}$ фиолетовой системы полос радикала CN ($\text{B}^2\Sigma^+ \rightarrow \text{X}^2\Sigma^+$) по крутизне спада интенсивности в отклонении полос CN 388,3 нм, 387,2 нм и значения

колебательной температуры $T_{\text{кол}}$ по отношению интенсивностей в кантах этих же спектральных полос CN 388,3 нм (0–0) и 387,2 нм (1–1). Найденные температуры в потоке на выходе из катодного сопла показали близость их значений $T_{\text{кол}} \approx T_{\text{вр}} \approx T_{\text{газ}} \approx 8,4$ кК в пределах погрешности измерений, что может служить обоснованием наличия состояния локального термодинамического равновесия (ЛТР).

На рисунке 8 показан спектр излучения УСС из главной точки камеры (ГТК) – критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{\text{кл}} = 15^\circ$, $p_{\text{вак}} = 290$ Па). Используя метод относительных интенсивностей для группы спектральных линий (линий ионов кальция CaII 315,88 нм, CaII 317,9 нм, CaII 393,36 нм и CaII 396,8 нм), были определены значения температуры распределения электронов по наклону прямой, уравнение которой связывает температуру электронов, параметры атомных переходов для выбранных спектральных линий [12, 13] и которые составили в среднем $T_e \approx 9,1$ кК. Этот результат свидетельствует в пользу наличия в области торможения потока эрозионной плазмы условий, характерных для локального термодинамического равновесия (ЛТР). Наличие в критической области торможения потока состояния ЛТР отмечается и в других работах [3, 14–16], где было показано, что на температуру в критической точке неравновесные процессы оказывают очень слабое влияние.

На рисунке 9 показан спектр излучения УСС из области вблизи оси потока с линейным

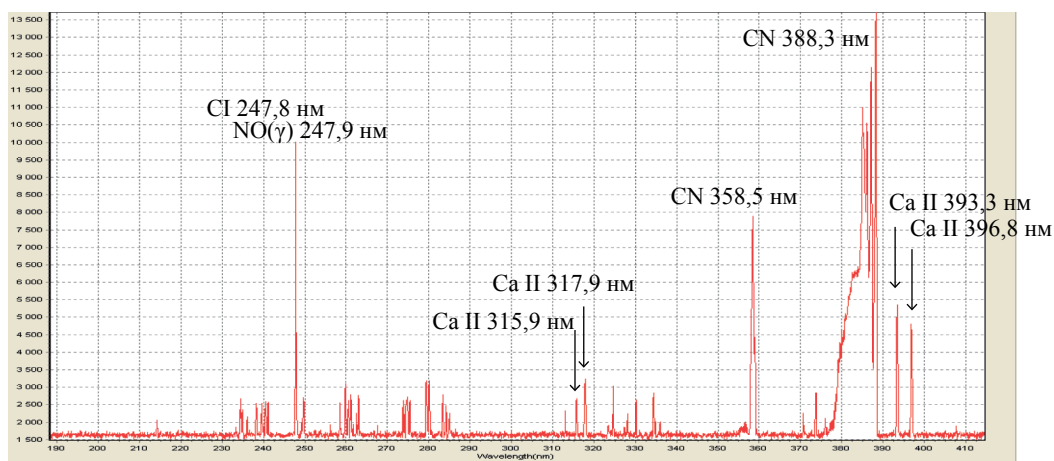


Рис. 7. Спектр излучения области потока эрозионной плазмы на срезе конического сопла кольцевого катода

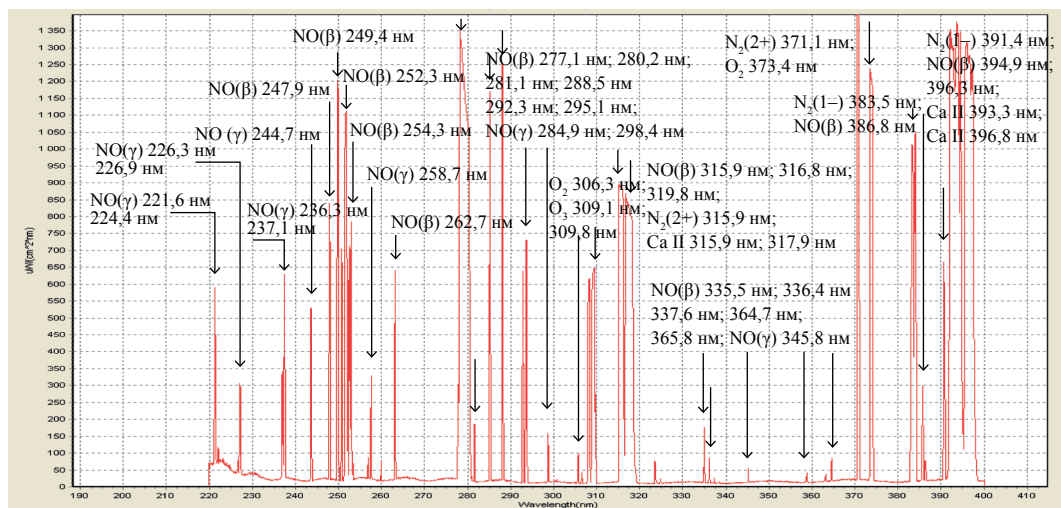


Рис. 8. Спектр излучения УСС критической области торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$)

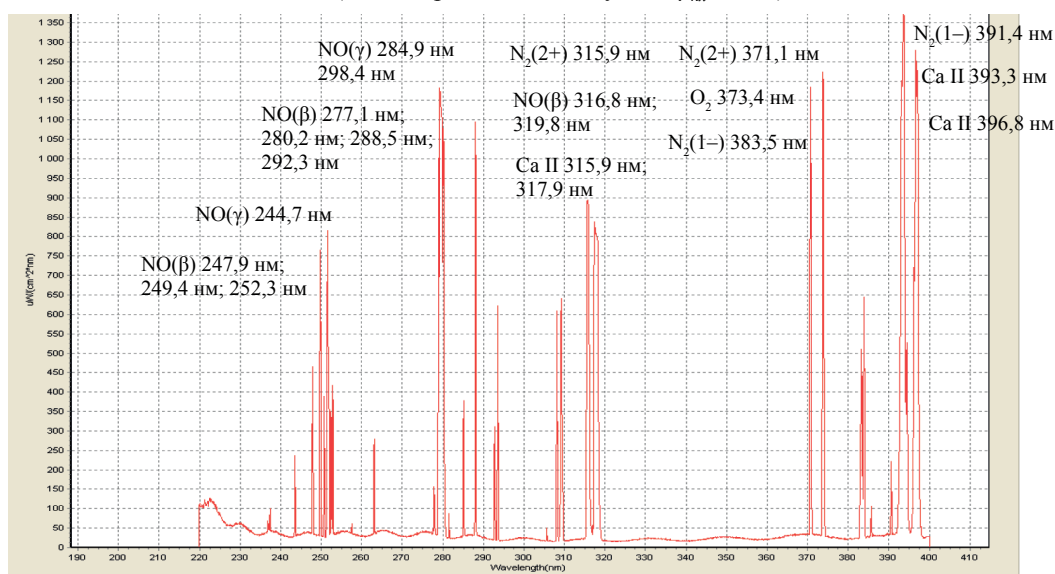


Рис. 9. Спектр излучения УСС из области на оси за носком модельного тела ($x = -20$ мм от ГТК, односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$)

размером около 4,2 мм и находящейся за носком модельного тела (односторонний клин с углом $\beta_{кл} = 15^\circ$, $p_{\text{вак}} = 290$ Па) на расстоянии 20 мм от главной точки камеры (ГТК).

Для изменения компонентного состава УСС были использованы специально синтезированные плазмообразующие материалы диафрагмы. Кроме текстолита марки ПТК с химическим составом $(C_{37}H_{47}O_{16})_n$ использовались материалы на основе нитрида бора, сополимера дифенелол-пропана с эпихлоргидрином, полиоксипропиленамины, бутандиола.

На рисунке 10 для сравнения показаны спектры излучения УСС в УФ области с использованием в качестве плазмообразующего материала образцов на основе текстолита

марки ПТК (а) и нитрида бора (б). Спектры излучения получены при пониженном давлении в камере $p_{\text{вак}} = 3,1 \times 10^{-2}$ Па, относятся к критической области торможения потока эрозионной плазмы из зоны размером около 4,2 мм для модельного тела в виде одностороннего клина с $\beta_{кл} = 15^\circ$ и оцифрованы в величинах спектральной плотности яркости.

На рисунке 11 показан спектр излучения УСС в условиях повышенного давления в камере ($p_{\text{вак}} = 290$ Па) в критической области торможения потока эрозионной плазмы модельного тела (односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$) с использованием плазмообразующего материала диафрагмы на основе нитрида бора. Максимальные значения спектральной

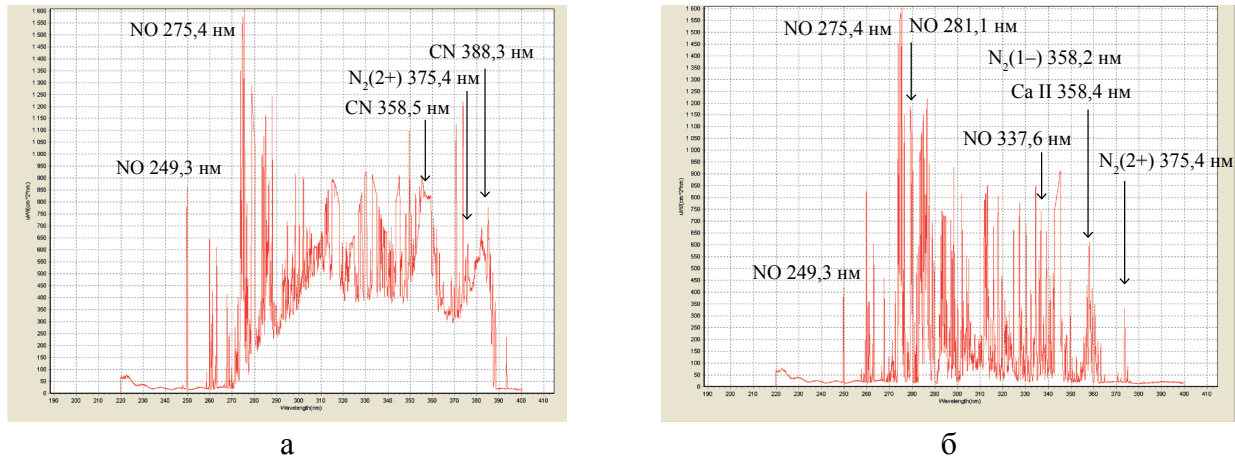


Рис. 10. Спектры излучения УСС в критической точке торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела (односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$); $p_{\text{вак}} = 3,1 \times 10^{-2}$ Па; плазмообразующий материал диафрагмы – текстолит марки ПТК (а) и нитрид бора (б)

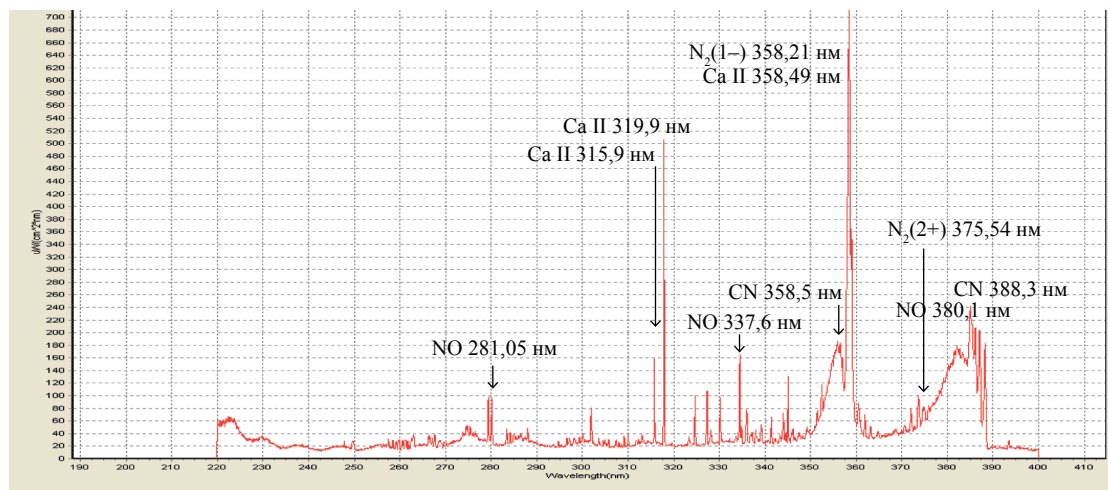


Рис. 11. Спектр излучения УСС в критической точке торможения потока эрозионной плазмы для модельного тела односторонний клин $\beta_{кл} = 15^\circ$; $p_{\text{вак}} = 290$ Па; плазмообразующий материал диафрагмы нитрид бора

плотности яркости наиболее сильных полос молекулы циана CN 388,3 нм, CN 358,49 нм, линий ионов углерода CII 358,9 нм и кальция CaII 317,9 нм, CaII 315,8 нм при этом составили 0,24, 0,18, 0,7, 0,5 и 0,15 мВт/(см²·ср·нм) соответственно.

Полученные результаты регистрации УСС, который формируется вблизи модельного тела – газовой оболочки, окружающей носовую часть, показали, что эта область потока состоит из смеси продуктов высокотемпературной эрозии стенки отверстия плазмообразующего материала, остаточного воздуха в разрядной камере и продуктов эрозии материала модельного тела из пограничного слоя. Эта область вблизи модельного тела является источником коротковолнового излучения и регистрируется аппаратурой. Как показывают

спектры излучения УСС, в основном излучают атомы и ионы продуктов эрозии основного состава плазмообразующего материала диафрагмы, а также примеси: Fe, Mg, Na, Ca, Ni, Si, Al, Co, Cr, Mn и др. На долю полос атмосферного азота (N_2) приходится ~2 % энергии излучения, а кислорода (O_2) менее 1 %. Среди полос в спектрах обнаружены полосы молекул CN, N_2 , N_2^+ , NO.

В таблице приведены молекулярные полосы, которые были зарегистрированы в УФ области спектра в проведенных экспериментах для выбранных условий моделирования высокоскоростного обтекания модельного тела с односторонним клином $\beta_{кл} = 15^\circ$, а также для сравнения основные атмосферные компоненты воздуха и их переходы в системе молекулярных полос.



Таблица

Молекулярные полосы, зарегистрированные в УФ области спектра в экспериментах с набегающей эрозионной плазмой в сравнении с полосами атмосферных компонентов воздуха

Система молекулярных полос	Переход	Максимумы полос, зарегистрированных в экспериментах, нм	Максимумы полос для атмосферных компонент, нм
NO(β)	$B^2\Pi-X^2\Pi$	380,09; 364,72; 357,24; 337,64; 320,69; 275,43; 262,66; 249,34; 243,30; 233,14	380,09; 358,85; 338,64; 320,69; 304,30; 289,26; 275,43; 262,66; 249,34; 243,30; 233,14
NO(γ)	$A^2\Sigma-X^2\Pi$	300,88; 285,95; 281,05; 247,87; 237,02; 259,57	300,88; 285,95; 272,22; 259,57; 247,87; 226,94; 200,3
O ₂ (III-P)	$B^3\Sigma-X^2\Sigma$	374,2; 337,0; 310,4;	421,47; 402,11; 384,11; 367,32; 351,66; 337,01; 323,29; 310,43
O ₂ ⁺	$^2\Pi-^2\Pi$	373,4; 306,3	
N ₂ ⁺	$B^2\Sigma-X^2\Sigma$	391,4; 358,21	391,44; 381,81; 356,39; 353,26; 329,34
N ₂ (2+)	$C^3\Pi-B^3\Pi$	380,49; 375,54; 371,2; 357,69; 337,13; 315,93	405,94; 380,49; 375,54; 357,69; 337,13; 315,93; 297,68; 296,20; 295,32; 281,43
CN $v = +1$	(B-X)	359,04; 358,59; 358,39;	-
CN $v = 0$	(B-X)	388,34; 387,14; 386,19; 385,47	-

Заключение

Предложен и реализован метод физического моделирования УСС, возникающего при обтекании модельного тела набегающим потоком эрозионной плазмы, созданным СДР. Структура набегающего потока эрозионной плазмы характеризуется совокупностью таких параметров, как: скорость потока, температура, статическое давление, числа Маха. Созданная моделирующая установка с многоканальным диагностическим комплексом позволяет получать снимки (интерферограммы) структуры ударно сжатого слоя вблизи носка модельного тела и регистрировать спектры излучения, исходящего от разных зон обтекающей носок плазменной струи. Согласно зарегистрированным спектрам, интенсивное свечение наблюдается в линиях атомов и в молекулярных полосах продуктов эрозии плазмообразующего материала диафрагмы с включениями от продуктов абляции поверхности модельного тела. Также устойчиво регистрируются полосы таких атмосферных газов, участвующих в набегающем на модельное тело потоке, как молекулы азота, кислорода и монооксида азота. Показано, что обработка спектров с использованием данных о полуширинах и интенсивностях спектральных линий атомов и молекулярных полос позволяет оценивать для выбранных участков УСС

концентрацию и температуру энергетического распределения электронов, а также вращательную, колебательную и поступательную температуры. Полученная из спектров информация позволяет в дальнейшем делать выводы о равновесности или неравновесности происходящих в струе физических процессов, что определяет важность результатов физического моделирования для верификации расчетных моделей излучения УСС.

Список литературы

1. Гиперзвуковая аэродинамика и тепломассообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов / Под ред. Г. А. Тирского. М.: Физматлит, 2011. 548 с.
2. Яцухно Д. С. Исследование аэродинамики высокоскоростных летательных аппаратов с использованием моделей совершенного и реального газа: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ИПМ им. А. Ю. Ишлинского, РАН. М., 2019.
3. Агафонов В. П., Вертушкин В. К., Гладков А. А. и др. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М., 1972. 321 с.
4. Котов М. А., Рулева Л. Б., Солодовников С. И., Суржиков С.Т. Расчетно-экспериментальные исследования структуры высокоскоростного потока газа при обтекании моделей фрагментов летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана.



- Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 18–30. DOI: 10.18698 / 0236-3941-2017-3-18-30
5. Никитин П. В., Сотник Е. В. Катализ и излучение в системах тепловой защиты космических аппаратов. М.: МАИ, 2013. 390 с.
6. Калашников Е. В., Калашникова С. Н. Исследование ионной имплантации в условиях струйного диафрагменного разряда в вакууме // Оптический журнал. 2009. Т. 76, № 9. С. 76–81.
7. Калашников Е. В. Радиальное распределение давления в струе плазмы сильнооточного диафрагменного разряда в вакууме // ТВТ. 1996. Т. 34, № 4. С. 501–505.
8. Калашников Е. В. Способ получения ударно сжатого слоя плазмы и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2590893 с приор. от 18.12.2014. Кл. МПК-H05H1/42; B64G700.
9. Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. Л.: Машиностроение, 1985. 264 с.
10. Прикладная аэродинамика / Под ред. Краснова Н. Ф. М.: Высшая школа, 1974. 732 с.
11. Грим Г. Спектроскопия плазмы. М.: Атомиздат, 1969. 452 с.
12. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. М., 1971. 552 с.
13. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
14. Лапин Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1982. 312 с.
15. Прутько К. А. Неравновесное излучение воздуха при больших скоростях полёта спускаемых аппаратов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. ЦНИИМаш. Королёв, 2018.
16. Суржигов С. Т. Компьютерная аэрофизика спускаемых космических аппаратов. Двухмерные модели. М.: Физматлит, 2018. 543 с.

Об авторах

Калашников Евгений Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: оптика, спектроскопия низкотемпературной плазмы, источники излучения высокой интенсивности на основе эрозивной плотной плазмы, методы диагностики быстропротекающих процессов, радиационная магнитная плазмотермодинамика, исследование гетерофазных сред на основе наночастиц и фракталоподобных структур, экспериментальное моделирование и исследование воздействия факторов околоземного космического пространства на оптические материалы.

Павлов Николай Ильич – доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: создание пеленгационных оптических систем, программно-алгоритмические комплексы имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем наблюдения; исследования характеристик лазерных помех на ИК оптико-электронные системы наблюдения.

Бородин Владимир Григорьевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: оптика, наведение и фокусировка пикосекундного лазерного излучения на малоугловые объекты через атмосферу; формирование распределения интенсивности на облучаемых объектах.

Коленчиков Константин Константинович – ведущий инженер, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация. Область научных интересов: оптико-механическое оборудование с высокой точностью позиционирования, юстировка оптических систем.



Комаров Владимир Михайлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов – взаимодействие высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом; высоковакуумное оборудование.

Малинов Владимир Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: генерация пикосекундных лазерных импульсов, юстировка оптических систем, исследование телевизионных камер ИК- и УФ-диапазонов спектра.

Мигель Вячеслав Михайлович – старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: электронные системы управления; программное обеспечение.

Попиков Владимир Сергеевич – старший научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: лазерная техника, физика и техника высоковольтных источников электропитания, радиоэлектроника, лазерная резка металлов.

Чарухчев Александр Ваникович – кандидат технических наук, начальник лаборатории, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (АО «НИИ ОЭП»), г. Сосновый Бор, Российская Федерация.

Область научных интересов: лазерная физика; взаимодействие излучения с веществом; разработка лазерно-оптических систем.

Luminescence of the shock-compressed layer produced by a plasma flow around the body, using a jet diaphragm discharge

Kalashnikov E. V., Pavlov N. I., Borodin V. G., Kolenchikov K. K., Komarov V. M.,
Malinov V. A., Migel V. M., Popikov V. S., Charukhchev A. V.

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering ("NII OEP" JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation

The objective of the study is physical simulation and acquisition of experimental data on luminescence of the shock-compressed layer (SCL) and airglow typical of high-velocity objects, using a method for producing a high-velocity flow around the model body based on a jet diaphragm discharge. This paper describes a multi-channel system designed for diagnostics of the SCL that is produced by free-stream erosive plasma flowing around the model body at a velocity ranging from 4 to 50 km/s in low atmospheric pressure conditions. The study findings show that a set of implemented optical and spectral methods allows to diagnose the flow around the model body and to record images of the SCL structure near the front part of the model body as well as SCL radiation spectra.

Keywords: shock-compressed layer, jet diaphragm discharge, erosive plasma



Information about the authors

Kalashnikov Evgeny Valentinovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation.

Science research interests: optics, low-temperature plasma spectroscopy, high-intensity radiation sources based on erosive dense plasma, methods of fast process diagnostics, radiation magnetoplasma dynamics, study of heterophase media based on nanoparticles and fractal-like structures, experimental simulation and study of the influence of near-Earth space factors on optical materials.

Pavlov Nikolay Ilyich – Doctor of Engineering Sciences, Deputy General Director in Science, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: development of direction finding optical systems, simulation software systems for research and development of optoelectronic observation systems, analysis of characteristics of laser jamming affecting IR optoelectronic observation systems.

Borodin Vladimir Grigorievich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: optics, pointing and focusing picosecond laser radiation on small-angle objects through the atmosphere, forming the intensity distribution on irradiated objects.

Kolenchikov Konstantin Konstantinovich – Lead Engineer, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: optical-mechanical equipment with high positioning accuracy, adjustment of optical systems.

Komarov Vladimir Mikhailovich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: interaction of high-intensity laser radiation with matter, high vacuum equipment.

Malinov Vladimir Aleksandrovich – Candidate of Engineering Sciences, Lead Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: picosecond laser pulse generation, adjustment of optical systems, study of IR and UV television cameras.

Migel Vyacheslav Mikhailovich – Senior Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: electronic control systems, software.

Popikov Vladimir Sergeevich – Senior Researcher, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: laser technology, physics and technology of high-voltage power supply sources, radio electronics, laser cutting of metals.

Charukhchev Aleksandr Vanikovich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Laboratory, “Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering” (“NII OEP” JSC), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russian Federation. Science research interests: laser physics, interaction of radiation with matter, development of laser optical systems.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-66-80>

УДК 519.237.5

Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6

А. Н. Ефремов

Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования
«Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей»
им. академика В. П. Ефремова», Москва, Российская Федерация

Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, Екатеринбург»,
Российская Федерация

В работе решена задача построения регрессионной модели зависимости толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 от различных технологических параметров процесса анодирования комплексно. Установлено, что ключевыми факторами являются плотность тока, температура и время анодирования. Получена эмпирическая формула, описывающая зависимость толщины покрытия от технологических параметров. Проведена оценка качества построенной модели и представлена графическая интерпретация результатов. Средняя ошибка аппроксимации составила 7,032 %.

Ключевые слова: регрессионная модель, толщина покрытия, сплав АМг6, анодное окисление в серной кислоте, технологические параметры анодирования

Для цитирования: Ефремов А. Н. Математическая модель прогнозирования толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 66–80. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-66-80>

For citation: Yefremov A. N. Mathematical model for predicting the thickness of the anodic oxide coating on AMg6 aluminum alloy // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 66–80. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-66-80>

Поступила 15.01.2023 Отрецензирована 01.02.2023 Одобрена 25.03.2023 Опубликована 14.06.2023

Введение

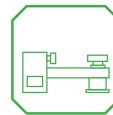
Среди известных методов обработки алюминия и его сплавов для защиты от коррозии наиболее распространено анодное окисление. Преимуществами данного способа являются доступность и относительная дешевизна, кроме того, данный метод позволяет эффективно решать задачи придания поверхности деталей требуемой декоративности, коррозионных и эксплуатационных свойств [1].

Различают [2] анодное окисление в водных растворах электролитов, в расплавленных солях, в газовой плазме, плазменно-электролитическое и его разновидность – микродуговое окисление. Наиболее

универсальным и распространенным методом, легко поддающимся автоматизации и не требующим использования дорогостоящего специального оборудования, является анодное окисление в водных растворах электролитов.

В основе современных технологий окисления алюминия лежат классические работы отечественных и зарубежных исследователей, изучивших основные закономерности кинетики роста оксидных пленок на поверхности алюминия [1–5].

В мировой промышленной практике получили применение три вида окисления в растворах электролитов: в серной, хромовой и щавелевой кислотах [1–5]. В отечественной промышленности, в том числе и в ПАО «Машиностроительный завод



им. М. И. Калинина, г. Екатеринбург» (далее – ПАО МЗИК), наибольшее распространение находит анодное оксидирование в растворе серной кислоты. Данный способ более экономичен и прост в реализации, дает возможность применения и постоянного, и переменного тока, образует оксидные покрытия, обладающие высокими адсорбционными свойствами к лакокрасочным, теплозащитным и другим видам покрытий.

Основное внимание современных исследователей уделяется вопросам управления морфологией покрытий при их получении, позволяющей расширить области применения покрытий, и изучению поведения новых сплавов алюминия при оксидировании [6–14].

В частности, нанопористые пленки матрицы оксида алюминия с удаленным барьерным слоем и высокоупорядоченной структурой цилиндрических пор, расположенных параллельно друг другу и перпендикулярно горизонтальной поверхности, получены двух- или трехстадийным анодным окислением высокочистого алюминия [7–13]. Применение различных электролитов и варьирование технологическими параметрами позволяет управлять диаметром пор, расстоянием между порами и толщиной покрытия [11]. Например, при обработке чистого алюминия в серной кислоте получены поры диаметром 30–35 нм и диаметром описанной окружности шестигранной ячейки 90 нм [12].

Одним из ценных свойств оксидной пленки, получаемой анодным оксидированием алюминиевых сплавов, является высокая электроизолирующая способность. Данный параметр можно повысить введением в состав электролита органических добавок или гидролизующихся солей, снижающих содержание в пленке как адсорбированной, так и химически связанной воды [15]. Добавка в сульфатный электролит поверхностно-активных веществ увеличивает эластичность покрытий, формируемых на сплаве АМг2, уменьшает твердость с 550 до 362 кг/мм², сохраняя электроизоляционные характеристики оксидной пленки [16].

Несмотря на многочисленность экспериментальных исследований влияния

факторов процесса оксидирования на свойства оксидных покрытий, в большинстве из них представлены лишь практические рекомендации по достижению оптимальных режимов, которые оказываются неработоспособными при изменении технологических условий. Данный аспект обуславливает необходимость создания адекватных математических моделей, значительно облегчающих поиск оптимального технологического режима получения оксидных пленок с заданными свойствами.

Ряд современных исследований направлен на моделирование свойств анодно-окисных покрытий в зависимости от различных технологических параметров ведения процесса анодного оксидирования [17–35].

Gösele и соавторы показали, что для алюминия отношение общей толщины оксидного покрытия к глубине травления металла, называемого «объемным расширением», близко к 1,4 для упорядоченных пленок, выращенных в различных электролитах [17].

Врублевский и др. изучали объемное расширение алюминия при образовании пористого оксида в гальваностатическом режиме [18]. Они показали, что объемное расширение оксида алюминия линейно зависит от напряжения анодирования для пленок, образующихся при комнатной температуре в серной кислоте, и варьируется от 1,35 до 1,63 при напряжении анодирования от 13 до 24 В. По мнению авторов, на объемное расширение оксида алюминия влияет включение сульфат-иона в оксидное покрытие из электролита [19].

В работе [20] изучено влияние параметров анодирования, таких как напряжение, ток и время анодирования, температура электролита и состав электролита, на объемное расширение анодированных тонких пленок Al, Al-1%Si и Al-1%Cu. Обнаружено, что коэффициент объемного расширения анодного пористого оксида алюминия варьируется от 1,32 до 2,08 в зависимости от напряжения анодирования, плотности анодирующего тока и типа электролита. Установлено, что соотношение между плотностью пор пористого оксида алюминия и напряжением анодирования соответствует соотношению: $N_p = 9,4 \times 10^{10} \exp(-0,042V)$,



где N_p – плотность пор, см^{-2} ; V – напряжение, В. Кроме того, было определено, что выход по току во время анодирования составлял около 83 %.

В работе [21] исследована зависимость коэффициента объемного расширения, выхода по току анодирования при анодировании алюминиевой фольги (99,99 %) методом низкотемпературного гальваностатического анодирования в водных растворах серной кислоты. Показано, что скорость гальваностатического анодирования увеличивается пропорционально плотности анодного тока, а снижение концентрации кислоты не оказывает существенно влияния на скорость анодирования. Данные [23] свидетельствуют, что пористость и толщина покрытия зависят от времени анодирования и типа электролита.

Patermarakis и соавторы [24–26] изучали процесс анодного оксидирования алюминия в серной кислоте при температуре 25 °C и напряжении 23,615 В, время оксидирования – до 180 мин. Показано, что масса покрытия и ее толщина увеличиваются со временем анодирования. Получены математические зависимости диаметра и плотности пор, расстояния между порами от напряжения анодирования.

Кроме исследований толщины и морфологии анодно-окисных покрытий на алюминии встречаются работы, посвященные моделированию таких важных характеристик, как износостойкость и коррозионная стойкость [23, 30], внутренние напряжения внутри покрытия [24], микротвердость [30], равномерность покрытия [32–35].

Актуальность и практическая значимость

Несмотря на большой объем данных по моделированию влияния различных факторов на свойства окисных покрытий, существующие модели сложно применить в производственных условиях. Во-первых, вышеупомянутые модели получены на чистом алюминии, редко используемом при производстве деталей в машиностроении, что ограничивает их применение. Во-вторых, данные модели получены в лабораторных (близких к идеальным) условиях,

которые значительно отличаются от производственных, в частности, чистота используемых реактивов, геометрический фактор, распределение электрических и тепловых полей и т.д.

В промышленных условиях весьма проблематично и экономически неоправданно подобрать рациональные и экономичные режимы нанесения покрытий, поэтому разработка комплексной математической модели прогнозирования качества (далее – ММПК) покрытий при различных условиях производства является целесообразной при выборе технологических режимов. Создание данной модели позволит снизить затраты на этапах подготовки производства и эксплуатации, а также минимизировать риски, связанные с появлением брака [36, 37].

Постановка задачи

Основными факторами, предопределяющими структуру и толщину анодно-окисных покрытий, формируемых в растворе серной кислоты, являются концентрация кислоты, температура раствора и плотность тока. Данные параметры определяют отношение скоростей образования оксида и его растворения, обеспечивая заданную толщину покрытия [1].

Согласно ГОСТ 9.301-86 толщина анодно-окисных покрытий должна соответствовать требованиям конструкторской документации [38]. Однако в чертежах согласно ГОСТ 9.306-85 конкретная толщина задается для твердых и износостойких покрытий, а для покрытий по шифрам Ан.Окс, Ан.Окс.нхр и окрашенных покрытий толщина не нормирована [39]. Несмотря на это, толщина – важная характеристика, предопределяющая конечный размер детали, что сказывается на последующих сборочных операциях.

В работах [36, 37] представлена архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, разработанная методами модельно-ориентированного инжиниринга. На рисунке 1 представлена диаграмма связей факторов, влияющих на процесс анодного оксидирования алюминия и его сплавов

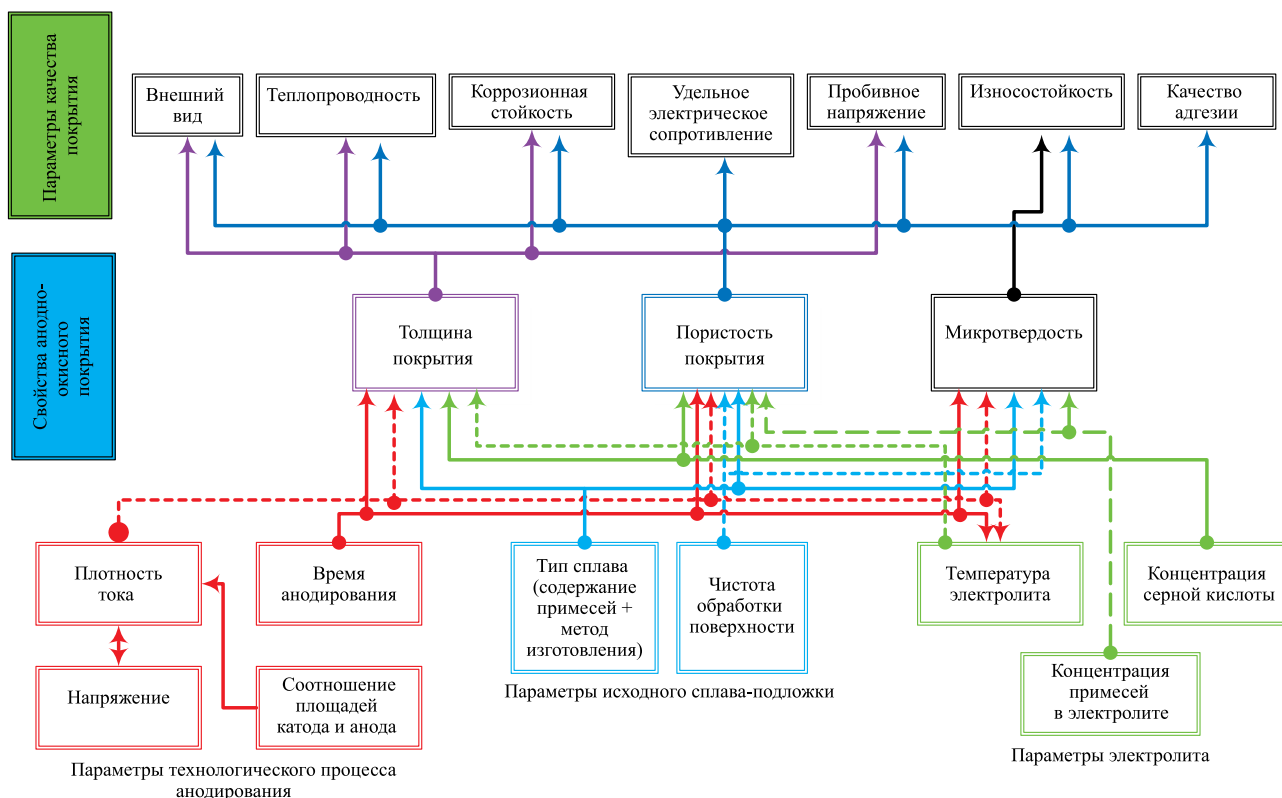
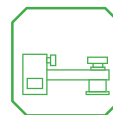


Рис. 1. Диаграмма связей определяющих факторов анодного оксидирования алюминия и его сплавов в растворе серной кислоты, свойств получаемых покрытий и их параметров качества

в растворе серной кислоты, со свойствами получаемых покрытий и их параметрами качества. Диаграмма связей наглядно показывает определяющие факторы не только для отдельного свойства покрытия или его качественной характеристики, но и для всего процесса анодирования в целом.

Анализ диаграммы связей позволил установить, что на все параметры качества оказывают влияние только три свойства оксидной пленки: толщина, пористость и микротвердость.

Настоящая статья является продолжением работ по созданию комплексной ММПК анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах при различных условиях производства.

В данной работе проведено математическое моделирование толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 с помощью пакета *MS Excel*. Показано, каким образом в производственных условиях можно контролировать рост анодно-окисного покрытия (увеличение толщины) в процессе анодирования.

Экспериментальная часть

Исследование выполнялось для процесса электрохимического оксидирования (анодирования) алюминиевого сплава АМг6 в сернокислом электролите. Изучалось влияние таких факторов, как плотность тока i_a , время анодирования τ , температура T и концентрация серной кислоты в электролите C_k , а также шероховатость поверхности Ra деталей на толщину анодно-окисного покрытия. На практике в большинстве случаев изменение исследуемого параметра зависит комплексно от нескольких факторов. В данной работе представлено построение эмпирического уравнения зависимости толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 $\delta = f(i_a, \tau, T, C_k, Ra)$ на основе натурных экспериментов на полуавтоматической линии анодирования на ПАО МЗИК.

В таблице 1 представлен журнал планирования эксперимента процесса анодирования, где пределы значений контролируемых параметров определены на основе технологического процесса анодирования.

Натурные эксперименты проводились на полуавтоматической линии анодирования



Таблица 1

Планирование эксперимента процесса анодирования

Контролируемые параметры	i_a , А/м ²	τ , ч	T , К	C_k , г/л	Ra
Верхний предел	200	0,67	284	200	3,20
Нижний предел	50	0,42	294	180	0,16
Рабочее значение	100	0,5	291	195	1,00

Таблица 2

Технологические режимы и состав раствора для снятия анодно-окисного покрытия

Состав раствора, г/л	Фосфорная кислота H_3PO_4	32–37
	Хромовый ангидрид CrO_3	20–25
Температура, К	363–373	
Время, мин	³ 10	

гальванического участка ПАО МЗИК. Контрольные образцы размером 100×50 мм и толщиной 2 мм из неплакированного алюминиевого сплава АМг6 в количестве 3 штук монтировались совместно с деталями на разные штанги в различные места ванны анодирования. Перед процессом анодирования проводился анализ электролита на содержание серной кислоты [40] и замер шероховатости поверхности образцов при помощи профилометра. В процессе анодирования проводился автоматический контроль температуры, силы тока и времени анодирования при постоянном напряжении (потенциостатический режим анодирования).

Толщину покрытия на образцах определяли гравиметрическим методом. После анодирования контрольные образцы высушивались при температуре 60–70 °С в течение 30 минут и после остывания взвешивались на аналитических весах с точностью до четвертого десятичного знака. Затем снимали с образцов покрытие в условиях, представленных в таблице 2.

Отсутствие покрытия на образцах определяли методом капли [41]. В нескольких местах на образец наносились капли испытательного раствора (раствор № 34 [41]). Признаком отсутствия покрытия является мгновенное изменение цвета капли от оранжевого до зеленого.

После снятия покрытия образцы промывались водой, высушивались и вновь взвешивались. По разности массы образцов после анодирования и после снятия покрытия рассчитывалась масса анодного покрытия.

Толщина покрытия определялась по формуле [41]:

$$\delta = \frac{0,1 \cdot P_{cp} \cdot 1,4}{3,42} = 0,04 \cdot P_{cp}, \quad (1)$$

где δ – толщина покрытия мкм; P_{cp} – средняя масса покрытия на 1 дм² поверхности, мг; 1,4 – поправочный коэффициент к плотности покрытия; 0,1 – коэффициент; 3,42 – плотность покрытия, г/см³.

Моделирование в MS Excel

На основе полученных экспериментальных данных строили модель множественной линейной регрессии на основе анализа матрицы парных коэффициентов корреляции в MS Excel. Последовательность выполненных операций представлена далее.

Получены результаты измерений силы тока, температуры, времени анодирования, концентрации серной кислоты в электролите, и дополнительно – шероховатости поверхности, которые выступали в качестве факторов (независимых переменных). В качестве функции отклика (зависимой переменной) – толщина анодно-окисного покрытия. В таблице 3 представлены усредненные экспериментальные данные, полученные в сериях экспериментов при различных технологических условиях.

По полученным экспериментальным данным строилась матрица парных коэффициентов корреляции для всех переменных. Для этого в пакете MS Excel последовательность действий следующая: «Данные» – «Анализ данных» – «Корреляция». В результате получаем матрицу парных коэффициентов корреляции переменных (табл. 4).

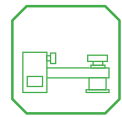


Таблица 3

Экспериментальные данные

Номер наблюдения	δ , мкм	i_a , А/м ²	T , К	τ , ч	Ra	C_k , г/л
1	4,62	50,2	286	0,5	0,44	193
2	6,74	67,0	291	0,5	1,55	195
3	6,23	67,0	291	0,5	3,03	195
4	5,83	73,0	284	0,5	1,73	198
5	5,66	73,0	284	0,5	0,85	198
6	6,55	83,0	288	0,5	1,45	197
7	5,90	83,0	288	0,5	0,85	197
8	6,89	85,3	294	0,5	0,50	195
9	6,33	87,5	290	0,5	1,73	191
10	10,01	89,0	293	0,67	2,97	193
11	10,84	89,0	293	0,67	3,25	193
12	6,56	103,0	292	0,5	0,43	197
13	7,69	111,2	288	0,5	0,53	198

Таблица 4

Матрица парных коэффициентов корреляции переменных

	δ , мкм	i_a , А/м ²	T , К	τ , ч	Ra	C_k , г/л
δ , мкм	1					
i_a , А/м ²	0,504	1				
T , К	0,630	0,369	1			
τ , ч	0,904	0,205	0,478	1		
Ra	0,636	-0,088	0,364	0,700	1	
C_k , г/л	-0,302	0,241	-0,497	-0,452	-0,454	1

На следующем этапе проверяется значимость коэффициентов корреляции между функцией отклика и каждой независимой переменной. Анализ первого столбца представленной матрицы позволяет произвести отбор факторных признаков, которые могут быть включены в модель множественной корреляционной зависимости. Факторные признаки с коэффициентами $|r_{ij}| < 0,5$ из модели исключаются. Поэтому в данной выборке значимыми являются плотность тока, время, температура анодирования и шероховатость поверхности. В данном конкретном случае из модели исключается концентрация серной кислоты. Это обусловлено рядом причин.

Согласно литературным данным [1–4] концентрация кислоты, наряду с температурой и плотностью тока, являются основными факторами, определяющими толщину и структуру анодно-окисных покрытий. Скорость образования покрытия при постоянной плотности тока не изменяется в процессе оксидирования, но скорость травления оксида при этом растет. Это обусловлено

значительным тепловыделением при прохождении тока через барьерный слой. Теплота выделяется в глубине пор, поэтому температура электролита в порах и температура самой детали значительно возрастают.

Выделение тепла увеличивается с ростом плотности тока и временем анодирования. Рост температуры электролита в порах покрытия повышает его агрессивность и приводит к усиленному стравливанию покрытия с поверхности (т.е. уменьшению толщины покрытия) и растравливанию стенок пор (т.е. к увеличению пористости покрытия). Считается, что при анодировании в 15%-ном растворе серной кислоты при 21 °С и плотности тока 1,29 А/дм² условия, создающиеся на дне пор, соответствуют 53%-му раствору серной кислоты при температуре близкой к кипению (около 128 °С) [43], а температура анода повышается на 10–20 °С в зависимости от условий ведения процесса оксидирования [44, 45].

Скорость химического растворения анодного покрытия сравнительно велика, особенно в агрессивных растворах серной кислоты.

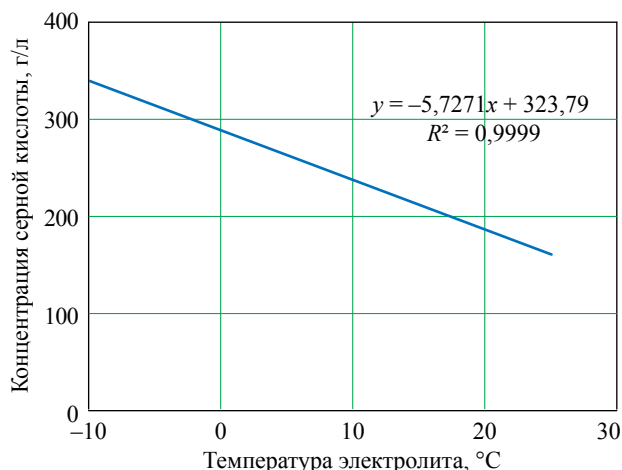


Рис. 2. Выбор оптимальной концентрации серной кислоты в сульфатном электролите анодирования алюминиевых сплавов в зависимости от температуры [1]

При увеличении концентрации серной кислоты с 180 до 350 г/л скорость растворения увеличивается примерно на 15 % [1].

Таким образом, рост температуры, увеличивая агрессивность электролита, способствует снижению толщины анодно-окисных покрытий и увеличению их пористости, причем тем в большей степени, чем выше концентрация серной кислоты.

Чтобы снизить локальный перегрев электролита в порах, применяют перемешивание электролита сжатым очищенным воздухом.

Таблица 5

Регрессионная статистика

Множественный R	0,998
R^2	0,996
Нормированный R^2	0,884
Стандартная ошибка	0,540
Наблюдения	13

Для сведения к минимуму влияния растравливающего действия кислоты следует подбирать ее оптимальную концентрацию. Оптимальная концентрация серной кислоты в зависимости от температуры сульфатного электролита может быть подобрана согласно графику, приведенному на рисунке 2. Допустимо отклонение на ± 15 г/л от оптимальной концентрации [1].

Учитывая, что по технологическому процессу анодного оксидирования алюминиевых сплавов, применяемому в ПАО МЗиК, рабочий интервал концентраций серной кислоты в электролите составляет 180–200 г/л, температура электролита 15–25 °C и применяется перемешивание сжатым воздухом в ванне анодирования, влияние таких факторов, как локальный перегрев и агрессивность электролита, сведено к минимуму. Кроме того, во время проведения исследований наблюдается незначительное изменение концентрации кислоты (табл. 1). Все вышеизложенные тезисы и обуславливают исключение концентрации серной кислоты из математической модели в данном конкретном случае.

Для оценки регрессионного уравнения в пакете *MS Excel* последовательность действий следующая: «Данные» – «Анализ данных» – «Регрессия». Результирующие характеристики регрессионной модели представлены в таблицах 5, 6.

Таким образом, полученное уравнение регрессии для определения толщины анодно-окисного покрытия имеет следующий вид:

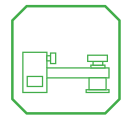
$$\delta = 0,042i_a - 0,024T + 18,81\tau + 0,33Ra, \quad (2)$$

Таблица 6

Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	4	654,110	163,528	560,034	$7,995 \times 10^{-10}$
Остаток	9	2,628	0,292	-	-
Итого	13	656,738	-	-	-

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
Y-пересечение	0	-	-	-	-	-
i_a , А/м ²	0,042	0,011	3,941	0,003	0,018	0,066
T , К	-0,024	0,006	-4,070	0,003	-0,037	-0,011
τ , ч	18,810	3,745	5,022	0,001	10,337	27,282
Ra	0,330	0,223	1,485	0,172	-0,173	0,834



где δ – толщина покрытия мкм; i_a – анодная плотность тока, А/м²; T – температура электролита, К; τ – время анодирования, ч; Ra – шероховатость поверхности.

Коэффициент детерминации R^2 (R -квадрат) показывает долю объясненной вариации (разброса) функции отклика δ относительно своего среднего. Он используется для предварительной оценки качества модели и как основа для расчета других показателей (например, F -теста для проверки качества уравнения регрессии). В данной модели $R^2 = 0,996$ означает, что 99,6 % вариации δ – толщины анодно-окисного покрытия – объясняется четырьмя факторами, включенными в модель (температура электролита, плотность тока и время анодирования, шероховатость поверхности).

Параметр P -значение используется для оценки статистической значимости коэффициентов регрессии. Если P -значение меньше заданного уровня значимости α , то коэффициент является значимым на этом уровне значимости. В противном случае коэффициент незначим на данном уровне значимости α [46].

P -значения коэффициентов при независимых переменных i_a и τ , равные 0,003, значимы при заданном уровне значимости, т.к. P -значение для этих коэффициентов меньше $\alpha = 5\% = 0,05$. Аналогично коэффициент при τ , равный 18,810, значим на уровне значимости $\alpha = 0,05$, так как его P -значение = 0,001 < 0,05. Из таблицы 6 видно, что P -значение равно 0,172 для шероховатости поверхности, что больше заданного уровня значимости $\alpha = 0,05$. Это означает, что коэффициент регрессии незначим и данную переменную можно исключить из уравнения регрессии. Еще один признак: если значение «ноль» лежит внутри доверительного интервала (построенного для заданного уровня значимости α), то коэффициент регрессии является незначимым при данном уровне значимости α . В противном случае коэффициент значим на данном уровне значимости α .

Чтобы проверить значимость коэффициентов регрессии с применением t -статистик, нужно расчетные значения статистик (табл. 6) сравнить с критическим значением статистики Стьюдента ($t_{\text{крит}}$) для заданного

уровня значимости α и степенями свободы равными $n - k$, где n – количество наблюдений, по которым оценены параметры регрессии, k – количество коэффициентов, оцененных в уравнении регрессии [46].

В регрессионной модели (2) приведена оценка четырех коэффициентов: коэффициенты при переменных i_a , T , τ , Ra , т.е. $k = 4$. Количество наблюдений, по которым оценены параметры регрессии, равно 13 (т.е. $n = 13$). Уровень значимости α принимаем равным 5 %.

Критическое значение t -статистики в пакете *Excel* рассчитывается с помощью функции СТЬЮДРАСПОБР. В нашем случае $t_{\text{крит}}$ для $\alpha = 0,05$ и степеней свободы $n - k = 13 - 4$ задаем выражением = СТЬЮДРАСПОБР(0,05; 13 – 4) = 2,262.

Как видно из таблицы 6, t -статистики по модулю независимых переменных i_a , τ и T больше $t_{\text{крит}} = 2,262$ (t -статистика коэффициента при $i_a = 3,941 > t_{\text{крит}} = 2,262$; t -статистика коэффициента при $\tau = 5,022 > t_{\text{крит}} = 2,262$; t -статистика коэффициента при $T = |-4,070| > t_{\text{крит}} = 2,262$), поэтому для этих коэффициентов отклоняем нулевые гипотезы о незначимости коэффициентов регрессии (2) и заключаем, что эти коэффициенты регрессии (2) являются значимыми на 5%-ном уровне значимости. t -статистика независимой переменной $Ra = 1,485 < t_{\text{крит}} = 2,262$, поэтому для нее принимаем нулевую гипотезу о незначимости этого коэффициента.

Для проверки гипотезы о значимости уравнения в целом в таблице «Дисперсионный анализ» (табл. 6) представлена статистика Фишера F . В столбце df указаны степени свободы статистики: значение $k - 1$ выведено в строке «Регрессия», $n - k$ в строке «Остаток». В нашем случае расчетное значение статистики Фишера равно $F(k - 1, n - k) = F(4, 9) = 560,034$. Для принятия решения о значимости уравнения регрессии в целом необходимо сравнить расчетное значение F -статистики с ее критическим значением ($F_{\text{крит}}$). При этом если расчетное значение $F > F_{\text{крит}}$, то нулевая гипотеза о незначимости уравнения регрессии в целом отклоняется и делается вывод, что уравнение регрессии в целом значимо. Вывод о значимости и незначимости уравнения регрессии



принимается на заданном уровне значимости α (в нашем случае 5 %), именно для этого уровня значимости указывается $F_{\text{крит}}$. В *Excel* критическое значение статистики Фишера рассчитывается с помощью функции *FRASПОБР*. Расчетная F -статистика находится из уравнения:

$$F = \frac{RSS/(k-1)}{ESS/(n-k)} = F_{\text{расч}}, \quad (3)$$

где F – статистика Фишера; $(k-1)$ – степени свободы числителя; $(n-k)$ – степени свободы знаменателя; ESS – сумма квадратов остатков, т.е. не объясненная регрессией вариация отклика относительно его среднего значения (в таблице 6 значение ESS указано в колонке SS , строке «Остаток»); RSS – объясненная регрессией вариация функции отклика относительно его среднего значения (в таблице 6 значение RSS указано в колонке SS , строке «Регрессия»); $F_{\text{расч}}$ – расчетная статистика Фишера.

Таким образом, расчетная статистика Фишера равная $F(k-1, n-k) = F(4,9) = 560,034 > F_{\text{крит}} = 3,633$, поэтому нулевая гипотеза о незначимости в целом уравнения регрессии отклоняется, и делаем вывод о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 7

Регрессионная статистика

Множественный R	0,998
R^2	0,995
Нормированный R^2	0,894
Стандартная ошибка	0,572
Наблюдения	13

Исключив независимую переменную Ra из модели, снова проводим регрессионный анализ. Результирующие характеристики уточненной регрессионной модели представлены в таблицах 7, 8.

Таким образом, уточненное уравнение регрессии для определения толщины анодно-окисного покрытия имеет следующий вид:

$$\delta = 0,037i_a - 0,028T + 22,837\tau, \quad (4)$$

где δ – толщина покрытия мкм; i_a – анодная плотность тока, А/м²; T – температура электролита, К; τ – время анодирования, ч.

Из таблицы 7 видно, что в уточненной модели коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$. Это означает, что 99,5 % вариации δ – толщины анодно-окисного покрытия – объясняется лишь тремя факторами уточненной модели (температура электролита, плотность тока и время анодирования).

P -значения всех коэффициентов при независимых переменных, равные 0,006; 0,000 и 0,000, значимы при заданном уровне значимости, т.к. они меньше $\alpha = 0,05$.

Как видно из таблицы 8, t -статистики по модулю всех независимых переменных больше $t_{\text{крит}} = 2,228$, поэтому для всех коэффициентов отклоняем нулевые гипотезы о незначимости коэффициентов регрессии (4) и заключаем, что эти коэффициенты регрессии являются значимыми на 5%-ном уровне значимости.

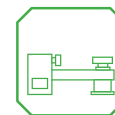
Статистика Фишера равна $F(k-1, n-k) = F(2,10) = 665,792 > F_{\text{крит}} = 4,103$, что говорит о статистической значимости уравнения регрессии в целом на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 8

Дисперсионный анализ

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	653,467	217,822	665,792	$7,0 \times 10^{-11}$
Остаток	10	3,272	0,327	-	-
Итого	13	656,738	-	-	-

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t -статистика	P -значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %
У-пересечение	0	-	-	-	-	-
i_a , А/м ²	0,037	0,011	3,456	0,006	0,013	0,061
T , К	-0,028	0,005	-5,171	0,000	-0,040	-0,016
τ , ч	22,837	2,734	8,354	0,000	16,746	28,928



95%-ный доверительный интервал для коэффициента при независимой переменной i_a , равного 0,037, равен (0,013; 0,061), и поскольку ноль не принадлежит данному доверительному интервалу, следовательно коэффициент значим на 5 %-ном уровне значимости. i_a , T , τ , Ra .

Также коэффициент при объясняющей переменной T имеет 95%-ный доверительный интервал (–0,040; –0,016), в который не попадает значение «ноль», что говорит о статистической значимости коэффициента на 5%-ном уровне значимости.

В уточненной модели все коэффициенты регрессии статистически значимы на 5%-ном уровне значимости. Коэффициенты имеют ожидаемые, логически оправданные знаки. Интерпретация коэффициентов логична, имеет смысл.

Коэффициент при переменной i_a , равный 0,037, свидетельствует о том, что при росте плотности тока анодирования на 1 А/м² толщина анодно-окисного покрытия на детали из АМг6 в среднем увеличится на 0,037 мкм при неизменных температуре и времени анодного оксидирования. Данный результат подтверждают литературные данные [1–4], что при увеличении плотности тока возрастает и скорость нанесения покрытия (скорость формирования оксида).

Коэффициент при переменной T , равный –0,028, свидетельствует о том, что при увеличении температуры электролита на 1 К толщина

анодно-окисного покрытия в среднем снизится на 0,028 мкм при постоянстве плотности тока и времени анодного оксидирования. Данный результат хорошо согласуется с литературными данными: увеличение температуры электролита от 20 до 50 °С толщина покрытий снижается более чем в 10 раз [1].

Коэффициент при переменной τ , равный 22,837, говорит о том, что при увеличении времени анодирования на 1 ч толщина покрытия в среднем увеличится на 22,837 мкм при неизменных температуре электролита и плотности тока. Данный тезис вполне логичен: чем больше продолжительность анодного оксидирования, тем больше толщина формирующегося анодно-окисного покрытия.

Для оценки качества построенной модели рассчитывалась средняя ошибка аппроксимации по остаткам. Таблица остатков была получена в результате регрессионного анализа.

Расчет средней ошибки аппроксимации регрессионной модели производится по формуле:

$$\Delta = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)/y_i}{n}, \quad (5)$$

где Δ – средняя ошибка аппроксимации, y_i – фактическое значение функции отклика, $\hat{y}_i$ – предсказанное значение функции отклика, n – число наблюдений.

Результаты расчетов представлены в таблице 9.

Средняя ошибка аппроксимации регрессионной модели по остаткам составила

Таблица 9

Остатки и ошибка аппроксимации регрессионной модели, построенной в MS Excel

Наблюдение	Предсказанное δ , мкм	Остатки	Стандартные остатки	Ошибка аппроксимации, %
1	5,250	–0,630	–1,257	12,007
2	5,731	1,009	2,011	17,605
3	5,731	0,499	0,995	8,706
4	6,149	–0,319	–0,636	5,191
5	6,149	–0,489	–0,975	7,955
6	6,407	0,143	0,286	2,239
7	6,407	–0,507	–1,010	7,907
8	6,323	0,567	1,130	8,963
9	6,517	–0,187	–0,372	2,866
10	10,370	–0,360	–0,718	3,475
11	10,370	0,470	0,936	4,528
12	7,034	–0,474	–0,944	6,733
13	7,449	0,241	0,481	3,238
Средняя ошибка аппроксимации				7,032



7,032 %, что говорит об удовлетворительной точности построенной модели, поскольку не превышает 8–10 %.

Затем необходимо исследовать построенную модель на отсутствие мультиколлинеарности, т.е. проверить взаимосвязь факторов i_a , T , τ между собой. Для этого нужно построить матрицу парных коэффициентов независимых переменных, включенных в модель. В пакете *MS Excel* последовательность действий следующая: «Данные» – «Анализ данных» – «Корреляция». В таблице 10 представлена полученная матрица.

В уточненной регрессионной модели среди значений коэффициентов корреляционной матрицы между переменными нет значений близких к 1, поэтому можно сделать вывод об отсутствии мультиколлинеарности.

Обсуждение результатов

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация построенной модели и фактически полученных значений толщины анодно-окисного покрытия. Видно, что фактические значения хорошо согласуются с модельными данными. Погрешность прогнозных значений толщины не превышает 1 мкм.

В работе [47] с использованием многофакторного эксперимента получены математические зависимости скорости роста и плотности анодно-окисного покрытия на алюминии от температуры электролита (в интервале 5–20 °C), плотности анодного тока (в интервале 1–3 А/дм²) и концентрации серной кислоты (в интервале 140–160 г/л). Время анодирования составляло 90 минут для всех экспериментов.

В работе [48] представлены результаты исследований влияния температуры электролита (в интервале 21–35 °C), плотности анодного тока (в интервале 1–2 А/дм²), концентрации серной кислоты (15–20 мас.%) и времени

анодирования (в интервале 30–60 мин) на толщину и морфологию алюминиевых сплавов Al7075, Al2024 и Al6061. Как отмечают авторы [48], полученные данные согласуются с результатами работы [47]. Однако расчет толщины покрытия для сплава Al6061 (наиболее близкому по свойствам к сплаву АМг6) показал, что рассчитанная по модели толщина при плотности тока 1 А/дм², температуре электролита 21 °C, времени анодирования 30 мин и концентрации серной кислоты 15 мас.% составила 9,07 мкм. Фактическое измеренное значение составило 5,85 мкм, что на 35 % ниже значения модельного прогноза.

Для сравнения на основании представленной в настоящей работе модели рассчитана толщина анодно-окисного покрытия для сплава Al6061 при значениях параметров работы [48]. Толщина покрытия для сплава Al6061 составила 6,8 мкм. Погрешность модельного расчета в сравнении с фактическим значением составила около 1 мкм.

Заключение

В работе проведено математическое моделирование толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 с помощью пакета *MS Excel*. Получена эмпирическая формула, описывающая регрессионную зависимость толщины анодно-окисного покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 в зависимости

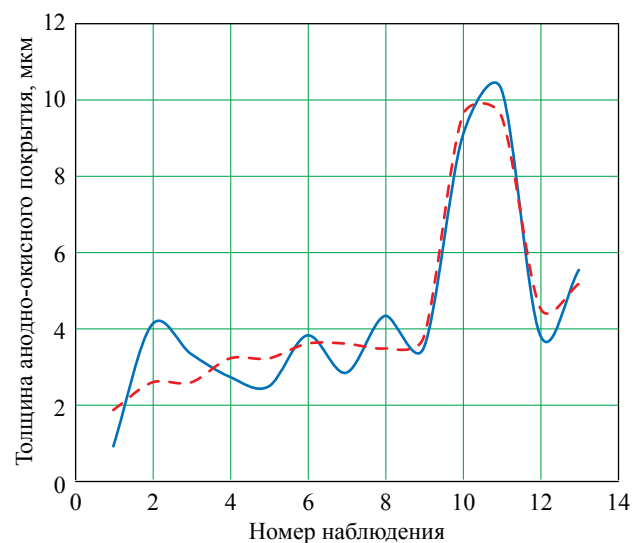
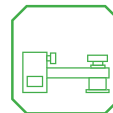


Рис. 3. Сравнение фактической толщины анодно-окисного покрытия с модельными значениями
— фактические значения; — — — модельный прогноз

Таблица 10

Матрица парных коэффициентов независимых переменных в *MS Excel*

	i_a , А/м ²	T , К	τ , ч
i_a , А/м ²	1		
T , К	0,369	1	
τ , ч	0,205	0,478	1



от технологических параметров процесса анодирования.

Показано, что определяющими параметрами для конкретного технологического процесса в определенной выборке являются плотность тока, температура и продолжительность анодирования.

Построенная модель может быть использована как составная часть комплексной математической модели для прогнозирования качественных характеристик анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах в зависимости от технологических параметров процесса анодирования.

Созданная на финальном этапе исследования компьютерная модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах [36, 37], которая будет включать в себя ситуационные данные реального производственного объекта, позволит создать виртуальный элемент цифрового двойника линии анодирования (далее – ЦД).

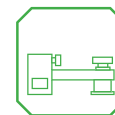
Виртуальный элемент ЦД – это цифровая модель объекта, способная воспроизводить геометрию, физико-химические свойства, поведение и правила, позволяющие оптимизировать поведение системы. В данном элементе ЦД сгенерированы такие технологии, как CAD-модели (3D твердотельное моделирование), моделирование физико-химических процессов, моделирование поведения объекта (создаваемая компьютерная модель), моделирование, основанное на правилах, анализ согласованности моделей, а также интеграция моделей [36, 37, 49].

Список литературы

1. Скопинцев В. Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 120 с.
2. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.
3. Гальванотехника. Справочник / Под ред. Гинберга А. М. М.: Металлургия, 1987. 736 с.
4. Хенли В. Ф. Анодное оксидирование алюминия и его сплавов. М.: Металлургия, 1986. 152 с.
5. Грилихес С.Я. Оксидные и фосфатные покрытия металлов. Л.: Машиностроение, 1985. 96 с.
6. Скопинцев В. Д., Марголин Л. Н., Фарафонов В. Л. Развитие технологии анодного оксидирования алюминия и его сплавов. Обзор публикаций за 2007–2018 гг. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27, № 2. С. 9–22.
7. Manzano C. V., Pethö L., Bürki G., Michler J., Philippe L., Ramos D. Controlling the color and effective refractive index of metal-anodic aluminum oxide (AAO)-Al nanostructures: morphology of AAO // Journal of physical chemistry C. 2018. Vol. 122, no. 1. P. 957–963.
8. Arysanova E. M., Alfimov A. V., Chivilikhin S. A. Model of porous aluminum oxide growth in the initial stage of anodization // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2013. Vol. 4, no. 5. P. 585–591.
9. Воробьева А. И., Уткина Е. А., Ходин А. А. Исследование механизма самоорганизации при формировании самоупорядоченной структуры пористого анодного оксида алюминия // Микроэлектроника. 2007. Т. 36, № 6. С. 437–445.
10. Garcia-Vergara S. J., Skeldon P., Thompson G. E., Habazaki H. Stress generated porosity in a anodic alumina for med in sulphuric acid electrolyte // Corros. Sci. 2007. Vol. 49, no. 10. P. 3772–3782.
11. Шипилов А. А. Пористый оксид алюминия. Перспективы и получение // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы», Оренбург, 23–25.10.2012. Оренбург, 2012. С. 392–394.
12. Щербаков А. И., Скворцова И. Б., Золотаревский В. И., Чернова Г. П., Машенко В. Е. Исследование процесса формирования нанопористого оксида при анодировании алюминия // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2009. Т. 45, № 1. С. 71–74.
13. Lee W., Park S. J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and template synthesis of functional nanostructures // Chemical reviews. 2014. Vol. 114, no. 15. P. 7487–7556.
14. Щербаков А. И., Оше Е. К., Скворцова И. Б., Чернова Г. П., Золотаревский В. И. Формирование нанопористых анодных пленок на чистом алюминии в серной кислоте // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Т. 47, № 2. С. 176–180.



15. Динабурская Л. З., Нечаев А. В., Нечаев А. А. Структура электроизоляционных оксидных покрытий на анодированном алюминии // Актуальные проблемы электрохимической технологии: сборник статей молодых ученых. Саратов: СГТУ, 2008. С. 182–184.
16. Тимина А. А., Динабурская Л. З., Нечаев А. В. Диэлектрические свойства анодного оксида алюминия, полученного в электролитах с добавками ПАВ // Современные проблемы теоретической и экспериментальной химии: 9 Всеросс. конф. молодых ученых, Саратов, сентябрь, 2013: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов, 2013. С. 13–17.
17. Li A.P., Müller F., Birner A., Nielsch K., Gösele U. Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 84. P. 6023–6026.
18. Vrublevsky I., Parkoun V., Sokol V., Schreckenbach J., Marx G. The study of the volume expansion of aluminum during porous oxide formation at galvanostatic regime // *Applied Surface Science*. 2004. Vol. 222, no. 1–4. P. 215–225.
19. Vrublevsky I., Parkoun V., Schreckenbach J., Marx G. Effect of the current density on the volume expansion of the deposited thin films of aluminum during porous oxide formation // *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 220, no. 1–4. P. 51–59.
20. Abd-Elnaiem A.M., Mebed A.M., Gaber A., Abdel-Rahim M.A. Effect of the anodization parameters on the volume expansion of anodized aluminum films // *International journal of electrochemical science*. 2013. Vol. 8, no. 8. P. 10515–10525.
21. Poznyak A.A., Pligovka A., Laryn T., Salerno M. Porous alumina films fabricated by reduced temperature sulfuric acid anodizing: morphology, composition and volumetric growth // *Materials*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 1–16.
22. Çapraz Ö.Ö., Hebert K.R., Shrotriya P., Skeldon P., Thompson G.E. Factors controlling stress generation during the initial growth of porous anodic aluminum oxide // *Electrochimica acta*. 2015. Vol. 159. P. 16–22.
23. Dervishi E., McBride M., Edwards R., Gutierrez M., et al. Mechanical and tribological properties of anodic Al coatings as a function of anodizing conditions // *Surface and coatings technology*. 2022. Vol. 444. Article 128652.
24. Patermarakis G. The multimodal dependence of anodic alumina film porous nanostructure on anodizing potential // *Current topics in electrochemistry*. 2020. Vol. 22. P. 1–17.
25. Patermarakis G., Triantis T.M. Transformation of porous nanostructure and self-ordering of anodic alumina films during potentiostatic anodising of aluminium // *Current topics in electrochemistry*. 2019. Vol. 21. P. 21–39.
26. Patermarakis G., Plytas J. A novel theory interpreting the extremes of current during potentiostatic anodizing of Al and the mechanisms of normal and abnormal growth of porous anodic alumina films // *Journal of electroanalytical chemistry*. 2016. Vol. 769. P. 97–117.
27. Torrescano-Alvarez J. M., Curioni M., Zhou X., Skeldon P. Effect of anodizing conditions on the cell morphology of anodic films on AA2024-T3 alloy // *Surface and interface analysis*. 2019. Vol. 51, no. 12. P. 1135–1143.
28. Elaish R., Curioni M., Gowers K., Kasuga A., Habazaki H., Hashimoto T., Skeldon P. Influence of fluorozirconic acid on sulfuric acid anodizing of aluminum // *Journal of the electrochemical society*. 2017. No. 164(13). P. 831–839.
29. Zhang Zh., Guo Y., Lu J., Li J., Ma Y., Liu T., Liang R., Sun R., Dong J. Utilizing cell culture assisted anodization to fabricate aluminium oxide with a gradient microstep and nanopore structure // *ACS Omega*. 2022. No. 7. P. 35668–35676.
30. Кусков В. Н., Коленчин Н. Ф., Шадрин П. Н., Сафронов А. В. Строение и свойства анодной оксидной пленки на алюминии и сплаве Д16 // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11-3. С. 625–629.
31. Чуфистов О. Е., Чуфистов Е. А., Артемьев В. П. Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // *Цветные металлы*. 2009. № 10. С. 57–61.
32. Соловьев Д. С. Нечеткая продукционная модель знаний для корректировки результатов математического моделирования и оптимизации гальванического процесса при его практической реализации // *Вестник МЭИ*. 2019. № 6. С. 115–123.
33. Лютов А. Г., Ишкулова А. Р. Моделирование процесса нанесения гальванических покрытий с учетом геометрических конфигураций



электродов // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 4(70). С. 45–48.

34. Литовка Ю. В., Денисов С. Ю. Расчет распределения гальванического покрытия по поверхности крупногабаритных деталей // Журнал прикладной химии. 2010. Т. 83, № 5. С. 789–793.

35. Соловьев Д. С., Соловьева И. А., Литовка Ю. В. Применение решения обратной задачи математического моделирования гальванического процесса для оптимизации неравномерности толщины покрытия // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2020. № 1(49). С. 131–143.

36. Ефремов А. Н. Создание архитектуры математической модели прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах. III Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участ. «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении», 6–8 апреля 2022 г.: сб. докладов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 99–102.

37. Ефремов А. Н. Архитектура математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах // Евразийский союз ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2022. Т. 1, № 10(103). С. 6–13.

38. ГОСТ 9.301-86. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования = Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. General requirements: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27.02.86 №424: дата введения 01.07.87. – М.: Стандартинформ, 2010. – 15 с.

39. ГОСТ 9.306-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Обозначения = Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Symbols: Государственный стандарт Союза ССР: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета

СССР по стандартам от 24.01.85 №164: дата введения 01.01.87 / разработан Академией наук Литовской ССР. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 17 с.

40. ОСТ 92-1479-78. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы анализа электролитов и растворов: отраслевой стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Инструктивным письмом №17 от 09.01.79: дата введения 01.10.79. – 429 с.

41. ПИ 1.2.616-2003. Серноокислотное анодное окисление алюминиевых сплавов: производственная инструкция: дата введения 01.10.79 / разработана ФГУП ВИАМ. – 50 с.

42. ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля Обозначения = Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coatings. Control methods: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.06.88 №2507: дата введения 01.01.90. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 38 с.

43. Hunter M., Fowle P. Factors affecting the formation of anodic oxide coatings // Journal of the electrochemical society. 1954. Vol. 101, no. 10. P. 514–519.

44. Федотьев Н. П., Грилихес С. Я., Зильберман В. Я. Глубокое анодирование алюминия при комнатной температуре // Журнал прикладной химии. 1960. Т. 33, № 5. С. 1133–1141.

45. Голубев А. И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 200 с.

46. Кеткина О. С. Возможности MS EXCEL для регрессионного анализа. Электронный текстовый ресурс. Екатеринбург, 2020. 43 с.

47. Bensalah W., Feki M., Wery M., Ayedi H. F. Thick and dense anodic oxide layers formed on aluminum in sulphuric acid bath // Journal of materials science and technology. 2010. No. 26(2). P. 113–118.

48. Abd El-Hameed A. M., Abdel-Aziz Y. A., El-Tokhy F. S. Anodic coating characteristics



of different aluminum alloys for spacecraft materials applications // Materials Sciences and Applications. 2017. No. 8. P. 197–208.

49. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

Об авторе

Ефремов Андрей Николаевич – аспирант 3-го года обучения автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз – Антей» им. академика В. П. Ефремова», Москва, Российская Федерация; начальник бюро технического контроля публичного акционерного общества «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, Екатеринбург», Российская Федерация.

Область научных интересов: математическое и компьютерное моделирование, электрохимическое производство, цифровые двойники.

Mathematical model for predicting the thickness of the anodic oxide coating on AMg6 aluminum alloy

Yefremov A. N.

Independent Non-profit Organization of Further Vocational Education “Science and Education Center of Aerospace Defense “Almaz – Antey” named after Academician V. P. Efremov, Moscow, Russian Federation

Technical Control Bureau, Public Joint Stock Company “Kalinin Machinery Plant, Yekaterinburg” (PJSC MZIK), Ekaterinburg, Russian Federation

The paper solves the problem of constructing a regression model of the dependence of the anodic oxide coating thickness on AMg6 aluminum alloy on various technological parameters of anodization. It is established that the key factors are current density, temperature and time of anodization. An empirical equation describing the dependence of the coating thickness on the technological parameters is obtained. The model quality is evaluated and a graphical interpretation of the results is presented. The average approximation error was 7.032 %.

Keywords: regression model, coating thickness, AMg6 alloy, anodic oxidation in sulfuric acid, technological parameters of anodization

Information about the author

Yefremov Andrey Nikolaevich – 3rd-year postgraduate, Independent Non-profit Organization of Further Vocational Education “Science and Education Center of Aerospace Defense “Almaz – Antey” named after Academician V. P. Efremov, Head of Technical Control Bureau, Public Joint Stock Company “Kalinin Machinery Plant, Yekaterinburg” (PJSC MZIK). Science research interests: mathematical and computer modelling, electrochemical production, digital twins.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-81-89>

УДК 621.396.96

Сравнение быстродействия методов решения задачи о назначениях при селекции в траекторной обработке

А. А. Соболев

Акционерное общество «НПК «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», Москва, Российская Федерация

В статье приводится практическое сравнение скорости работы методов решения задачи о назначениях: венгерского алгоритма, метода Мака и метода Джонкера – Волгенанта – Кастаньона. Приведены результаты сравнения на плотных и разреженных матрицах.

Ключевые слова: задача о назначениях, траекторная обработка, метод глобального ближайшего соседа, венгерский алгоритм, метод Мака, метод Джонкера – Волгенанта – Кастаньона

Для цитирования: Соболев А. А. Сравнение быстродействия методов решения задачи о назначениях при селекции в траекторной обработке // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 81–89. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-81-89>

For citation: Sobolev A. A. Performance comparison of the methods for solving the assignment problem in selection of tracking data processing // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 81–89. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-81-89>

Поступила 11.01.2023 Отрецензирована 17.02.2023 Одобрена 13.03.2023 Опубликована 14.06.2023

Введение

Траекторная обработка – это совокупность методов и средств, предназначенных для получения оценки траектории объекта путем обработки потока предварительных решений об обнаружении объекта (отметок). Под траекторией движущегося объекта понимается зависимость положения объекта от времени в принятой системе координат [1].

При этом важнейшим этапом траекторной обработки является этап отождествления отметок с траекториями, от качества которого, наряду с качеством траекторного фильтра, зависит успех всей обработки в целом.

Под отождествлением (идентификацией, селекцией) отметок с траекториями понимается принятие решения о принадлежности полученных на очередном обзоре отметок к той или иной траектории. Считается, что в наборе отметок присутствуют как целевые (отметки

от реальных объектов), так и помеховые отметки.

При большом числе поступивших отметок и траекторий на сопровождении проверка принадлежности по принципу «каждая отметка к каждой траектории» сопряжена с большими вычислительными затратами и, более того, избыточна. Поэтому предварительно выполняется операция стробирования, заключающаяся в проверке попадания отметок в область пространства (строб), выставленную вокруг экстраполированного на текущий такт работы алгоритма траекторной обработки положения траектории [1].

В общем случае ситуация, когда в область перекрытия стробов близко расположенных траекторий попадают несколько отметок, может быть проиллюстрирована рисунком 1.

В данном случае на рисунке 1 отметки 3–6 находятся в области перекрытия стробов. Для оптимального распределения отметок по траекториям в такой ситуации может

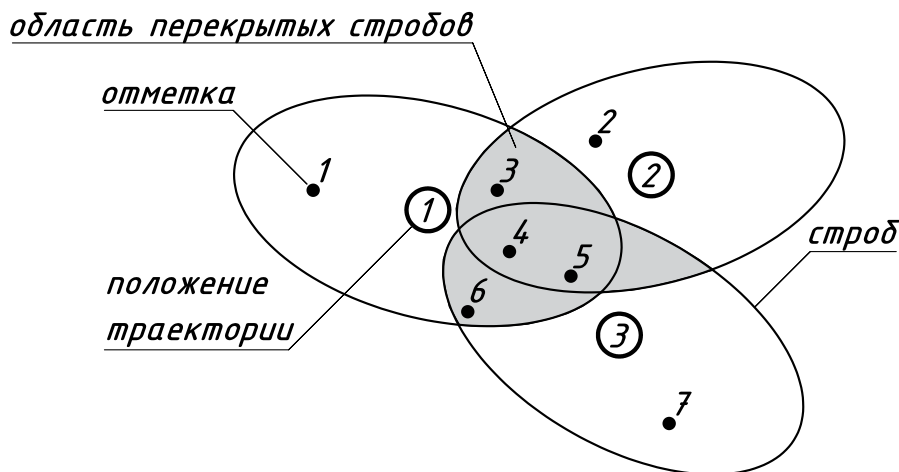


Рис. 1. Ситуация перекрытых стробов близко расположенных траекторий

быть использовано несколько подходов, один из которых получил название глобального ближайшего соседа (Global Nearest Neighbor – GNN [1]) и основан на решении транспортной задачи.

1. Транспортная задача

Сформулированная в [2] транспортная задача применительно к траекторной обработке может быть поставлена следующим образом: пусть имеется K отметок и L траекторий; назначение i -й отметки к j -й траектории характеризуется расстоянием между ними c_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, L$; требуется найти назначение отметок траекториям, дающее минимальное суммарное расстояние.

В траекторной обработке при селекции по методу GNN полагается, что каждая отметка может быть привязана только к одной траектории и каждая траектория может подтверждаться только одной отметкой. Таким образом, более общая транспортная задача сводится к частному случаю – стандартной линейной дискретной задаче, широко известной как задача о назначениях, которая обычно формулируется для квадратной матрицы порядка N [2].

Решение задачи о назначениях можно представить в виде матрицы x_{ij} порядка N , элементы которой принимают значения:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я отметка привязана} \\ & \text{к } j\text{-й траектории,} \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, в каждой строке и каждом столбце имеется только одна единица – обеспечивается указанное выше условие назначения каждой отметки только к одной траектории и подтверждения каждой траектории только одной отметкой.

Исходя из (1), задача о назначениях математически может быть сформулирована как [2]: обеспечить экстремум:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Стоит отметить, что c_{ij} в (2), имеющее смысл ценности привязки отметки к траектории, может определяться различными способами. Так, для этого может использоваться евклидово расстояние, расстояние Махаланобиса, а также множество других способов [1], что является предметом для дальнейших исследований.

Существует большое количество методов решения задачи о назначениях. Далее будут рассмотрены три метода: венгерский алгоритм, метод Мака и метод Джонкера – Волгенанта – Кастаньона.

2. Методы решения

2.1. Венгерский алгоритм

Венгерский алгоритм был представлен Куном, а Мункрес показал, что он является строго полиномиальным. В литературе алгоритм часто



называется как венгерским, так и алгоритмом Куна – Мункреса, или просто Мункреса. Оригинальный венгерский алгоритм имеет сложность $O(n^4)$. Литература по венгерскому алгоритму: [3–5].

2.2. Алгоритм Мака

Алгоритм Мака впервые был представлен в [6] и имеет сложность $O(n^4)$. Литература по методу Мака: [6–8].

2.3. Алгоритм Джонкера – Волгенанта – Кастаньона

Данный алгоритм был предложен Джонкером и Волгенантом [9], а затем дополнен Кастаньоном (Jonker–Volgenant–Castanon – JVC) [10]. Волгенантом была также предложена модификация метода для разреженных матриц [11], что имеет большую практическую ценность для задачи селекции в траекторной обработке, поскольку позволяет хранить только непосредственно те назначения пар «отметка-траектория», которые прошли процедуру стробирования. Сложность алгоритма оценивается как $O(n^3)$, однако на практике он оказывается значительно быстрее.

Проведенные ранее исследования показали отличное быстродействие метода. Литература по алгоритму JVC: [9–14].

Стоит отметить, что существуют версии венгерского алгоритма и метода Мака, имеющие сложность $O(n^3)$, но в данной статье они не рассматриваются.

Детальное рассмотрение алгоритмов приведенных выше методов выходит за рамки данной статьи и изложено в соответствующей литературе. Далее будут рассмотрены вопросы практического применения.

3. Решение задачи на плотной матрице

3.1. Объекты исследования

Все алгоритмы были реализованы для вещественных чисел в двойной точности (double) на языке C++, версия компилятора gcc 9.4.0, и тестировались на IntelCore i5-3470 3,20 ГГц. Используемые реализации алгоритмов основываются на:

- венгерский алгоритм (Hungarian) (версия $O(n^4)$) – [15];

- метод Мака (Mask) (версия $O(n^4)$) – [7];

- метод Джонкера – Волгенанта – Кастаньона для плотных матриц (JVCdense) – [16, 17].

Все алгоритмы принимают в качестве входа квадратную матрицу назначений.

3.2. Тестовые матрицы

1) Удостоверимся в правильности работы методов на плотной тестовой матрице из [7] размера 8×8 , то есть имитируется наличие 8 отметок и 8 траекторий:

$$\begin{pmatrix} 93 & 93 & 91 & 94 & 99 & 99 & 90 & 92 \\ 96 & 93 & 90 & 94 & 98 & 96 & 97 & 91 \\ 96 & 90 & 91 & 90 & 92 & 90 & 93 & 96 \\ 93 & 94 & 95 & 96 & 97 & 10 & 92 & 93 \\ 94 & 93 & 95 & 91 & 90 & 97 & 96 & 92 \\ 94 & 93 & 96 & 90 & 93 & 89 & 88 & 91 \\ 94 & 96 & 91 & 90 & 95 & 93 & 92 & 94 \\ 93 & 94 & 6 & 95 & 91 & 99 & 91 & 96 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

для чего проведем по ней поиск минимума и максимума суммы назначений.

2) Проведем исследование на плотных (dense) матрицах, полученных при помощи генератора псевдослучайных вещественных чисел с равномерным законом распределения в интервале (0, 1). Будем использовать матрицы:

- условно малого порядка ($N = 8-64$);
- условно большого порядка ($N = 128-1024$).

Критерием правильности работы методов в данном случае будет условие равенства результатов их работы. Дополнительно проведем замеры времени с усреднением по случайным реализациям.

3.3. Результаты

1) Для тестовой матрицы (4) все три метода дают одинаково верные результаты: для поиска минимума:

$$rowsol = (0 \ 7 \ 1 \ 5 \ 4 \ 6 \ 3 \ 2), \Sigma = 558;$$

для поиска максимума:

$$rowsol = (4 \ 0 \ 7 \ 3 \ 6 \ 2 \ 1 \ 5), \Sigma = 774,$$

где $rowsol$ – массив индексов столбцов решения построчно, Σ – сумма элементов решения.



2) Результаты замеров времени выполнения методов для плотных квадратных матриц условно малого и условно большого порядка представлены в виде графиков на рисунках 2 и 3 соответственно. Из рисунков хорошо видно превосходство метода JVCdense над остальными.

4. Решение задачи на разреженной матрице

4.1. Объекты исследования

При практическом применении задачи о назначениях, принимающей на вход квадратную матрицу, в траекторной обработке следует учитывать, что число отметок в общем случае не равно числу траекторий, а также тот факт, что не все отметки попадают в стробы всех траекторий, из-за чего матрица назначений становится в общем случае прямоугольной и разреженной. Также при прямоугольной разреженной матрице назначений необходимо учитывать ситуацию непривязки отметок к траекториям, для чего вводятся так называемые фиктивные назначения, дополняющие матрицу справа. Поясним это следующим примером. Пусть имеется матрица

$$\begin{array}{cc} & \text{col} \\ & 0 \quad 1 \\ \text{row} \quad 0 & \begin{pmatrix} * & 20 \end{pmatrix} \\ 1 & \begin{pmatrix} 30 & 10 \end{pmatrix} \\ 2 & \begin{pmatrix} * & 1 \end{pmatrix} \end{array}, \quad (5)$$

которая имитирует наличие 3 отметок (строки) и 2 траекторий (столбцы), где символом «*» обозначается ситуация отсутствия назначения (непопадание i -й отметки в строб j -й траектории). Для того чтобы подать эту матрицу на методы, принимающие квадратную матрицу, необходимо дополнить ее справа столбцом ситуаций отсутствия назначений

$$\begin{array}{cc} & \text{col} \\ & 0 \quad 1 \quad 2 \\ \text{row} \quad 0 & \begin{pmatrix} * & \boxed{4} & * \end{pmatrix} \\ 1 & \begin{pmatrix} \boxed{3} & 2 & * \end{pmatrix} \\ 2 & \begin{pmatrix} * & 1 & \boxed{*} \end{pmatrix} \end{array}, \quad (6)$$

позволяющих алгоритму в данном случае при поиске максимума назначить строку с индексом 2 к фиктивно добавленному справа столбцу с индексом 2. Полученные решения в (6) обозначены рамкой. В общем виде данное обстоятельство учитывается

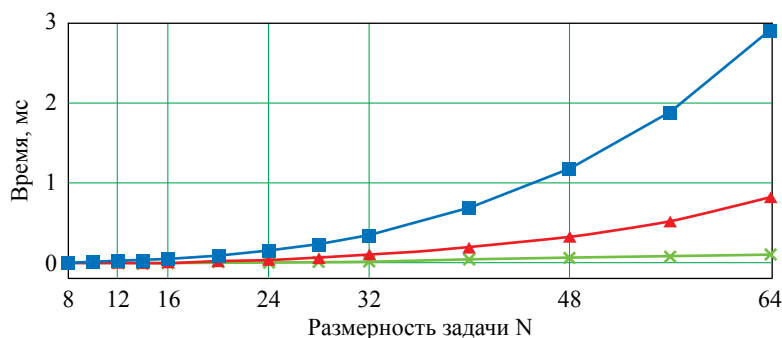


Рис. 2. Результаты замеров времени выполнения для плотных матриц условно малого порядка
— Hungarian; — Mack; — JVCdense

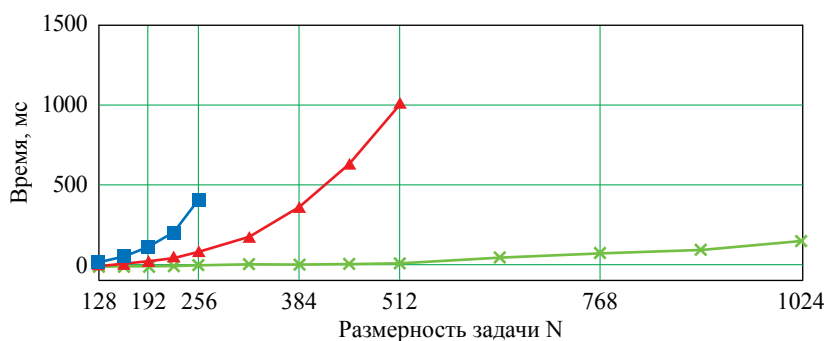


Рис. 3. Результаты замеров времени выполнения для плотных матриц условно большого порядка
— Hungarian; — Mack; — JVCdense



не дополнительным столбцом справа, а добавлением справа квадратной диагональной матрицы, позволяющей алгоритму иметь возможность в любой строке выполнить фиктивное назначение, и дополнением матрицы до квадратной путем добавления снизу соответствующего количества ситуаций отсутствия назначений:

$$\begin{array}{c} \text{col} \\ 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \\ \text{row} \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \left(\begin{array}{cc|ccc} * & 4 & Z & * & * \\ 3 & 2 & * & Z & * \\ * & 1 & * & * & Z \\ * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * \end{array} \right), \quad (7)\end{array}$$

причем Z выбирается таким образом, чтобы, например, в случае поиска максимума быть много меньше минимального элемента.

Объекты исследования аналогично п. 2.1. Дополнительно используется специальная модификация метода Джонкера – Волгенанта – Кастаньона для разреженных матриц (JVCsparse), хранящихся в сжатом CSR формате (Compressed Sparse Row Yale format) [18].

Сжатый CSR формат для хранения разреженных матриц может быть проиллюстрирован следующим примером:

$$\begin{array}{c} \text{col} \\ 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \\ \text{row} \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 2 \end{array} \left(\begin{array}{ccccc} 1 & * & 2 & * & * \\ * & 3 & 4 & * & 5 \\ * & * & 6 & 7 & * \end{array} \right) \Rightarrow \begin{array}{l} \text{csr} = \{1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7\} \\ \text{col} = \{0 \ 2 \ 1 \ 2 \ 4 \ 2 \ 3\}, \\ \text{first} = \{0 \ 2 \ 5 \ 7\} \end{array}, \quad (8)\end{array}$$

где разреженная матрица 3×5 представляется в виде трех массивов: csr – ненулевые элементы матрицы построчно, col – индексы столбцов соответствующих элементов в csr , first – индексы начала и конца строк в csr попарно. Следует учесть, что ситуации отсутствия назначения (непопадание i -й отметки в строб j -й траектории), обозначенные символом «*», не входят при этом в итоговые массивы CSR формата.

4.2. Тестовые матрицы

1) Удостоверимся в правильности работы методов на тестовой разреженной матрице,

полученной из (4) путем взятия только значений подматрицы 3×5 из левого верхнего угла, то есть имитируется наличие 3 отметок и 5 траекторий:

$$\begin{pmatrix} 93 & * & 91 & * & * & Z & * & * \\ * & 93 & 90 & * & 98 & * & Z & * \\ * & * & 91 & 90 & * & * & * & Z \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * & * \end{pmatrix}, \quad (9)$$

для чего проведем по ней поиск минимума и максимума суммы назначений. Матрица назначений размера 3×5 дополняется справа матрицей фиктивных назначений размера 3×3 , диагональные элементы Z которой учитывают ситуацию непривязки отметок к траекториям, а снизу матрицей размера 5×8 , дополняющей задачу до квадратной.

В алгоритмы Hungarian, Mack, JVCdense, принимающие плотную квадратную матрицу, поступает непосредственно (9), а на алгоритм JVCsparse поступают массивы, полученные путем преобразования (9) в CSR формат:

$$\begin{array}{l} \text{csr} = \{93, 91, Z, 93, 90, 98, Z, 91, 90, Z\} \\ \text{kk} = \{0, 2, 5, 1, 2, 4, 6, 2, 3, 7\} \\ \text{first} = \{0, 3, 7, 10\} \end{array} \quad (10)$$

Для поиска максимума элементы «*» задаются равными -10^6 , а « Z » равными -10^5 . Для поиска минимума данные значения берутся с противоположным знаком.

Стоит отметить, что квадратная матрица (9), имея порядок $N = K + L$, содержит лишь $(K + S)$ назначений, где S – число попаданий отметок в стробы траекторий, причем справедливо $(K + L)^2 \gg (K + S)$. Поэтому способ хранения разреженной матрицы в плотной является крайне неэффективным.

2) Проведем исследование на разреженных (sparse) квадратных матрицах, также полученных при помощи генератора псевдослучайных вещественных чисел с равномерным законом распределения в интервале $(0, 1)$. Уровень разреженности установим равным $\sim 2\%$ (в матрице присутствует только 2% назначений, а 98% – пустые ячейки, т.е. ситуации



непопадания отметок в стробы траекторий), причем в матрице порядка $N/2$ не может быть полностью пустых строк и/или столбцов. На алгоритмы Hungarian, Mack, JVCdense, принимающие плотную матрицу, поступает матрица порядка N , сформированная аналогично п. 1, а на JVCsparse – массивы CSR формата.

3) Проведем исследование скорости работы метода JVCsparse на разреженных матрицах условно очень большого порядка: $N = 1024 - 16\ 384$.

4.3. Результаты

1) Для тестовой матрицы (8) и массивов CSR формата (9) все методы дают одинаково верные результаты:

для поиска минимума:

$$\text{rowsol} = (0\ 2\ 3), \Sigma = 273;$$

для поиска максимума:

$$\text{rowsol} = (0\ 4\ 2), \Sigma = 282.$$

2) Результаты замеров времени выполнения методов для разреженных матриц условно малого и условно большого порядка представлены в виде графиков на рисунках 4 и 5

соответственно. Возрастание времени выполнения для венгерского и метода Мака по сравнению с JVC в данном случае оказывается существенным и на рисунке 5 не приводится.

Из представленных рисунков хорошо видно превосходство метода JVCsparse над остальными для разреженных матриц.

Также сведем результаты для разреженных матриц в таблицы 1 и 2, где покажем абсолютные и относительные показатели соответственно.

3) Результаты замеров времени выполнения метода JVCsparse для матриц условно очень большого порядка представлены на рисунке 6.

5. Решение задачи на прямоугольной разреженной матрице

5.1. Объект исследования

Отдельно исследуем наиболее быстрый метод JVCsparse на прямоугольных матрицах. Среди исследуемых реализаций методов только JVCsparse может принимать на вход прямоугольную матрицу, поэтому другие методы в данном пункте не рассматриваются.

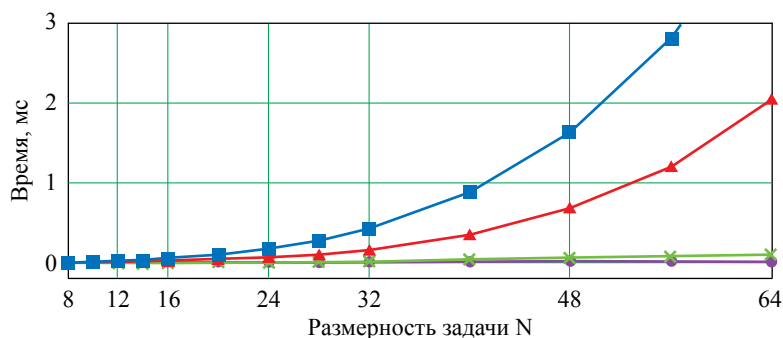


Рис. 4. Результаты замеров времени выполнения для разреженных матриц условно малого порядка

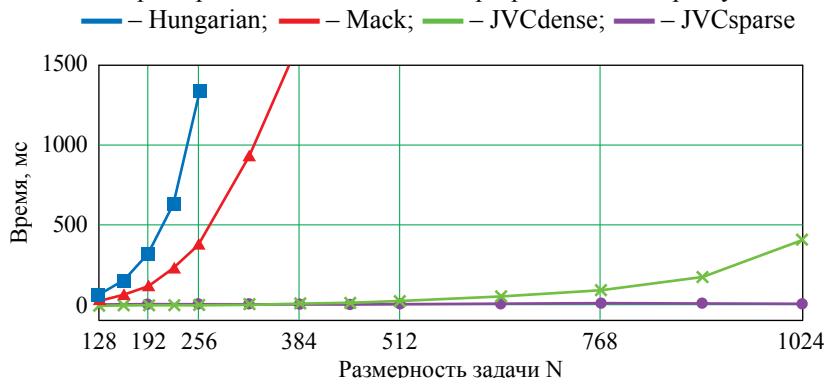


Рис. 5. Результаты замеров времени выполнения для разреженных матриц условно большого порядка

— Hungarian; — Mack; — JVCdense; — JVCsparse



Таблица 1

Результаты замеров времени выполнения для разреженных матриц в зависимости от порядка матрицы N, мс

N	8	16	32	64	128	256	512	1024
Hung	0,008	0,049	0,406	4,909	71,47	1405	-	-
Mack	0,003	0,015	0,176	2,063	29,29	369,9	-	-
JVCd	0,002	0,005	0,020	0,080	0,396	3,078	25,96	523,4
JVCs	0,001	0,002	0,003	0,006	0,023	0,114	1,065	4,931

Таблица 2

Увеличение времени выполнения для разреженных матриц относительно метода JVCsparse, разы

N	8	16	32	64	128	256	512	1024
Hung	6,64	32,65	138,6	777,4	3053	12347	-	-
Mack	2,10	10,19	60,08	326,7	1251	3250	-	-
JVCd	1,54	3,24	6,85	12,61	16,93	27,04	24,3	106,1

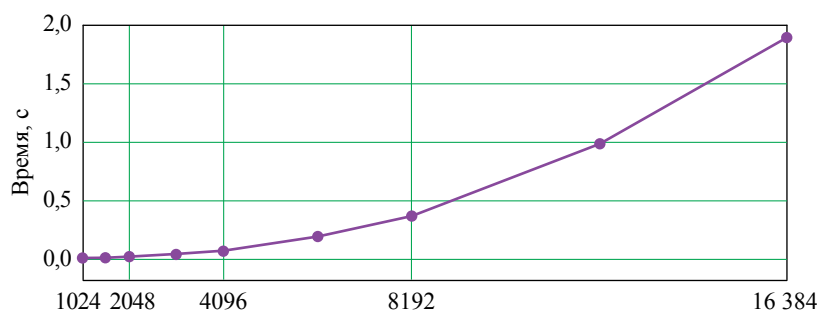


Рис. 6. Результаты замеров времени выполнения для разреженных матриц условно очень большого порядка

5.2. Тестовые матрицы

В качестве тестовых возьмем матрицы, полученные при помощи генератора псевдослучайных вещественных чисел с равномерным законом распределения в интервале (0, 1) при количестве отметок: 100, 500, 1000, 1500, 2000 и количестве траекторий: 3, 50, 100, 150, 200. Уровни разреженности матрицы были вы-

браны 2 %, 30 %, 60 %, 98 %. Аналогично предыдущим пунктам матрица дополнялась справа диагональными элементами Z, учитывающими ситуацию непривязки отметок к траекториям.

5.3. Результаты

Усредненные результаты замеров времени выполнения приведены далее в таблицах 3–6.

Таблица 3

Результаты замеров времени выполнения метода JVCsparse для уровня разреженности матрицы 2 %, мс

Отм./тр.	3	50	100	150	200
100	0,040	0,037	0,037	0,037	0,037
500	2,751	2,565	2,499	2,558	2,527
1000	13,723	13,544	13,491	13,533	13,498
1500	34,382	33,941	33,603	33,936	33,844
2000	64,772	63,335	62,988	62,601	62,656

Таблица 4

Результаты замеров времени выполнения метода JVCsparse для уровня разреженности матрицы 30 %, мс

Отм./тр.	3	50	100	150	200
100	0,297	0,301	0,297	0,300	0,305
500	14,646	14,625	14,676	14,633	14,519
1000	102,552	101,488	101,265	104,869	105,563
1500	328,308	326,436	333,211	329,245	327,032
2000	780,896	766,563	755,553	757,64	762,215



Таблица 5

Результаты замеров времени выполнения метода JVCsparse для уровня разреженности матрицы 60 %, мс

Отм./тр.	3	50	100	150	200
100	0,326	0,325	0,333	0,332	0,334
500	28,625	29,022	28,722	28,616	29,186
1000	207,438	207,664	209,36	207,784	206,996
1500	695,714	702,29	722,702	704,296	716,103
2000	1792,404	1709,474	1686,019	1703,211	1705,316

Таблица 6

Результаты замеров времени выполнения метода JVCsparse для уровня разреженности матрицы 98 %, мс

Отм./тр.	3	50	100	150	200
100	0,547	0,563	0,562	0,553	0,553
500	68,153	67,449	67,715	67,808	68,269
1000	518,214	520,594	525,027	515,049	519,272
1500	1786,203	1776,508	1778,495	1788,219	1810,388
2000	4230,568	4204,446	4196,816	4198,069	4199,066

6. Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- алгоритм JVC дает самый быстрый результат среди рассмотренных;
- целесообразно использовать хранение разреженной матрицы в сжатом виде, например в CSR формате;
- версия алгоритма для разреженных матриц JVCsparse оказывается быстрее других рассмотренных методов от ~1,5 до более чем 12 000 раз при увеличении размерности задачи от 8 до 1024 при уровне разреженности матрицы 2 %;
- проведенное исследование метода JVCsparse на прямоугольных разреженных матрицах показало, что быстродействие определяется большей размерностью матрицы и сильно зависит от уровня разреженности: например, для наибольшей рассмотренной размерности в 2000 отметок время выполнения варьировалось от ~60 мс до ~4.2 с при варьировании разреженности от 2 до 98 % соответственно.
- для обеспечения правильной работы методов применительно к задаче траекторной обработки для разреженной матрицы необходимо дополнительно учитывать возможность непривязки отметок к траекториям рассмотренным в статье способом.

Список литературы

1. Коновалов А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.
2. Корбут А. А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.
3. Kuhn H. W. The Hungarian method for the Assignment problem // Nav. Res. Logistics Quart. 1955. No 2. P. 83–97.
4. Munkres J. Algorithms for the assignment and transportation problems // J. Soc. Indust. Appl. Math. 1957. Vol. 5. No. 1. P. 32–38.
5. Jonker R., Volgenant T. Improving the Hungarian algorithm // Operations research letters. 1986. Vol. 5. No. 4 P. 171–175.
6. Mack C. The Bradford Method for the Assignment Problem // The New J. of Stats. and Op. Res. 1969. No. 1. P. 17–29.
7. Банди Б. Основы линейного программирования / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 176 с.: ил.
8. Jonker R., Volgenant T. Teaching linear assignment by Mack's algorithm // Twenty-Five Years of Op. Res. in the Netherlands: Papers Dedicated to Gijs de Leve, CWI Tract. 1989. Vol. 70. P. 54–60.
9. Jonker R., Volgenant T. A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems // Computing. 1987. Vol. 38. No. 4. P. 325–340.



10. Castanon D.A. New assignment algorithms for data association // Proc. SPIE. 1992. Vol. 1693. P. 313–323.
11. Volgenant A. Linear and semi-assignment problems: a core oriented approach // Computers Ops Res. 1996. Vol. 23. No. 10. P. 917–932.
12. Levendahl M. Performance comparison of 2-D assignment algorithms for assigning truth objects to measured tracks // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4048. P. 380–389.
13. Malkoff D. B. Evaluation of the Jonker-Volgenant-Castanon (JVC) assignment algorithm for track association // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3068. P. 228–239.
14. Crouse D. F. On implementing 2D rectangular assignment algorithms // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2016. Vol. 52. No.4. P. 1679–1696.
15. Репозиторий венгерского алгоритма. Режим доступа: <https://github.com/RcppCore/rcpp-gallery/blob/gh-pages/src/2013-09-24-minimal-assignment.cpp> (дата обращения: 26.06.2022).
16. Репозиторий алгоритма LAPJV. Режим доступа: <https://github.com/yongyanghz/LAPJV-algorithm-c> (дата обращения: 26.06.2022).
17. Реализация алгоритма LAPJV на MATLAB. Режим доступа: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26836-lapjv-jonker-volgenant-algorithm-for-linear-assignment-problem-v3-0> (дата обращения: 26.06.2022).
18. Репозиторий алгоритма LAPJVsp. Режим доступа: <https://github.com/fuglede/linearassignment> (дата обращения: 26.06.2022)/

Об авторе

Соболев Александр Александрович – инженер 1-й категории Акционерного общества «НПК «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: траекторная обработка радиолокационной информации.

Performance comparison of the methods for solving the assignment problem in selection of tracking data processing

Sobolev A. A.

JSC “Distant Radiocommunication Scientific Research Institute”, Moscow, Russian Federation

The paper compares the performance of different methods for solving the assignment problem: the Hungarian algorithm, the Mack method and the Jonker–Volgenant–Castanon method. The comparison results for dense and sparse matrices are given.

Keywords: linear assignment problem; tracking data processing; Global Nearest Neighbour method; Hungarian algorithm; Mack method; Jonker–Volgenant–Castanon method.

Information about the author

Sobolev Aleksandr Aleksandrovich – 1st category engineer at the JSC “Distant Radiocommunication Scientific Research Institute”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: tracking of radar data.



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-90-100>

УДК 004.054

Кластеризация отчетов об исправлениях в программном обеспечении сетевого оборудования

К. В. Нарышкин

Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» им. академика В.П. Ефремова», Москва, Российская Федерация

В статье рассматриваются проблемы оценки качества встраиваемых систем и способы их решения на основе открытой информации. Рассмотрены технологии, которые ограничивают возможности при исследовании образца телекоммуникационного оборудования. Основная часть работы содержит результаты кластерного анализа открытой информации об изменениях в программной части сетевых устройств, которые вносит производитель. Анализ затронул 38 моделей маршрутизаторов от трех производителей. Результат кластерного анализа отчетов об исправлениях позволил выделить условные группы разработки внутри одного производителя. Сделаны выводы о вовлеченности производителей в процесс поддержки высокого уровня качества разработанных продуктов.

Ключевые слова: оценка качества, анализ ошибок ПО, кластеризация данных, встраиваемые системы, информационные технологии

Для цитирования: Нарышкин К. В. Кластеризация отчетов об исправлениях в программном обеспечении сетевого оборудования // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 2. С. 90–100. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-90-100>

For citation: Naryshkin K. V. Clustering of reports on fixes to software used in network equipment // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 2. P. 90–100. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-2-90-100>

Поступила 28.11.2022 Отрецензирована 13.12.2022 Одобрена 04.04.2023 Опубликовано 14.06.2023

Введение

На сегодня производители встраиваемых систем, как правило, скрывают детали разработки от конечных пользователей, предоставляя сервисы, а не локальные решения. Производители не передают техническую документацию к электронным компонентам, исходные коды, детальную спецификацию потребителю и ограничивают низкоуровневый доступ к управлению встраиваемой системой. В частности, производители телекоммуникационного оборудования (ТКО) стараются закрыть доступ к программной части, что затрудняет анализ систем и не добавляет уверенности в их качестве и безопасности. Для этого разработчики применяют следующие технологии [1]:

1) блокирование отладочных интерфейсов:

- аппаратное, когда с платы исключают возможность подключиться к UART, JTAG и т. д.;

- программное, когда блокируют возможность подключиться к отладочному интерфейсу в микропрограмме устройства;

2) ограничение или блокирование доступа к программной оболочке;

3) защита прошивки от модификации (шифрование, внедрение цифровой подписи);

4) обфускация программного обеспечения (ПО).

Перечисленные выше технологии ограничивают возможности оценки качества и безопасности встраиваемых систем. В случаях, когда нет возможности исследовать систему



методами инженерного анализа, имеет смысл провести анализ информации из открытых источников, которую предоставляют производители. К такой информации относятся [2]:

- 1) техническое описание;
- 2) сведения о внесенных изменениях;
- 3) руководство пользователя;
- 4) руководство по установке;
- 5) информация службы поддержки;
- 6) сертификаты соответствия.

Целью данной работы является разработка метода анализа открытой информации о ТКО, который позволит объединить существующие на рынке модели устройств и выявить тенденции в количестве исправлений при сопровождении разработчиками.

Практическая значимость заключается в сокращении времени на выбор партии оборудования. Например, интернет-провайдеры закупают большие объемы оборудования класса SOHO и поставляют их клиентам для обеспечения интернет-услуг. Анализ качества оборудования занимает значительное время, прежде чем принимается решение о закупке. Поэтому создание метода предварительной оценки качества сокращает общее время на анализ.

Научная значимость связана с совершенствованием методов оценки качества сетевого оборудования, которое рассматривается как элемент сложной системы управления. Анализ открытой информации об изменениях в ПО возможен только после ее публикации, что происходит через некоторое время после выпуска продукта. Инженерный анализ доступен при наличии либо образца системы, либо образца ПО. Устройство возможно отнести (например, с помощью анализа форматов прошивок) к одной из групп, сформированных на основе метода анализа отчетов об исправлениях. Предварительная информация о группе, полученная на основе открытых данных, значительно снизит сложность инженерного анализа исследуемой системы.

Анализ открытой информации

Анализ информации об изменениях в ПО ТКО представлен для производителей Asus и D-Link в классе устройств SOHO (устройства для дома и малого бизнеса), для D-Link в классе SMB

(устройства для бизнеса) и для Zyxel в сегменте Enterprise (промышленное оборудование). Выбраны устройства из каждой производимой серии и проведен анализ информации, размещенной на сайтах производителей.

Целесообразно проводить исследование телекоммуникационного оборудования в течение срока «время жизни продукта» (от англ. End-of-life). Срок жизни ТКО состоит из двух частей: период выпуска оборудования и период технической поддержки ПО.

Как правило, период выпуска ТКО меньше, чем период технической поддержки ПО, но на практике встречается такое оборудование, которое производится с ПО без изменений на протяжении всего периода выпуска. Подобные случаи необходимо выявлять и учитывать в процессе оценки качества. Такое оборудование содержит дополнительные риски нарушения качества и безопасности. Производители устанавливают период выпуска оборудования, руководствуясь своими интересами; как правило, он составляет в среднем 5–7 лет.

Проведен анализ записей об изменениях в ПО 38 моделей устройств. На рисунке 1 представлен график, который показывает количество исправлений за каждый год производства.

На графиках видно, что для двух производителей (Asus, D-Link) характерна тенденция к существенному снижению (более чем в 2 раза) количества исправлений уже после второго года выпуска продукции. Одновременно с этим отсутствие такой тенденции у третьего производителя (Zyxel) указывает на то, что скорее производитель не поддерживает продукты с той же степенью вовлеченности, как в первые два года. Выявление подобных тенденций позволяет сформулировать понятие «заинтересованности» производителя в исправлении ошибок после выпуска продукции.

Отношение $R^e = C_i^e / C^e$, где C_i^e – количество исправлений за год в продукте, а C^e – количество исправлений за весь период выпуска продукта (5 лет), позволяет детализировать заинтересованность производителя в конкретных моделях устройств. В таблице 1 представлены данные, рассчитанные на основе открытых данных об исправлениях в ПО [3–5].

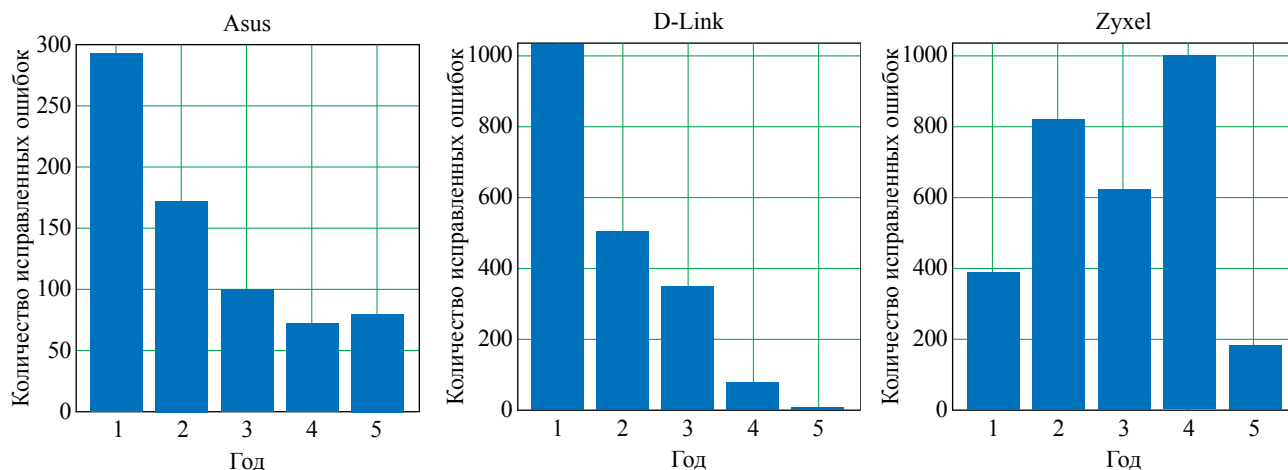


Рис. 1. Количество внесенных изменений в ПО за 5 лет

На рисунке 2 представлено цветовое распределение R^e , где значению «0» соответствует черный цвет, а значению «1» – розовый. Подобная тепловая карта иллюстрирует долю исправленных ошибок в каждый год производства оборудования.

Графики указывают на ту же тенденцию, что и на рисунке 1: в первые два года исправляется наибольшее количество ошибок. Также стоит отметить, что за весь период выпуска продукта высокий уровень обнаруженных и исправленных ошибок сохраняется только в тех случаях, когда производитель заинтересован в поддержке оборудования. Заинтересованность может быть связана со следующими факторами:

- 1) модель поставляется в крупные или государственные компании;
- 2) большое количество моделей использует одинаковое ПО;
- 3) модель пользуется большим спросом;
- 4) модель локализована под страну с высоким уровнем требований.

На такие факторы указывает информация об исправлениях. Если предположить, что большое количество продуктов использует одинаковое ПО (второй фактор заинтересованности), то, соответственно, описание исправлений должно быть похожее или одинаковое. Также большое количество одинаковых CVE-идентификаторов в исправлениях разных моделей характеризует сходство ПО. Если принять во внимание тот факт, что в нескольких продуктах используется единое ПО, которое

разрабатывается одной командой исполнителей, то существует возможность объединить продукты по командам разработчиков на основе отчетов об исправлениях.

Соотнесение групп разработчиков с продуктами позволит выявить закономерности в разработке и сопровождении, которые относятся к области поддержки качества продукта. Например, выявление характерной степени заинтересованности поддержки за весь период выпуска продукта для отдельной группы разработчиков. Решение задачи лежит в области кластеризации данных и требует разработки специальной модели на основе отчетов об исправлениях.

Возможности методов кластеризации информации об исправленных ошибках

В процессе оценки качества программно-аппаратных систем важно понимать, какая команда разработчиков создавала тот или иной продукт. В случае с ТКО количество команд разработки для каждого производителя разное. Не имея доступа к информации о бизнес-процессах компании, невозможно понять, кто создавал продукт. Но для оценки качества важно выделить и объединить в группу те модели устройств, которые создавались одной командой. Подобная задача довольно точно решается методами инженерного анализа. Но так как провести инженерный анализ не всегда целесообразно, то задача идентификации команд разработки грубо решается семантическим анализом текста описания исправлений.



Таблица 1

Данные о количестве исправлений

№ п/п	Название продукта		Количество исправлений за год и показатель R^e					Общее количество исправлений
			1-й год	2-й год	3-й год	4-й год	5-й год	
1.	D-Link	DIR-850L	423 (0,872)	36 (0,074)	0 (0)	0 (0)	26 (0,053)	485
2.		DIR-835A1	126 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	126
3.		DIR-330	71 (0,2)	139 (0,391)	105 (0,295)	40 (0,112)	0 (0)	355
4.		DIR-826LR	63 (0,926)	2 (0,029)	3 (0,044)	0 (0)	0 (0)	68
5.		DIR-320	54 (0,197)	140 (0,510)	73 (0,266)	7 (0,025)	0 (0)	274
6.		DIR-655A4	49 (0,362)	32 (0,237)	48 (0,355)	6 (0,044)	0 (0)	135
7.		DIR-815	47 (0,505)	24 (0,258)	12 (0,129)	10 (0,107)	0 (0)	93
8.		DI-524UP	41 (0,422)	16 (0,164)	36 (0,371)	4 (0,041)	0 (0)	97
9.		DIR-628A2	39 (0,345)	49 (0,433)	24 (0,212)	1 (0,008)	0 (0)	113
10.		DIR-636LR	38 (0,904)	1 (0,023)	3 (0,071)	0 (0)	0 (0)	42
11.		DIR-615B2	34 (0,272)	48 (0,384)	34 (0,272)	9 (0,072)	0 (0)	125
12.		DI-604UP	32 (0,581)	13 (0,236)	10 (0,181)	0 (0)	0 (0)	55
13.		DIR-300B	17 (0,809)	4 (0,190)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	21
14.		DIR-857	1 (0,5)	0 (0)	1 (0,5)	0 (0)	0 (0)	2
15.	Asus	DSL-AC51	53 (0,373)	44 (0,309)	19 (0,133)	0 (0)	26 (0,183)	142
16.		ZenWiFi XT8	45 (0,6)	30 (0,4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	75
17.		DSL-AC3100	39 (0,582)	27 (0,402)	0 (0)	1 (0,014)	0 (0)	67
18.		RT-AC1900	31 (0,210)	32 (0,217)	26 (0,176)	31 (0,210)	27 (0,183)	147
19.		RT-AC68U	30 (0,197)	32 (0,210)	27 (0,177)	36 (0,236)	27 (0,177)	152
20.		DSL-AC88U	25 (0,961)	1 (0,038)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	26
21.		4G-AC68U	24 (0,461)	0 (0)	28 (0,538)	0 (0)	0 (0)	52
22.		4G-AC55U	12 (0,75)	0 (0)	0 (0)	4 (0,25)	0 (0)	16
23.		4G-AC86U	9 (0,818)	2 (0,181)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	11
24.		BRT-AC828	9 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	9
25.		4G-AX56	6 (0,857)	1 (0,142)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	7
26.		4G-AC53U	5 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5
27.		ZenWiFi ET12	4 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4
28.		DSL-G31	0 (0)	3 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3
29.	Zyxel	ATP700	98 (0,232)	208 (0,492)	116 (0,274)	0 (0)	0 (0)	422
30.		NBG418N	23 (0,338)	26 (0,382)	10 (0,147)	3 (0,044)	6 (0,088)	68
31.		NBG6604	3 (0,157)	4 (0,210)	1 (0,052)	0 (0)	11 (0,578)	19
32.		NBG6615	2 (0,285)	2 (0,285)	0 (0)	0 (0)	3 (0,428)	7
33.		USG FLEX 100	96 (0,216)	232 (0,522)	116 (0,261)	0 (0)	0 (0)	444
34.		USG1100	18 (0,035)	118 (0,231)	86 (0,168)	249 (0,489)	38 (0,074)	509
35.		VPN100	57 (0,109)	66 (0,127)	104 (0,200)	249 (0,479)	43 (0,082)	519
36.		SBG5500	7 (1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	7
37.		USG210	28 (0,054)	115 (0,222)	86 (0,166)	249 (0,482)	38 (0,073)	516
38.		VPN50	57 (0,112)	50 (0,099)	104 (0,205)	251 (0,497)	43 (0,085)	505

Информация об исправлениях производителями представляется в разных форматах. Компания D-Link предоставляет в виде текстовых файлов, Zyxel – в pdf-документах, а ASUS размещает информацию на сайте в разделе, где расположены ссылки на доступные прошивки.

На рисунке 3 представлены примеры особенностей форматирования текста в описаниях исправлений для моделей D-Link DI-704UP (DI-704UP_Release Note.txt) и D-Link DI-604

(DI604_704P_707P_Release Note_3_21RU.txt); они выделены красным цветом.

Таким образом, представляется возможность выделить в отчетах об исправленных ошибках признаки, которые характерны для нескольких продуктов, что позволяет объединить их в группу.

Кластеризация и идентификация текстов описаны в научных работах таких авторов, как Л.А. Борисов, Ю.Н. Орлов, К.П. Осминин

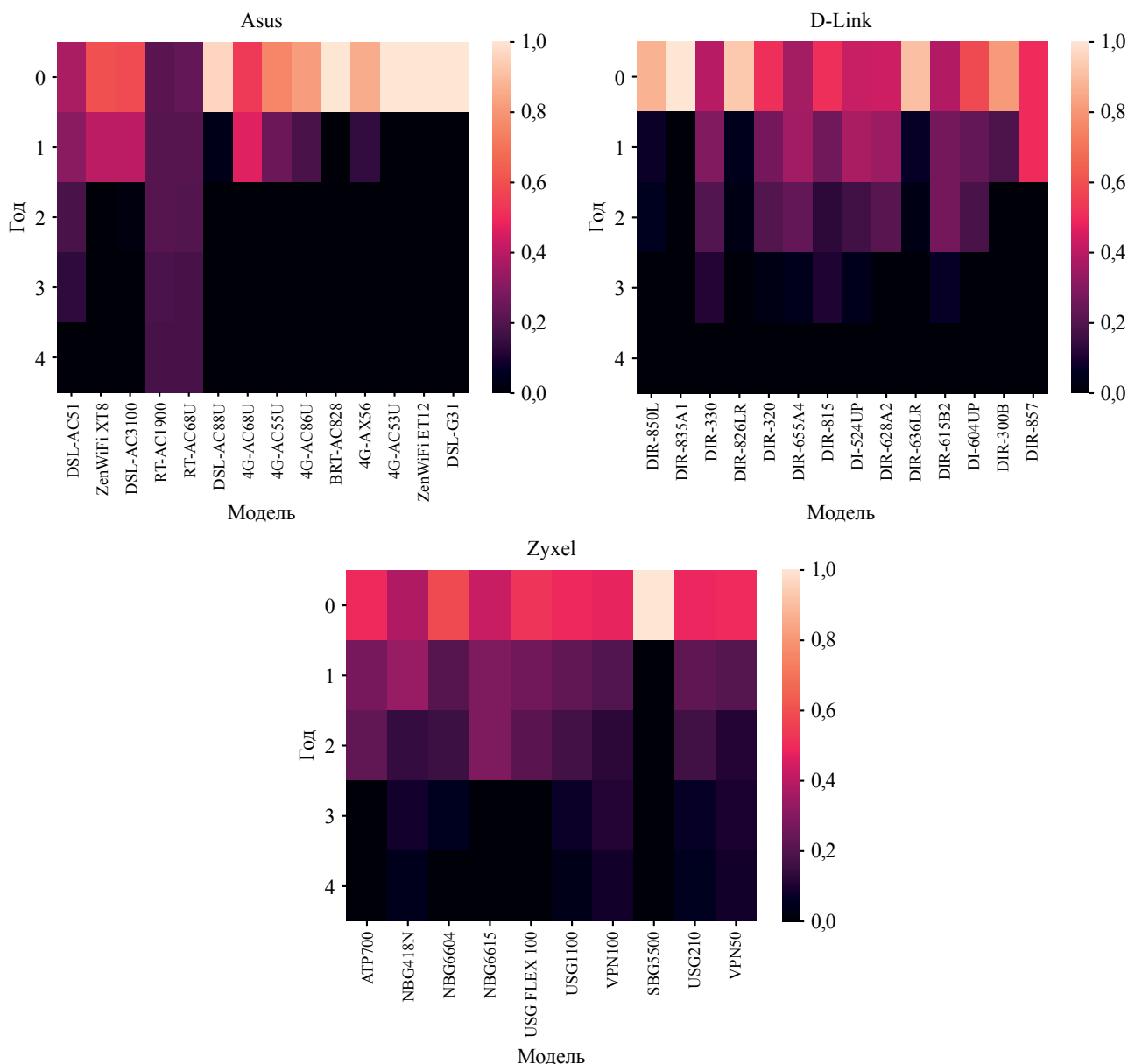


Рис. 2. Тепловая карта исправленных ошибок

```
*** 1.02(Nov. 25) to 1.02(Dec. 10). 1 Model: DI-704UP
1.Fix the following problems:
2 (1) LAN PCs can't access remote FTP server if router is in SPI
***** V3.10 TO V3.11 (May 3) ***** 1 Model: DI-604
1.Fix the following problems:
(1)2UI displays an incorrect page if users input same password
```

Рис. 3. Особенности при описании исправлений

[6], Н.Н. Бороденко [7], П.С. Дюрдева [8]. Авторы исследуют возможности идентификации текстов с помощью плотности функции распределения буквосочетаний из трех идущих

подряд символов [8]. Подобный метод имеет высокую точность в случаях, когда тексты имеют объем не менее 10 тыс. символов. Средний объем описания ошибок равен 9 тыс. символов.



Так как кластеризация описаний исправлений является грубой оценкой нахождения модели устройства в одном из классов и в процессе инженерного анализа может быть уточнена, то целесообразно применить один из методов кластеризации данных с учетом особенностей написания текста исправлений.

Алгоритм кластеризации k -средних состоит в том, чтобы найти минимальное среднеквадратичное отклонение от центра класса. Формально алгоритм записывается следующим образом:

$$R = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} (x - c_i)^2, \quad (1)$$

где k – число кластеров, C_i – полученные кластеры, c_i – центр i -го кластера.

Кластеризация происходит за счет выделения признаков, характерных для объектов кластеризации. Значения признаков проходят нормализацию по выбранному методу. К методам нормализации относятся метод Варда, расчет расстояния до ближайшего соседа, взвешенное попарное среднее и др.

Для того чтобы исключить признаки, которые имеют высокий коэффициент корреляции, строится корреляционная матрица, где на главной диагонали располагаются значения, равные единице, а остальные значения должны быть менее 0,95. Если коэффициент корреляции двух признаков больше 0,95, то один из признаков можно исключить.

Особенность алгоритма k -средних заключается в том, что предварительно нужно задавать количество кластеров. Так как количество

кластеров неизвестно, то поиск оптимального значения может быть основан на работе «метода локтя» (elbow method). Суть метода состоит в том, что с увеличением заданного числа кластеров k разбиение выборки становится точнее, а степень агрегации отдельного кластера постепенно увеличивается, следовательно, значения квадрата ошибок и суммы квадратов ошибок (СКО) снижаются. Так как с увеличением числа кластеров до истинного значения снижение СКО происходит быстро, а после достижения истинного значения к отношению СКО к k сглаживается, то график имеет форму «локтя» с изгибом в истинном значении числа кластеров (рис. 4).

После того как определено оптимальное значение количества кластеров, модель готова к кластеризации целевых данных. Ниже представлены результаты применения описанного метода к информации об исправлениях.

Кластеризация информации об ошибках методом k -средних

На первом этапе необходимо выделить признаки, по которым будет происходить кластеризация. При анализе текстов исправлений выделена особенность форматирования текста, которая заключается в применении большого количества специальных символов. С помощью специальных символов выделяют и разделяют области текста. На рисунке 3 можно увидеть, что часто встречаются три специальных символа: «*», «(» и «)». В других описаниях применяются в общей сложности 24 специальных символа: «!», «@», «#», «\$», «%», «^», «&», «*», «(», «)», «-», «=», «+», «\», «/», «|», «{», «}», «[», «]», «<», «>», «>», «:». Частотное распределение каждого спецсимвола в тексте описания исправлений ошибок примем за признаки кластеризации, которые рассчитываются по формуле (2).

$$N_{ij} = L / S, \quad (2)$$

где N_{ij} – это частота появления символа i в тексте j , L – количество символа i в тексте j , а S – общее количество символов в тексте j . Таким образом, рассчитав частоту появления i -го количества спецсимволов в j -том количестве текстов, получим матрицу признаков $i \times j$.

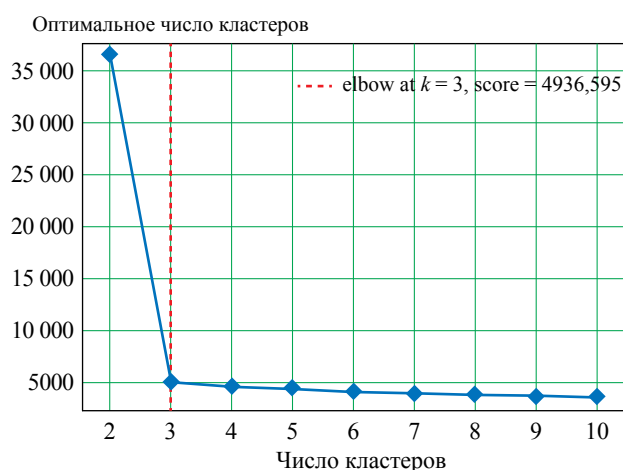


Рис. 4. Графическое представление «метода локтя»

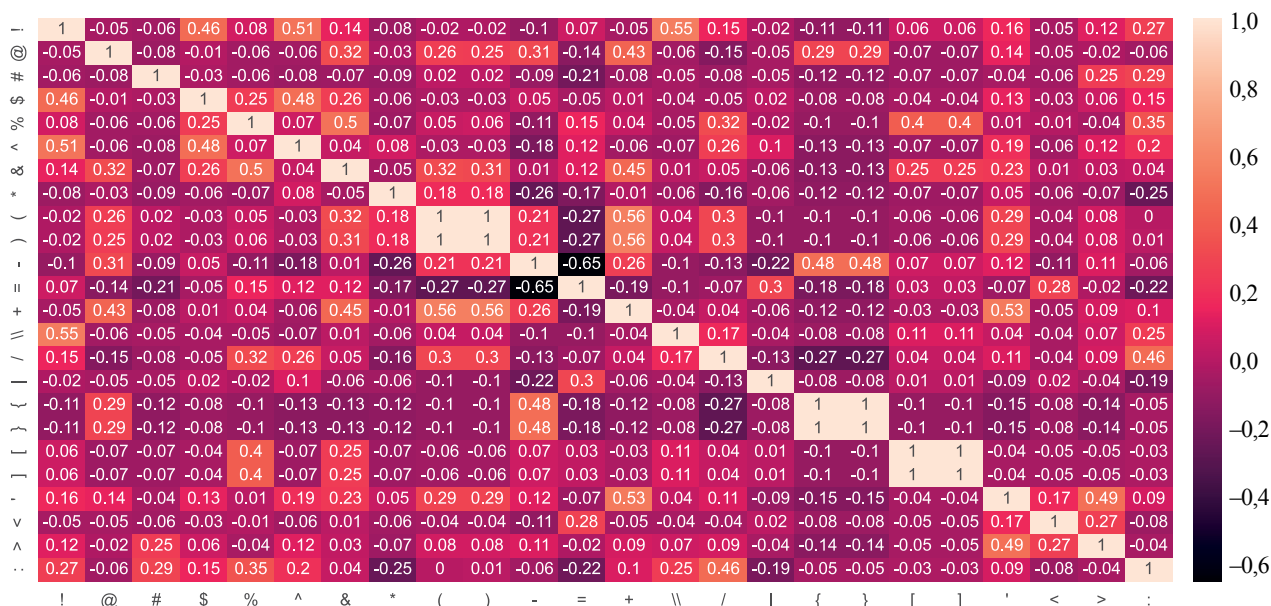


Рис. 5. Матрица корреляции признаков

Вернемся к производителям ТКО. Для производителя D-Link, опираясь на 44 отчета об исправлениях, получаем матрицу признаков с 1128 значениями. Применяя метод расчета расстояния до ближайшего соседа по формуле (3), проведем нормализацию признаков.

$$Z_{ij} = \frac{(N_{ij} - N_j^{\min})}{(N_j^{\max} - N_j^{\min})}, \quad (3)$$

где Z_{ij} – нормализованное значение признака, $N_j^{\min}$ и $N_j^{\max}$ – минимальное и максимальное значение в строке. После нормализации построим корреляционную матрицу (рис. 5) и удалим те признаки, коэффициенты у которых близки к единице.

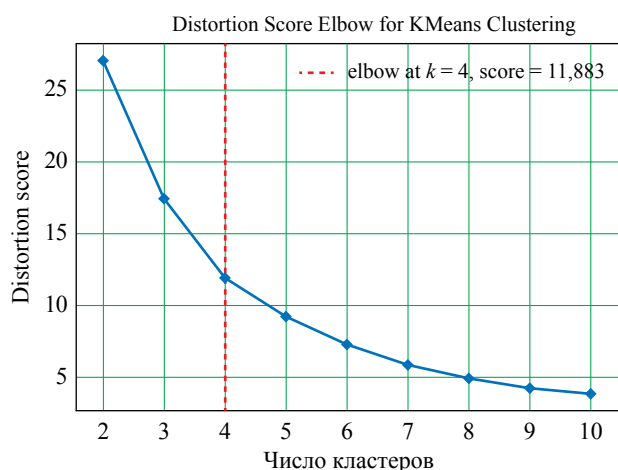


Рис. 6. Результат применения метода «локтя»

Из рисунка 5 логично следует, что признаки «(» и «)», «{» и «}», «[» и «]» полностью зависят друг от друга. Следовательно, исключение признаков «(», «{» и «[» не отразится на конечном результате кластеризации, и, таким образом, в модели остается 21 признак. Дальше необходимо определить количество кластеров и провести кластеризацию.

На рисунке 6 представлен результат применения «метода локтя» (elbow method), реализованного на языке программирования Python в модуле PyCaret.

Как видно из рисунка 6, программа предлагает 4 кластера как оптимальное значение. Но, анализируя график на рисунке 6, наблюдаем сглаживание графика после значения пяти кластеров. Для проверки этого предположения проведем дополнительные расчеты индекса Calinski-Harabasz [9]. Формула индекса записывается следующим образом:

$$CH = \frac{BGSS/(c-1)}{WGSS/(N-c)}, \quad (4)$$

$$BGSS = \frac{1}{2}((c-1)\bar{d}_{ci}^2 + (N-c)A_c), \quad (5)$$

$$A_c = \frac{1}{N-c} \sum_{i=1}^c (n_{ci} - 1)(\bar{d}^2 - \bar{d}_{ci}^2), \quad (6)$$

$$WGSS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^c (n_{ci} - 1) \bar{d}_{ci}^2, \quad (7)$$

где $BGSS$ – это сумма расстояний между кластерами, A_c – взвешенная средняя разница



расстояний между центрами кластеров и общим центром множества, $WGSS$ – сумма расстояний внутри кластеров, $\bar{d}^2$ – средний квадрат расстояния между элементами в множестве, $\bar{d}_{c_i}^2$ – средний квадрат расстояния между элементами в кластере c_i , c – число кластеров, n_{c_i} – число элементов в кластере c_i , N – количество элементов в множестве.

В результате расчетов значение индекса Calinski-Narabasz для четырех кластеров равно 42,0383, а для пяти кластеров – 43,748. Следовательно, подтверждается предположение о том, что оптимальнее выбрать пять кластеров.

Результаты кластеризации отчетов об изменениях в ТКО, которое разработано компанией D-Link, методом k-средних представлены на рисунке 7.

В таблице 2 представлена информация о количестве отчетов, попавших в каждый кластер.

Кластеризация дает возможность определить особенности и детализировать рас-

пределение ошибок, характерное для каждого кластера.

На рисунке 1 представлено распределение исправленных ошибок за 5 лет для производителя D-Link. По тому же принципу рассчитаем количество исправлений за 5 лет в кластерах (рис. 8).

Сравнительный анализ графиков, представленных на рисунках 1 и 8, показывает, что экспоненциальная зависимость количества исправлений от года производства оборудования, характерная для ТКО D-Link в общем случае, не сохраняется для отдельных групп разработки. Общая тенденция сохраняется в 0-м и 4-м кластерах (рис. 8а и д), а в 1-м, 2-м и 3-м кластерах тенденция имеет другие формы зависимости. С точки зрения оценки качества приобретаемой продукции интерес представляет 3-й кластер, так как в 1-й год производства ТКО разработчики исправляют сравнительно небольшое количество ошибок по сравнению со вторым годом. Приобретая такую продукцию в первый год ее производства, потребитель может сталкиваться с задержкой в исправлениях ошибок производителем на протяжении двух лет.

Таким образом, с помощью кластеризации отчетов об исправлениях возможно выделить условные группы разработки внутри

Таблица 2
Результаты кластеризации методом k-средних

Номер кластера	1	2	3	4	5
Количество отчетов в кластере	12	10	7	4	11

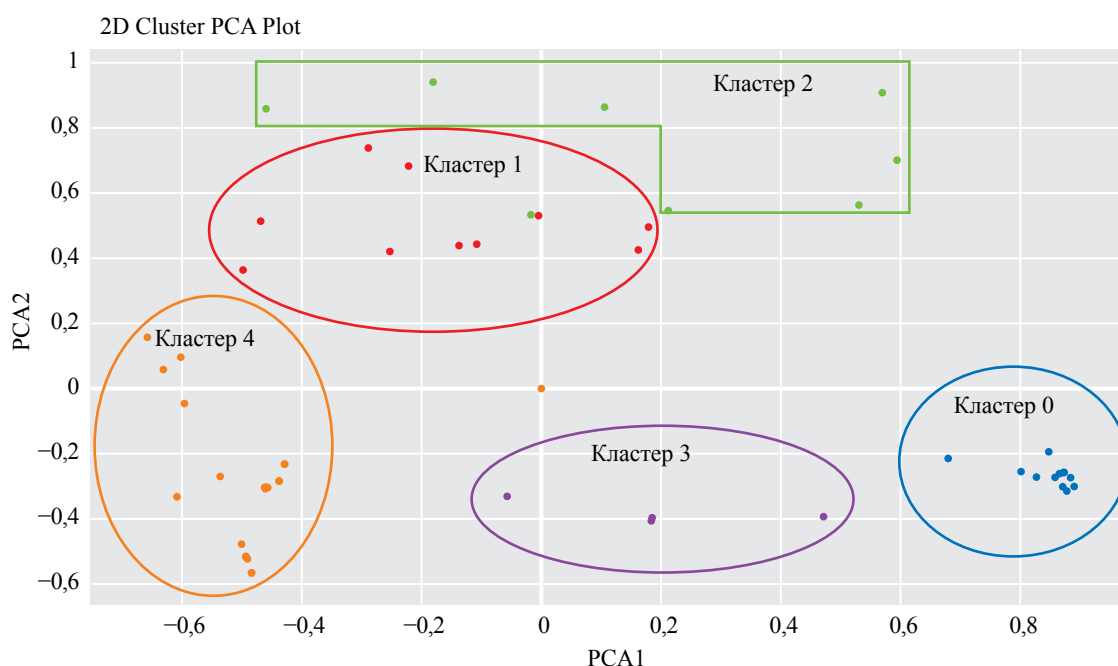


Рис. 7. Кластеризация текстов changelog, представленных компанией D-Link

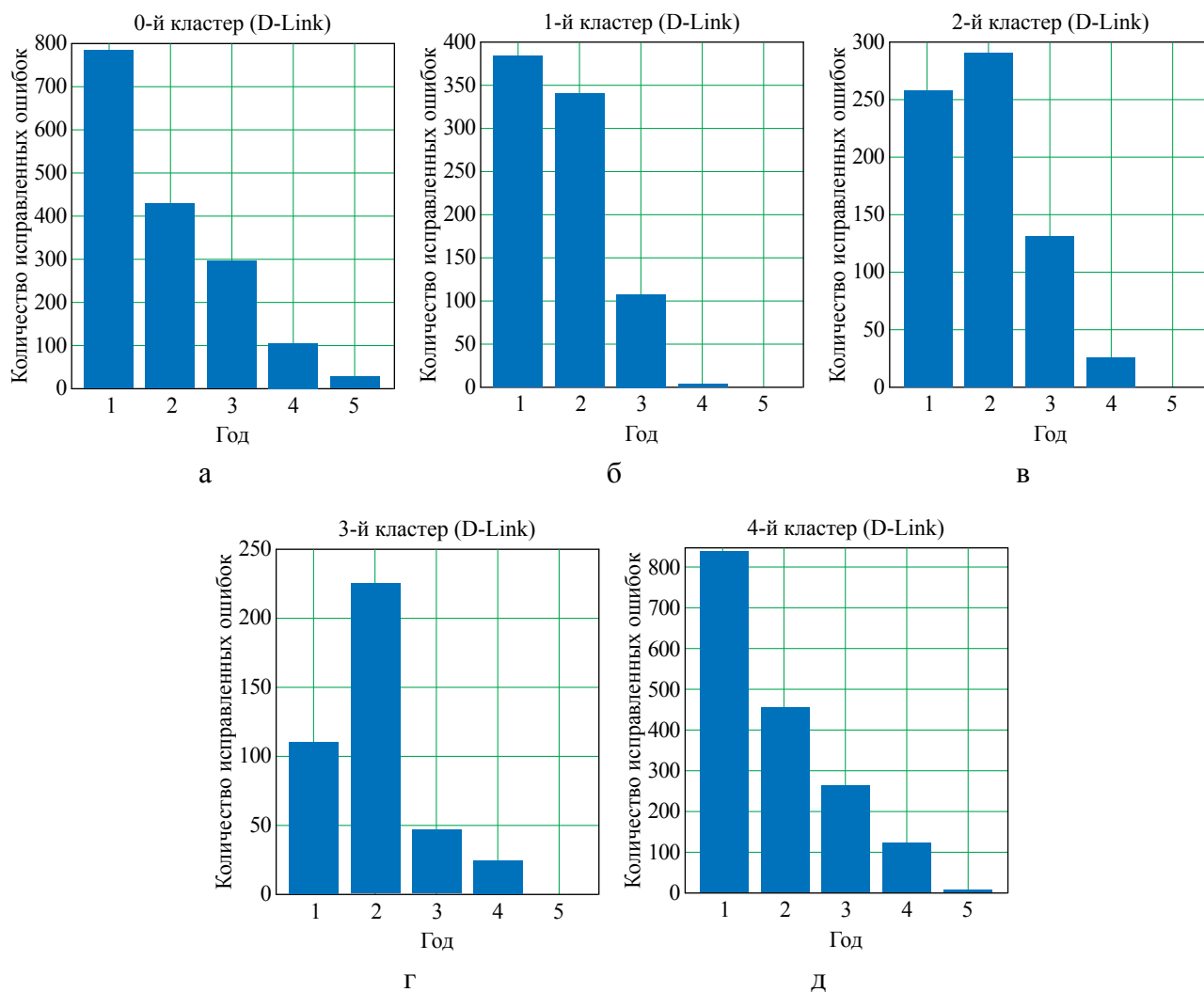


Рис. 8. Количество исправленных ошибок в кластерах за 5 лет

производителя, которые обладают отличной от общей тенденции производителя к исправлению ошибок. Проведенная кластеризация методом k -средних позволила выделить 5 условных групп разработки, три из которых не обладали общей тенденцией. Разработанная методика увеличивает полноту информации в процессе оценки качества и безопасности сетевого оборудования, что влияет на принятие решений о выборе продукта.

Заключение

Анализ открытой информации используется как предварительное исследование, что сравнительно дешевле и быстрее. Разработанный метод анализа описаний исправленных ошибок позволяет выявить заинтересованность производителя в поддержке заданного уровня качества и безопасности устройства, объединить

модели устройств по схожему ПО, объединить модели устройств по общим командам разработки, выявить общие свойства и закономерности в группах устройств. Таким образом, цель работы достигнута благодаря применению кластерного анализа отчетов об изменениях в ПО ТКО.

Подводя итоги вышесказанного, следует отметить, что производители ТКО закрывают возможности для исследования и исправлений ошибок, что не позволяет сконцентрировать усилия разных исследователей в области обеспечения качества и безопасности сетевого оборудования. Без использования методов анализа открытой информации методы инженерного анализа прототипа оборудования сталкиваются с трудностями, которые ведут к усложнению и повышению стоимости процесса исследования.



Проблемы применения кластерного анализа текстов описания исправлений заключаются в том, что многие производители не предоставляют отчеты, а имеющиеся описания исправлений представлены в едином стиле и обладают малым объемом, недостаточным для эффективного кластерного анализа содержащегося текста. Разрешить данные проблемы возможно с помощью модификации алгоритмов кластеризации путем применения другого метода кластеризации (например, dbscan, потому что он не требует априорной информации о количестве кластеров), за счет подбора признаков кластеризации для производителя ТКО; за счет создания информационной системы сбора, обработки и хранения отчетов об исправлениях, открытых баз уязвимостей, бюллетеней безопасности и другой информации, связанной с качеством и безопасностью сетевого оборудования.

Направление дальнейших исследований связано с применением разработанной методики совместно с инженерными методами оценки качества программно-аппаратных систем.

Список литературы

1. Яковлев А. Н., Данилова А. С. Применение технологий JTAG и Chip-Off в исследовании мобильных устройств // Теория и практика судебной экспертизы. 2018. Т. 13. №. 3. С. 109–115. DOI: 10.30764/1819-2785-2018-13-3-109-115
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25041-2014 Информационные технологии. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Руководство по оценке для разработчиков, приобретателей и независимых оценщиков. М.: Стандартинформ, 2016. 49 с.
3. Центр загрузок ASUS: официальный сайт компании ASUS. 2022. Дата обновления: 23.09.2022. URL: <https://www.asus.com/ru/support/Download-Center/> (дата обращения: 12.10.2022).
4. Центр загрузки: официальный сайт компании Zyxel. Дата обновления: 17.09.2022. URL: <https://www.zyxel.com/ru/ru/support/download> (дата обращения: 13.10.2022).
5. Сервер хранения файлов: официальный сайт компании D-Link. 2022. Дата обновления: 04.08.2022. URL: <http://ftp.dlink.ru> (дата обращения: 15.10.2022).
6. Борисов Л. А., Орлов Ю. Н., Осминин К. П. Идентификация автора текста по распределению частот буквосочетаний // Препринты Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. 2013. № 0. С. 26–27.
7. Бороденко Н. Н. Идентификация автора текста по стохастическим характеристикам письменной речи // Безопасность информационного пространства. Екатеринбург, 2014. С. 120–126.
8. Дюрдева П. С. Автоматическое определение автора текста на основе распределения частот буквосочетаний: бакалаврская работа. СПб.: СПбГУ, 2016. 29 с.
9. Сивоголовко Е. В. Методы оценки качества четкой кластеризации // КИО. 2011. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-otsenki-kachestva-chyotkoy-klasterizatsii> (дата обращения: 19.12.2022).

Об авторе

Нарышкин Константин Викторович – аспирант автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Научно-образовательный центр воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» им. академика В.П. Ефремова», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: информационные технологии, вычислительные системы, качество систем и программ, информационная безопасность, системы автоматического управления.



Clustering of reports on fixes to software used in network equipment

Naryshkin K. V.

Independent Non-Profit Organization of Further Vocational Education “Science and Education Center of Aerospace Defense “Almaz – Antey” Named After Academician V. P. Efremov”, Moscow, Russian Federation

This paper considers issues related to evaluating embedded systems quality and proposes solutions on the basis of information obtained from open sources. The paper considers the technologies restricting the possibilities of studying a sample of telecommunication equipment. The major part of this paper covers the findings obtained from the cluster analysis of public information about modifications to the software of network devices introduced by the software manufacturer. During the analysis, routers in 38 models from three manufacturers were studied. Based on the result of cluster analysis of reports on fixes to software, conventional groups of developers are identified within each manufacturing organization. Conclusions are made on the degree of manufacturers' involvement in maintaining the high quality of products developed.

Keywords: quality assessment, software error analysis, data clustering, embedded systems, information technologies

Information about the authors

Naryshkin Konstantin Victorovich – Postgraduate Researcher, Independent Non-Profit Organization of Further Vocational Education “Science and Education Center of Aerospace Defense “Almaz – Antey” Named After Academician V. P. Efremov”, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: information technologies, computing systems, quality of systems and software, information security, automatic control systems.





e-library



online версия