

**ДИНАМИКА СИСТЕМ,
МЕХАНИЗМОВ И МАШИН**
**DYNAMICS OF SYSTEMS,
MECHANISMS AND MACHINES**

Издается с ноября 1995 года

Выходит один раз в год

2023
Том 11, № 2

Учредитель
Омский государственный
технический университет

Главный редактор
В. Ф. Фефелов,
и. о. ректора ОмГТУ

Редакционная коллегия:
Е. Г. Андреева, доктор технических наук
Ю. А. Бурьян, доктор технических наук
А. В. Бубнов, доктор технических наук
Л. Г. Варепо, доктор технических наук
Е. Н. Ерёмин, доктор технических наук
П. С. Ложников, доктор технических наук
С. О. Подгорный, кандидат химических наук
А. В. Зыкина, доктор физ.-мат. наук
А. Г. Козлов, доктор технических наук
И. В. Богачков, доктор технических наук
В. А. Майстренко, доктор технических наук
В. И. Трушляков, доктор технических наук

Ответственный секретарь
И. М. Чумаченко, ведущий инженер
научно-аналитического отдела ОмГТУ

Компьютерная верстка
О. Г. Белименко

Язык публикаций:
русский, английский

Дата и номер договора о включении
рецензируемого научного издания в систему
Российского индекса научного цитирования:
213-04/2014 от 14.04.2014

Адрес в РИНЦ:
http://elibrary.ru/title_about.asp?id=50500

Адрес редакции:
644050, г. Омск, пр. Мира, 11, каб. Г-209
Контактный телефон:
(3812) 65-35-36
E-mail: dynamics2016@omgtu.ru
Телефон для рекламодателей: 65-35-36

© ОмГТУ, 2023

Подписано в печать 20.12.2023 г.
Дата выхода в свет 22.12.2023 г.

Формат 60×84¹/₈. Усл. печ. л. 5,75.
Бумага офсетная.
Тираж 300 экз. Заказ 83.

Отпечатано на дупликаторе
в типографии ОмГТУ.
644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.

СОДЕРЖАНИЕ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ, КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Т. В. Аюшеев, Т. Ц. Дамдинова, С. М. Бальжинимаева
Моделирование тел с эллипсоидными порами
в векторно-параметрическом представлении.....2

И. С. Кузнецов, Ф. Н. Притыкин
Определение влияния силы копания грунта ковшем экскаватора
на максимальные усилия в гидроцилиндрах.....8

**ДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.
ТРАНСПОРТНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

А. Е. Буров
Расчетно-экспериментальная оценка ресурса композитного бака
высокого давления в условиях ползучести.....15

**И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков,
А. И. Лукьянчик, П. В. Степень**
Определение мощности свч/вч-потерь в тороидальном резонаторе
ускорительного ионного двигателя по его спектру частот.....21

**И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков,
А. И. Лукьянчик, П. В. Степень**
Экспериментального исследования прототипа ионного двигателя
временнoлетным методом.....30

С. Вейси, В. В. Любимов
Применение генетического алгоритма для оптимизации
двухимпульсного перелёта в задаче о встрече двух космических
аппаратов на орбите марса.....37

М. М. Крикунов
Моделирование углового движения космического аппарата переменного
состава с учётом дестабилизирующих свойств реактивной струи.....45

П. С. Ячменев, В. В. Федянин, И. С. Вавилов
Разработка стенда измерения тяги на основе аэродинамического
метода для электроракетных двигателей малых космических
аппаратов.....51

**ИМИТАЦИОННЫЕ (МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ), СЕМИОТИЧЕСКИЕ
И СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

Д. П. Иниватов, А. Е. Сулавко, А. Е. Самотуга
Об оценке влияния алкогольной интоксикации на параметры голоса
в системах биометрической аутентификации.....58

Д. И. Кальдина, Е. Б. Юдин
Информационная система управления конференционной
деятельностью ОмГТУ.....67

В. П. Королев, Е. Б. Юдин
Оценка научного потенциала в области машиностроения в ОмГТУ.....76

В. И. Разумов
Когнитивные науки на современном уровне развития интеллекта83

А. В. Шастин
Применение инсайтинга для анализа бизнес-процессов в организации.....87

АВТОМАТИЗАЦИЯ. КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 004.925.84

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-2-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛ С ЭЛЛИпсоИДНЫМИ ПОРАМИ В ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

MODELING OF SOLIDS WITH ELLIPSOIDAL PORES IN VECTOR-PARAMETRIC REPRESENTATION

Т. В. Аюшеев^{1,2}, Т. Ц. Дамдинова¹, С. М. Бальжинимаева¹

¹Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия

²Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Россия

T. V. Ayusheev^{1,2}, T. Ts. Damdinova¹, S. M. Balzhinimaeva¹

¹East Siberia State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

²Byruat State University, Ulan-Ude, Russia

Аннотация. В статье рассматривается задача геометрического моделирования пор эллипсоидной формы с возможностью применения этой модели в условиях произвольной деформации. Используется способ построения трехпараметрического тела граничными поверхностями на базе интерполяционных функций Эрмита с помощью применения технологии параметрического твердотельного моделирования. Решение этой задачи даст возможность получить геометрическую модель деформируемых пористых объектов для изучения существующих и для создания новых материалов, обладающих требуемыми свойствами для разработки новых продуктов и процессов.

Ключевые слова: пористые материалы, структура пор, эллипсоид, геометрическое моделирование, твердотельное моделирование, трехпараметрическое тело, порция тела.

Abstract. The article discusses the problem of geometric modeling of ellipsoidal pores with the possibility of using this model under arbitrary deformation conditions. A method is used for constructing a three-parameter body with boundary surfaces based on Hermite interpolation functions using parametric solid modeling technology. Solving this problem will make it possible to obtain a geometric model of deformable porous objects for studying existing and for creating new materials that have the required properties for the development of new products and processes.

Keywords: porous materials, pore structure, ellipsoidal pores, geometric modeling, solid modeling, three-parameter body, body portion.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития новых технологий в материаловедении (машиностроение, легкая промышленность, медицина, строительство, металлообработка и т. д.) [1-4], разработка разнообразных пропиток, покрытий, искусственных материалов делают актуальной задачу их исследования как на этапе их создания, так и на этапе эксплуатации. При создании композиционных материалов и композитов взаимодействие материалов происходит в наноструктурах, размер которых составляет доли микрона [5, 6]. Такие материалы относятся к капиллярно-пористым объектам. Для исследования их характеристик необходимо провести большое количество экспериментов и с высокой точностью обрабатывать экспериментальные данные, что в производственных и лабораторных условиях затруднительно. Подобные исследования выполняются методами компьютерного моделирования, которые позволят получать количественные и качественные характеристики струк-

туры пористых объектов и их изменений при проведении технологических процессов. Благодаря развитию современных компьютеров и программ обработки данных, 3D-печати научные исследования последних лет позволяют проводить компьютерное моделирование существующих природных пористых материалов и новых материалов с подбором упаковки пор и их форм. Исследования по реальным объектам основываются на анализе изображений пористых объектов [7, 8], другая часть носит теоретический характер, где в качестве пор рассматриваются идеальные объекты. Так, в работе [9] представлены результаты экспериментов по анализу влияния формы пор на прочность. Это позволяет получать дополнительную информацию для понимания и прогнозирования процессов, характера протекания технологических процессов, и является важной темой для исследования. Целью исследований, направленных на создание пористых объектов, является подбор необходимых параметров с целью улучшения функциональных свойств материалов для подбора оптимальных характеристик с точки зрения механических, термических, акустических и других свойств.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В трехмерном пространстве R^3 задан криволинейный каркас порции тела, определяющий форму твердотельного элемента моделируемого объекта (рис. 1). В общем случае порция тела состоит из 8 угловых точек $P(i,j,k)$, $i,j,k=\{0,1\}$, 12 граничных кривых $r(u,j,k)$, $r(i,v,k)$, $r(i,j,w)$, где u, v и w – криволинейные параметры, изменяющиеся в пределах от 0 до 1 вдоль соответствующих граничных кривых порции. Порция тела имеет внутри пустые пространства в виде пор эллипсоидной формы. Необходимо построить вектор-функцию $r(u,v,w)$, $0 \leq u,v,w \leq 1$, которая при $u=0, u=1, v=0, v=1, w=0, w=1$ представляет нужную граничную поверхность порции тела с учетом заданной внутри эллипсоидных пор.

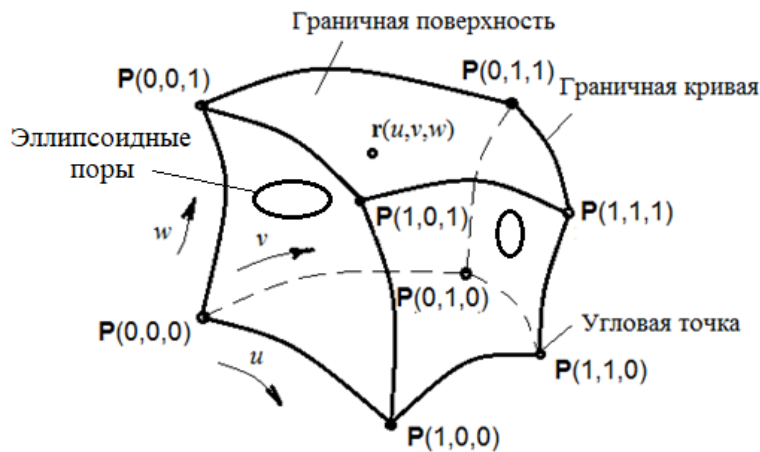


Рис. 1. Порция тела с эллипсоидными порами

III. ТЕОРИЯ

Уравнение порции тела в векторно-параметрической форме можно представить в виде [10-12]:

$$\mathbf{r}(u, v, w) = \mathbf{r}_2(u, v, w) - \mathbf{r}_1(u, v, w) - \mathbf{r}_0(u, v, w), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0(u, v, w) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 [\mathbf{F}_i(u) \mathbf{F}_j(v) \mathbf{F}_k(w) \mathbf{P}(i, j, k)] \\ \mathbf{r}_1(u, v, w) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 [\mathbf{F}_i(u) \mathbf{F}_j(v) \mathbf{r}(i, j, w)] + \sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^1 [\mathbf{F}_i(u) \mathbf{F}_k(w) \mathbf{r}(i, v, k)] \\ &\quad + \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 [\mathbf{F}_j(v) \mathbf{F}_k(w) \mathbf{r}(u, j, k)] - 2\mathbf{r}_0(u, v, w), \end{aligned}$$

$$\mathbf{r}_2(u, v, w) = \sum_{i=0}^1 [\mathbf{F}_i(u) \mathbf{r}(i, v, w)] + \sum_{j=0}^1 [\mathbf{F}_j(v) \mathbf{r}(u, j, w)] + \sum_{k=0}^1 [\mathbf{F}_k(w) \mathbf{r}(u, v, k)],$$

где $u, v, w \in [0,1]$, $i, j, k \in \{0,1\}$. $\mathbf{F}(g) = [1-g \ g]^T$.

Уравнение (1) состоит из трех составляющих. Первая составляющая данного уравнения линейно аппроксимирует значение функции $\mathbf{r}_0(u, v, w)$ в заданной точке, используя известные значения в угловых точках $\mathbf{P}(i, j, k)$, вторая составляющая представляет значение функции $\mathbf{r}_1(u, v, w)$, полученной на основе проведения двойной линейной интерполяции между парами граничных кривых сначала в одном направлении, затем в ортогональном, третья составляющая $\mathbf{r}_2(u, v, w)$ – линейная интерполяция между парами противоположных граничных поверхностей порции тела.

Для описания граничных кривых и поверхностей порции тела чаще всего используются кубические интерполяционные функции. Тогда уравнения для сегмента граничных кривых будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(u, j, k) &= \sum_{i=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{i0}(u) + \mathbf{P}_u(i, j, k) \mathbf{I}_{i1}(u)], \\ \mathbf{r}(i, v, k) &= \sum_{j=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{j0}(v) + \mathbf{P}_v(i, j, k) \mathbf{I}_{j1}(v)], \\ \mathbf{r}(i, j, w) &= \sum_{k=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{k0}(w) + \mathbf{P}_w(i, j, k) \mathbf{I}_{k1}(w)], \end{aligned}$$

где $u, v, w \in [0,1]$, $\mathbf{I}_{00}, \mathbf{I}_{10}, \mathbf{I}_{01}, \mathbf{I}_{11}$ – кубические функции сопряжения.

Граничные поверхности тела будут описываться следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(u, v, k) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{i0}(u) \mathbf{I}_{j0}(v) + \mathbf{P}_u(i, j, k) \mathbf{I}_{i1}(u) \mathbf{I}_{j0}(v) + \\ &\quad + \mathbf{P}_v(i, j, k) \mathbf{I}_{i0}(u) \mathbf{I}_{j1}(v) + \mathbf{P}_{uv}(i, j, k) \mathbf{I}_{i1}(u) \mathbf{I}_{j1}(v)], \\ \mathbf{r}(i, v, w) &= \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{j0}(v) \mathbf{I}_{k0}(w) + \mathbf{P}_v(i, j, k) \mathbf{I}_{j1}(v) \mathbf{I}_{k0}(w) + \\ &\quad + \mathbf{P}_w(i, j, k) \mathbf{I}_{j0}(v) \mathbf{I}_{k1}(w) + \mathbf{P}_{vw}(i, j, k) \mathbf{I}_{j1}(v) \mathbf{I}_{k1}(w)], \\ \mathbf{r}(u, j, w) &= \sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^1 [\mathbf{P}(i, j, k) \mathbf{I}_{i0}(u) \mathbf{I}_{k0}(w) + \mathbf{P}_u(i, j, k) \mathbf{I}_{i1}(u) \mathbf{I}_{k0}(w) + \\ &\quad + \mathbf{P}_k(i, j, k) \mathbf{I}_{i0}(u) \mathbf{I}_{k1}(w) + \mathbf{P}_{uw}(i, j, k) \mathbf{I}_{i1}(u) \mathbf{I}_{k1}(w)], \end{aligned}$$

где $u, v, w \in [0,1]$, $i, j, k \in \{0,1\}$.

Для построения эллипсоидной поры внутри порции тела запишем уравнение поверхности эллипсоида в декартовой системе координат:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} + \frac{(z - z_0)^2}{c^2} = 1,$$

где x_0, y_0, z_0 – координаты центра эллипсоида, a, b, c – полуоси эллипсоида.

Векторно-параметрическое уравнение такого эллипсоида имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(\varphi, \theta) &= \{x_0 + a \sin \theta \cos \varphi; y_0 + b \sin \theta \sin \varphi; z_0 + c \cos \theta\}, \\ -\frac{\pi}{2} &\leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi. \end{aligned}$$

В общем случае, когда три оси различны, то получается трехосный эллипсоид (рис. 2). Если какие-либо две оси эллипсоида одинаковы, то эллипсоид называют сфероидом. При равенстве трех осей эллипсоид принимает форму сферы.

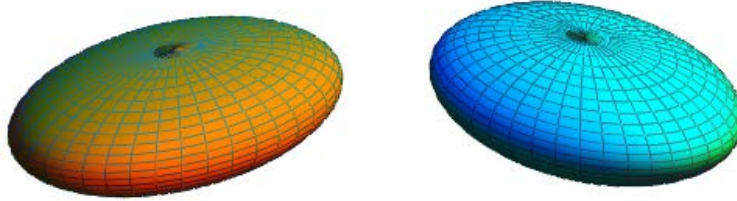


Рис. 2. Эллипсоиды

Для задания эллипсоидной поры в системе криволинейных координат тела запишем уравнение

$$\frac{(u - u_0)^2}{a^2} + \frac{(v - v_0)^2}{b^2} + \frac{(w - w_0)^2}{c^2} = 1,$$

где $u_0, v_0, w_0 \in [0, 1]$, a, b, c , – криволинейные координаты центра и величины полуосей эллипсоидной поры. Тогда порцию тела с эллипсоидными порами в данной системе координат можно определить, как

$$\tilde{\mathbf{r}}(u, v, w) = \mathbf{r}(u, v, w) \tilde{f}(u, v, w),$$

где

$$\tilde{f}(u, v, w) = \begin{cases} 1, & \frac{(u - \mathbf{u}_\tau)^2}{\mathbf{a}_\tau^2} + \frac{(v - \mathbf{v}_\tau)^2}{\mathbf{b}_\tau^2} + \frac{(w - \mathbf{w}_\tau)^2}{\mathbf{c}_\tau^2} \geq 1 \\ 0, & \frac{(u - \mathbf{u}_\tau)^2}{\mathbf{a}_\tau^2} + \frac{(v - \mathbf{v}_\tau)^2}{\mathbf{b}_\tau^2} + \frac{(w - \mathbf{w}_\tau)^2}{\mathbf{c}_\tau^2} < 1 \end{cases},$$

$\mathbf{u}_\tau, \mathbf{v}_\tau, \mathbf{w}_\tau, \mathbf{a}_\tau, \mathbf{b}_\tau, \mathbf{c}_\tau, \tau = 1..n$ – криволинейные координаты центров и величины полуосей эллипсоидных пор.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Разработанная модель была протестирована в среде MathCAD. При задании порции тела в форме куба и эллипсоида внутри него отверстие на промежуточной поверхности имеет форму эллипса (рис. 3).

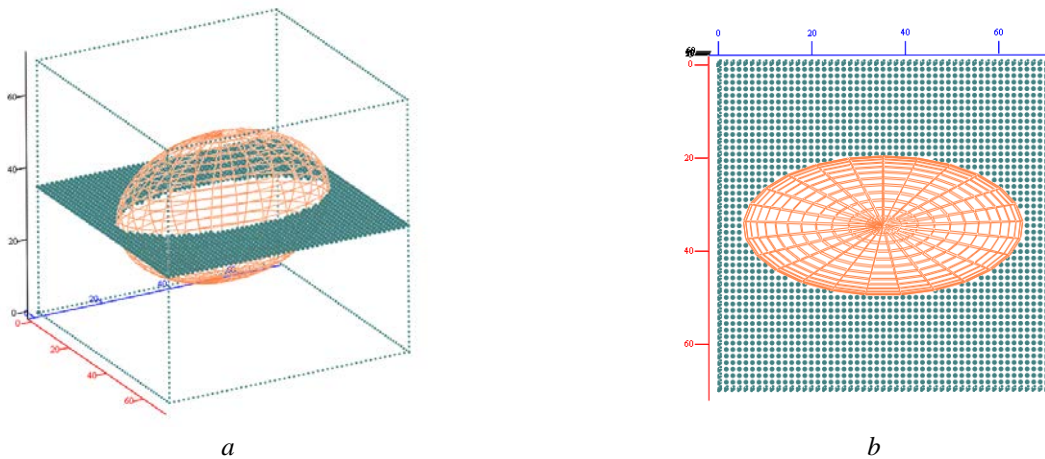
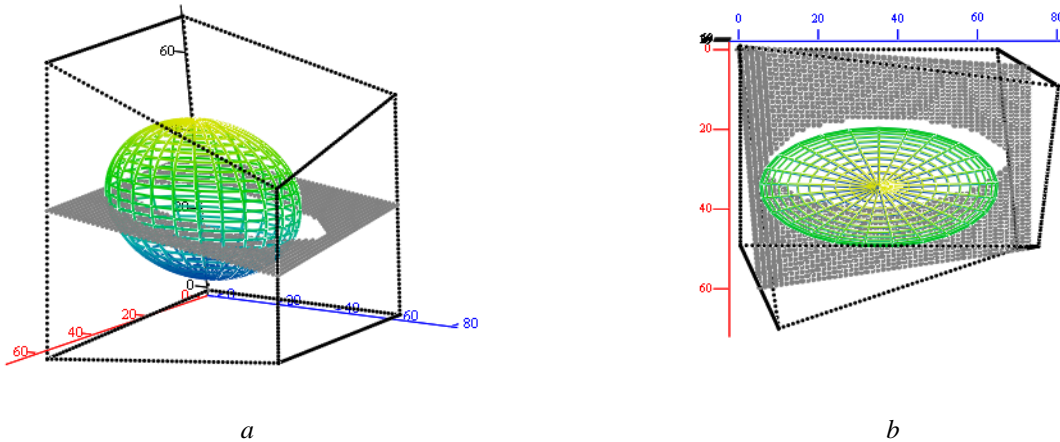


Рис. 3. Эллипсоид в порции тела в форме куба
a – общий вид; b – вид сверху

При изменении положения угловых точек куба граничные и промежуточные поверхности преобразуются в форму гиперболического параболоида, а отверстия в форму овала (рис. 4). Такая же ситуация происходит при задании множества эллиптических пор на основе цифровой обработки изображений.



a *b*
Рис. 4. Эллипсоид внутри порции деформированного тела
a – общий вид; *b* – вид сверху

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для моделирования пористых сред с эллипсоидными формы можно задать их порциями трехмерного параметрического тела. В качестве базисных функций для построения уравнения порции пористого тела используются линейные функции. Приведенный пример показывает, что при задании тела в параметрическом виде можно определить внутреннюю структуру при его деформации. Отличительной особенностью данного метода является возможность построения внутренних промежуточных сеток при наличии цифровых данных эллипсоидных пор внутри составного тела. Программная реализация этого метода показала его вычислительную устойчивость и быстродействие, что обеспечивает несомненные преимущества в задачах визуализации, предварительной аппроксимации дискретного набора данных при инженерном моделировании объектов пористой структуры.

Источник финансирования. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ВСГУТУ Молодые ученые 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левандовский А. Н., Мельников Б. Е., Шамкин А. А. Моделирование пористого материала методом конечных элементов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 2 (53). С. 61–77. doi: 10.18720/CUBS.53.5
2. Использование 3D печати в медицине. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/obzor-primeneniya-3d-printerov-v-medicine.html> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Бегун П. И., Лебедева Е. А., Лобачева Д. А., Щепилина О. В. Компьютерное моделирование в прикладной биомеханике : учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 159 с.
4. Аюшеев Т. В., Дамдинова Т. Ц., Бальжинимаева С. М. Моделирование пористых тел на основе цифровой обработки изображений // Информационные системы и технологии в образовании, науке и бизнесе : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Улан-Удэ : Изд-во Бурятского гос. ун-та, 2021. С. 5–10. DOI: 10.18101/978-5-9793-1626-0-5-10.
5. Звонарев С. В., Кортгов В. С., Штанг Т. В. Моделирование структуры и свойств наносистем : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал, ун-та, 2014. 120 с.
6. Фандеев В. П., Самохина К. С. Методы исследования пористых структур // Интернет-журнал «Наукоеведение». 2015. Т. 7, № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN415.pdf> (дата обращения: 10.10.2023). DOI: 10.15862/34TVN415.

7. Пыхалов А. А., Зыонг В. Л., Толстиков В. Г. Построение и анализ конечно-элементных моделей неоднородных деформируемых твердых тел на основе сканирования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 4. С. 106–118. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.10.
8. Дамдинова Т. Ц., Аюшеев Т. В., Бальжинимаева С. М., Абатнин А. А. Моделирование тел со сферическими порами методом обобщенной линейной интерполяции // Программные системы и вычислительные методы. 2022. № 2. С. 42–51. DOI: 10.7256/2454-0714.2022.2.38262.
9. Утукина А. М., Смолин И. Ю., Зимина В. А. Влияние формы и расположения пор на эффективные характеристики пористой керамики // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сб. тр. XVI Междунар. конф. (Екатеринбург, 16–20 мая 2022 г.) / Ин-т машиноведения им. Э. С. Горкунова УрО РАН. Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН, 2022. С. 153.
10. Āurikovič R., Czanner S. Modelling with Three Types of Coons Bodies // International Journal of Modeling and Simulation. 2004. Vol. 24, no. 2. P. 97–101. <https://doi.org/10.1080/02286203.2004.11442293>.
11. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование. М. : Изд-во физ.-мат. лит., 2002. 472 с.
12. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / пер. с англ. Г. П. Бабенко, Г. П. Воскресенского. М. : Мир, 1982. 304 с.

УДК 514.18

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-8-14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ КОПАНИЯ ГРУНТА КОВШОМ ЭКСКАВАТОРА НА МАКСИМАЛЬНЫЕ УСИЛИЯ В ГИДРОЦИЛИНДРАХ

DETERMINATION OF THE INDEX OF SOIL DIGGING WITH AN EXCAVATOR BUCKET ACCORDING TO THE MAXIMUM LOADS IN HYDRAULIC CYLINDERS

И. С. Кузнецов, Ф. Н. Притыкин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

I. S. Kuznetsov, F. N. Pritykin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье решается задача определения сил, действующих на штоках гидроцилиндров при выполнении операции копания грунта ковшем экскаватора с различной глубиной и ориентацией выходного звена при его движении по горизонтальной траектории. По известной силе сопротивления копанию вычисляются силы, действующие по направлению штоков гидроцилиндров. С использованием полученных данных выполнено изображение гиперповерхности на чертеже Радищева, отражающей влияние значения силы на штоке гидроцилиндра ковша от значений обобщенных координат при заданном угле ориентации ковша и заданной силе сопротивления. Определены аналитические зависимости, которые используются для проверки возможности обеспечения движения ковша с заданными условиями.

Ключевые слова: синтез движения, механизм манипулятора экскаватора, геометрическое моделирование, гиперповерхности, компьютерное моделирование движений, выходное звено.

Abstract. The article solves the problem of determining the forces acting on the rods of hydraulic cylinders when performing the operation of digging the soil with an excavator bucket with different depths and orientations of the output link when it moves along a horizontal trajectory. Based on the known digging resistance force, the forces acting in the direction of the hydraulic cylinder rods are calculated. Using the data obtained, an image of the hypersurface was made on the Radishchev drawing, reflecting the influence of the force value on the bucket hydraulic cylinder rod from the values of generalized coordinates for a given bucket orientation angle and a given resistance force. Analytical dependencies are determined, which are used to check the possibility of ensuring the movement of the bucket with given conditions

Keywords: movement synthesis, excavator arm mechanism, geometric modeling, hyper surfaces, computer simulation of movements, output link.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из основных машин, применяемых при выполнении земляных работ, является одноковшовый гидравлический экскаватор [1-4]. Кроме выбора конструктивных размеров манипулятора необходимо определять максимальные усилия копания с учетом возможных активных усилий на штоках гидроцилиндров и при различном позиционировании рабочего органа манипулятора экскаватора.

Зависимости, полученные в ранее проведенных исследованиях по данной задаче, позволяют определить усилия копания при различном положении рабочего органа. Например, в [5, 6] приведены схемы, отражающие взаимосвязь между позиционированием рабочего органа манипулятора и усилиями копания при повороте только лишь выходного звена (ковша). При этом центр выходного звена, связанный с одним из зубьев ковша, перемещался по круговой траектории.

Если необходимо осуществить копание грунта на определенной глубине, например, при ремонте трубопроводов, при котором траектория движения зуба ковша должна быть горизонтальным отрезком прямой, процесс копания будет возможен только при одновременном нелинейном изменении каждой из обобщенных координат механизма манипулятора экскаватора.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с вышеизложенным, актуальной при разработке автоматизированной системы управления движением ковша является задача определения максимальной силы копания грунта ковшом для различной глубины и различной ориентации выходного звена при его движении по горизонтальной траектории с учетом возможных усилий на штоках гидроцилиндров. Для анализа максимально возможной силы копания в различных точках конфигурационного пространства целесообразно использовать чертеж Радишева.

Чтобы определить зависимость максимального усилия копания от позиционирования рабочего оборудования, необходимо знать значения обобщенных координат и характер их изменения. Для определения усилия копания необходимо управлять рабочим процессом экскавации грунта. Одним из простых способов является копание поворотом рукояти, однако в таком случае невозможно создать горизонтальную плоскость в низу траншеи движением ковша на определенной глубине. Это можно обеспечить в случае совмещения усилий каждого из гидроцилиндров. В таком случае гидроцилиндр стрелы будет работать на поддержание постоянной высоты ковша экскаватора. Рукоять будет совершать копание грунта с максимальным усилием, а ковш будет работать в тормозном режиме, обеспечивая заданный угол резания.

III. ТЕОРИЯ

Построенные конфигурации экскаватора позволяют определить положения каждого звена манипулятора и значения обобщенных координат q_i при моделировании движения (рис. 1).

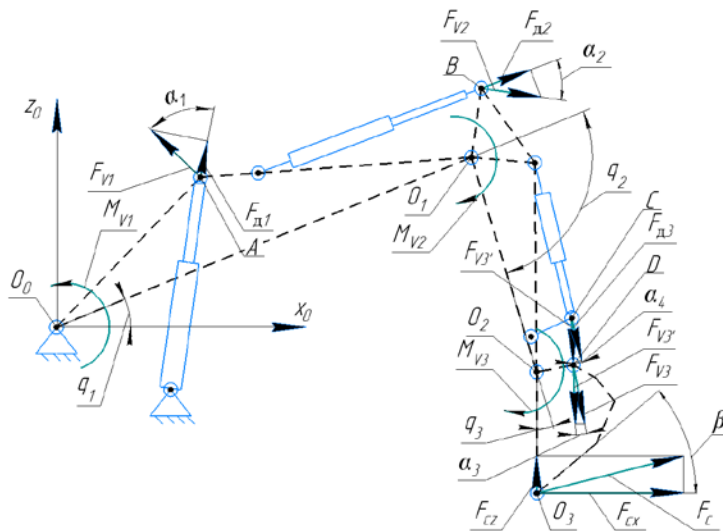


Рис. 1. Схема составяющих силы сопротивления копанию грунта ковшом

Для определения значений обобщенных координат и положений звеньев экскаватора была создана программа геометрического компьютерного моделирования с использованием языка программирования AutoLisp в среде AutoCAD. Моделирование движения выполнялось в плоскости $O_0x_0z_0$ с обеспечением постоянной глубины копания h и заданной ориентации ковша (угла $\beta = const$ наклона зуба ковша (выходного звена)) по вектору скоростей [7, 8] (рис. 1).

На рис. 1 представлено схематичное изображение векторов сил и крутящих моментов при функционировании механизма манипулятора экскаватора. Для обеспечения движения вершины зуба ковша по горизонтальной траектории необходимо при помощи автоматизированной системы управления одновременно изменять значения обобщенных координат q_1 , q_2 и q_3 с помощью гидроцилиндров. Необходимо определить диапа-

зон изменения сил $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$, развиваемых на штоках гидроцилиндров при заданном значении усилия сопротивления ковша F_c . Если одна из указанных сил на штоках гидроцилиндров превышает максимально допустимое значение, то усилие сопротивления копания F_c необходимо уменьшить. Диапазон изменения сил $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$ необходимо определить для различных положений механизма манипулятора при различной ориентации и глубине погружения ковша (рис. 1). На рис. 1 изображены крутящие моменты M_{V1} , M_{V2} и M_{V3} , возникающие во вращательных кинематических парах с центрами в точках O_0 , O_1 и O_2 . Движения в данных кинематических парах определяют обобщенные координаты q_i . Определим крутящие моменты M_{V1} , M_{V2} и M_{V3} для идеального механизма, в котором не будем учитывать силы тяжести, инерционные и центробежные силы отдельных звеньев механизма. Влияние указанных сил на нагруженность рабочего оборудования экскаватора подробно исследована в [5, 6].

Зависимость крутящих моментов M_{V1} , M_{V2} и M_{V3} от проекций силы F_c на оси O_0x_0 и O_0z_0 определяется линейной системой уравнений:

$$\begin{pmatrix} M_{V1} \\ M_{V2} \\ M_{V3} \end{pmatrix} = -J^T \begin{pmatrix} F_{cx} \\ F_{cz} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где M_{V1} , M_{V2} , M_{V3} – крутящие моменты; F_{cx} , F_{cz} – проекции силы сопротивления копания F_c на оси O_0x_0 и O_0z_0 ; J – матрица Якоби [7]. Заметим, что транспонированная матрица Якоби размером 3×3 задает движение с заданной ориентацией выходного звена (ковша) $\beta = \text{const}$.

В системе линейных уравнений (1) в качестве неизвестных выступают крутящие моменты M_{V1} , M_{V2} и M_{V3} . По определенным крутящим моментам найдем силы F_{V1} , F_{V2} и F_{V3} , действующие в точках A , B и C (рис. 1) в местах крепления шарниров гидроцилиндров. Силы F_{V1} , F_{V2} и F_{V3} , приложенные в точках A , B и C , определяются по зависимостям:

$$F_{V1} = M_{V1}/p_1, \quad F_{V2} = M_{V2}/p_2, \quad F_{V3} = M_{V3}/p_3. \quad (2)$$

где p_1, p_2, p_3 – определяют соответственно длины отрезков прямых (плечи действия сил), заданных точками O_0A , O_1B и O_2C .

Силы, действующие по направлению штоков гидроцилиндров для обеспечения крутящих моментов M_{V1} , M_{V2} и M_{V3} , определяются по зависимостям:

$$F_{д1} = F_{V1} \cdot \cos \alpha_1, \quad F_{д2} = F_{V2} \cdot \cos \alpha_2, \quad F_{д3} = (F_{V3} \cdot \cos \alpha_3) \cdot \cos \alpha_4, \quad (3)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4$ – углы, образованные между направлениями действия векторов сил F_{V1} , F_{V2} и F_{V3} и направлениями осей штоков гидроцилиндров. Угол α_3 задает угол между направлением силы F_{V3} и направлением отрезка CD (рычага ковша).

Исследуем значения сил $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$ при изменении обобщенных координат q_i , когда точка O_3 , расположенная на зубе ковша, перемещается по горизонтальной траектории. При этом вначале задаем наибольшее возможное усилие копания F_c . Для визуализации расчетов исследуем значения $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$ с использованием чертежа Радищева [8-10]. На рис. 2 изображены на проекциях $O_q q_1 q_2$, $O q_1 q_3$ чертежа Радищева траектории движения механизма экскаватора в конфигурационном пространстве при движении точки O_3 по горизонтальным отрезкам прямых на глубине 5 см, 100 см и 200 см при значении угла ориентации ковша $\beta = 40^\circ$. На проекции $O_q q_1 F_{д1}$ изображена, соответственно, зависимость $F_{д3} = f_1(q_1, q_2, q_3)$, при движении ковша на различных указанных глубинах. Аналогичные зависимости могут быть построены для других сил $F_{д1}$ и $F_{д2}$. При превышении значений $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$ максимально допустимым усилиям на штоках гидроцилиндров необходимо уменьшить значение силы F_c . Сила сопротивления F_c определяется на основе зависимости, предложенной в работе [11] и составляет 9.7 кН. Для уменьшения силы сопротивления копания F_c целесообразно уменьшить толщину срезаемой стружки резания, так как данный параметр оказывает наибольшее влияние на значение F_c .

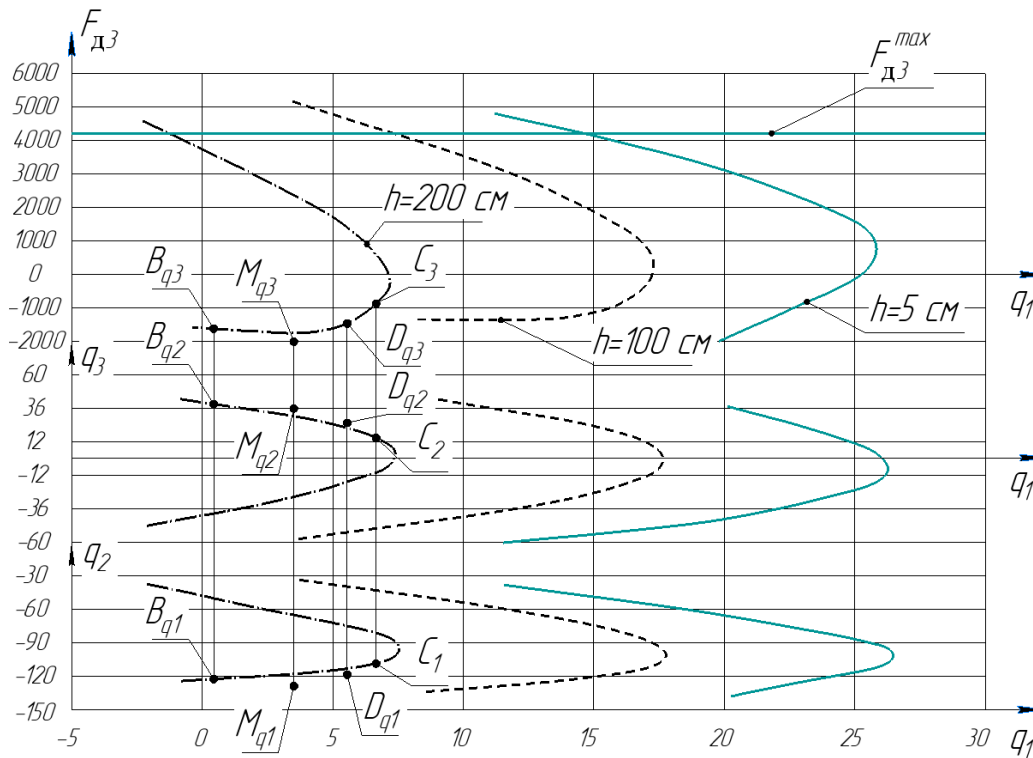


Рис. 2. Изображение гиперповерхности на чертеже Радищева, отражающей влияние значения силы $F_{Д3}$ от значений обобщенных координат при $\beta = 40^\circ$ и $F_c = 10$ кН

Определим точечный каркас узловых точек гиперповерхностей $F_{д1} = f_1(q_1, q_2, q_3)$, $F_{д2} = f_2(q_1, q_2, q_3)$ и $F_{д3} = f_3(q_1, q_2, q_3)$ на чертеже Радищева с помощью использования нерегулярной сетки [12]. В статье приведены результаты построения точек только одной из гиперповерхностей $F_{д3} = f_3(q_1, q_2, q_3)$. Узловые точки гиперповерхностей будем задавать положениями конфигураций, полученных с шагом смещения точки O_3 центра выходного звена, равным 260 мм. Гиперповерхности Σ_1 , Σ_2 и Σ_3 определяются однопараметрическим множеством линий, полученных точками четырехмерных пространств $O_{q_1q_2q_3}F_{д1}$, $O_{q_1q_2q_3}F_{д2}$ и $O_{q_1q_2q_3}F_{д3}$, задающих конфигурации механизма экскаватора и значения сил $F_{д1}$, $F_{д2}$ и $F_{д3}$ при движении ковша по горизонтальным траекториям. Для задания координат точек гиперповерхностей используем полученную базу данных, структура которой представлена в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ, ЗАДАЮЩИХ ЗНАЧЕНИЯ СИЛ $F_{д1}$, $F_{д2}$ И $F_{д3}$
ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЗМА МАНИПУЛЯТОРА ЭКСКАВАТОРА

Значения h и β		Номер конфигурации	q_1	q_2	q_3	$F_{д1}$	$F_{д2}$	$F_{д3}$
$\beta = 40^\circ$	$h = 5$	1	11.5	41	60.5	-2	10	5126
		4	26	101.2	14.2	-2	12	3627
	
	$h = 100$	1	3.7	-36.6	-57.1	-3	11	5514
		4	11	-62.7	-38.3	-2	14	3477
	

На рис. 2 представлено изображение указанных линий каркаса гиперповерхности $\Sigma_3 \rightarrow F_{д3} = f_3(q_1, q_2, q_3)$. С использованием гиперповерхностей Σ_1, Σ_2 и Σ_3 возможно в приближенном виде для любой промежуточной конфигурации при построении движения вычислять значения сил $F_{д1}, F_{д2}$ и $F_{д3}$. Полученные значения сил $F_{д1}, F_{д2}$ и $F_{д3}$ должны удовлетворять заданным предельным значениям $F_{д1} < F_{д1}^{max}, F_{д2} < F_{д2}^{max}, F_{д3} < F_{д3}^{max}$, где $F_{д1}^{max}, F_{д2}^{max}, F_{д3}^{max}$ – максимально возможные усилия, развиваемые на штоках гидроцилиндров (рис. 2).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Алгоритм вычисления значений сил $F_{д1}, F_{д2}$ и $F_{д3}$ по значениям q_i, h и заданных узловых нерегулярных точек гиперповерхностей Σ_1, Σ_2 и Σ_3 следующий.

1. Определение ближайшей линии l_h гиперповерхности Σ_3 , соответствующей заданной глубине копания h .

2. Определение ближайших узловых точек $C_q(C_{q1}, C_{q2}, C_{q3})$ и $D_q(D_{q1}, D_{q2}, D_{q3})$ гиперповерхности Σ_3 , находящихся на линии l_h с использованием базы данных расчетов (таблица 1) и положения текущей конфигурации, заданной точкой $M_q(q_{M1}, q_{M2}, q_{M3})$.

3. Определение ближайшей точки B_q от точки M_q , расположенной на кривой l_h , не принадлежащей дуге, заданной точками C_q и D_q с использованием базы данных (таблица 1).

4. Задание уравнения параболы в точечном исчислении [12], проходящей через точки $B_q(B_{q1}, B_{q2}, B_{q3}), D_q(D_{q1}, D_{q2}, D_{q3})$ и $C_q(C_{q1}, C_{q2}, C_{q3})$. Уравнение дуги параболы в точечном исчислении имеет следующий вид:

$$M_q = (B_q - D_q) \frac{\bar{t}(tD - t)}{tD_q} + (D_q - C_q) \frac{t(t - tD)}{tD_q} + D, \quad (4)$$

где $(0 \geq t \geq 1)$ – текущий параметр, который определяет положение точки M_q дуги параболы, расположенной между точками C_q и D_q при изменении значения параметра t от нуля до единицы; $\bar{t} = 1 - t$ – дополнение параметра t до единицы; B_q, D_q и C_q – узловые нерегулярные точки, принадлежащие гиперповерхности Σ_3 , через которые проходит моделируемая кривая парабола в четырехмерном пространстве.

5. Вычисление координат точки M_q гиперповерхности Σ_1 по текущим координатам q_{M1}, q_{M2} и q_{M3} .

Параметр tD определяет положение точки $D_q \in \Sigma_1$. С учетом покоординатного расчёта для четырехмерного пространства, получим:

$$\begin{aligned} q_1^M &= (q_1^B - q_1^D) \frac{\bar{t}(tD - t)}{tD} + (q_1^D - q_1^C) \frac{t(t - tD)}{tD} + q_1^D, \\ q_2^M &= (q_2^B - q_2^D) \frac{\bar{t}(tD - t)}{tD} + (q_2^D - q_2^C) \frac{t(t - tD)}{tD} + q_2^D, \\ q_3^M &= (q_3^B - q_3^D) \frac{\bar{t}(tD - t)}{tD} + (q_3^D - q_3^C) \frac{t(t - tA2)}{tD} + q_3^D, \end{aligned} \quad (5)$$

$$F_{д1}^D = (F_{д1}^B - F_{д1}^D) \frac{\bar{t}(tD - t)}{tD} + (F_{д1}^D - F_{д1}^C) \frac{t(t - tD)}{tD} + F_{д1}^D \quad (6)$$

Так как положение точки D_q известно, то возможно вычисление параметра $tD = B_q D_q / B_q C_q$. На основе решения трёх уравнений зависимостей (5) возможно вычисление трёх значений параметра t , так как q_1^M, q_2^M, q_3^M являются известными переменными (координаты точки D_q), заданными текущими значениями обобщенных координат q_i механизма манипулятора. По данным трём значениям t возможно определение среднего значения параметра t^c . Переменную $F_{д1}^D$ вычисляют по уравнению (6). При этом вместо параметра t используется среднее значение t^c . Следовательно, используя соотношения (5) и (6) для текущего положения механизма манипулятора с некоторым приближением, возможно найти значение параметра усилия на штоке гидроцилиндра $F_{д1} = F_{д1}^D$ при заданной силе F_c . На рис. 3 представлен синтез движения механизма манипулятора при заданных значениях параметров h и β . Изменение значений крутящих моментов с центрами в точках O_1 и O_2 показаны окружностями, радиус которых зависит от значений M_{V2} и M_{V3} .

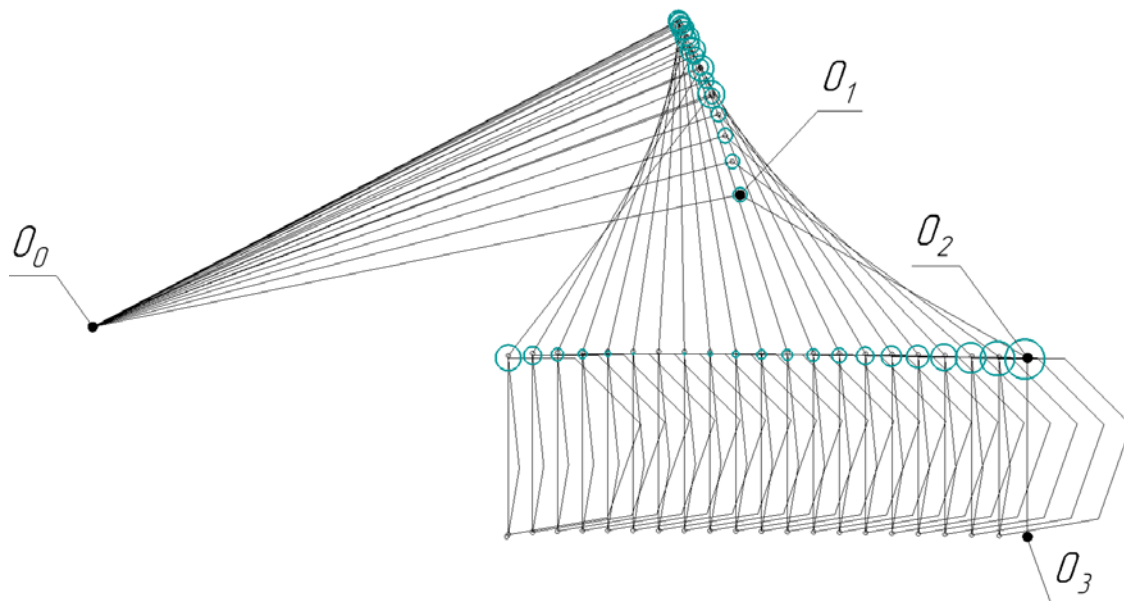


Рис. 3. Изменение значений крутящих моментов M_{V2} и M_{V3} при синтезе движения механизма манипулятора экскаватора при $\beta = 40^\circ$ и $h = 5$ см

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные аналитические зависимости (5) и (6) используют для проверки условия обеспечения заданных максимальных усилий на штоках гидроцилиндров при заданной силе сопротивления F_c . Если указанное условие не выполняется, силу F_c уменьшают. При этом моделирование движения выполняется заново с уменьшением толщины срезаемой стружки грунта.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования могут быть использованы при разработке информационно-управляющих комплексов подвижных объектов, в частности при разработке автоматизированной системы управления движением рабочего оборудования экскаватора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Timashev S. A., Bushinskaya A. V. Methods of Assessing Integrity of Pipeline Systems with Different Types of Defects // *Diagnostics and Reliability of Pipeline Systems*. 2016. P. 9–43. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-25307-7_2.
2. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Анализ устройств предотвращения повреждения стенки трубопровода // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство* : сб. материалов II Нац. науч.-практ. конф. (Омск, 18–19 апр. 2019 г.). Омск : Изд-во Сиб. гос. автомобильно-дорож. ун-та (СибАДИ), 2019. С. 7–9.
3. Демиденко А. И., Кузнецов И. С. Совершенствование конструкции рабочего оборудования гидравлического экскаватора // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2020. Т. 17, № 1 (71). С. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-12-21>.
4. Аникин Е. А., Габелая Р. Д., Салюков В. В. [и др.]. Эффективные методы ремонта магистральных трубопроводов. М. : ООО «ИРЦ Газпром», 2001. 108 с.
5. Шестаков В. С., Колесников П. А. Особенности расчета усилий копания и нагрузок на элементы рабочего оборудования гидравлических экскаваторов // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2012. № 27-28. С. 95–100.

6. Комиссаров А. П., Шестаков В. С., Набиуллин, Р. Ш., Хорошавин С. А. Исследование нагруженности рабочего оборудования гидравлического экскаватора «обратная лопата» // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 6 (158). С. 15–20. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-15-20.

7. Whitney D. E. The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators // Journal Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1972. Vol. 94, no. 4. P. 303–309. <https://doi.org/10.1115/1.3426611>.

8. Притыкин Ф. Н., Кузнецов И. С. Геометрическое моделирование процессов выполнения подкопочных работ экскаватором с целью предотвращения повреждения стенки трубопровода // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-28-34.

9. Притыкин Ф. Н. Моделирование гиперповерхностей, отражающих взаимосвязь кинематических параметров механизма антропного робота // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19, № 7 (217). С. 21–29. DOI: 10.14489/vkit.2022.07.pp.021-029.

10. Радищев В. П. О применении геометрии четырех измерений к построению равновесных физико-химических диаграмм // Известия сектора физ.-хим. анализа. 1947. Т. 15. С. 129–134.

11. Кадыров А. С., Рамазан Г. А., Курмашева Б. К., Мусабекова М. И. Анализ расчетов сил сопротивления для различных схем разрушения грунта и разработки морфологической таблицы для землеройных машин // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 3-2 (22). С. 52–56.

12. Конопацкий Е. В. Моделирование аппроксимирующего 16-точечного отсека поверхности отклика применительно к решению неоднородного уравнения теплопроводности // Геометрия и графика. 2019. Т. 7, № 2. С. 39–46. DOI: 10.12737/article_5d2c1a551a22c5.12136357.

**ДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.
ТРАНСПОРТНЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.78:539.4

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-15-20

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА КОМПОЗИТНОГО БАКА
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ**

**CALCULATIONAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT ON THE SERVICE LIFE
OF A COMPOSITE PRESSURE VESSEL UNDER CREEP CONDITIONS**

А. Е. Буров^{1,2}

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск, Россия

²Институт биофизики СО РАН, Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
СО РАН», г. Красноярск, Россия

A. E. Burov

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

²Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center SB RAS», Krasnoyarsk, Russia

Аннотация. Численный анализ и результаты экспериментальных исследований используются для прогнозирования длительной прочности металлокомпозитного бака высокого давления, используемого для хранения топлива в системах электрореактивных двигателей космических аппаратов. Результаты исследований свидетельствуют, что рассматриваемая конструкция МКБВД имеет высокие ресурсные показатели. Это позволяет обеспечивать требуемые характеристики ресурса бака в течение заданного срока эксплуатации в условиях ползучести материала силовой оболочки. Делается вывод о возможности дальнейшей оптимизации конструкции МКБВД и повышения его весовой эффективности.

Ключевые слова: металлокомпозитный бак, ресурс, ползучесть, численное моделирование, напряженное состояние, экспериментальные исследования.

Abstract. Numerical analysis and experimental results are employed to predict the long-term strength of a metal-composite high pressure vessel (MCHPV) used to store fuel in spacecraft electric propulsion systems. The research results indicate that the considered MCHPV has high resource indicators. This makes it possible to ensure the required characteristics of the vessel resource during a given service life under creep conditions in the material of load-bearing shell. A conclusion is made about the possibility for further optimization of the MCHPV structure and increasing its weight efficiency.

Keywords: composite overwrapped pressure vessel, service life, creep, numerical modelling, stress state, experimental study.

I. ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы на основе полимерной матрицы и углеродных волокон (ПКМ) демонстрируют уникальное сочетание высоких удельных характеристик упругих и прочностных свойств, что определяет их широкое использование для высоконагруженных конструкций аэрокосмической и авиационной техники [1]. Особенно перспективным оказалось применение ПКМ для изготовления сосудов высокого давления топливных систем двигателей космических аппаратов [2, 3], которые должны обладать герметичностью и высокой весовой эффективностью с повышенными показателями прочности и ресурса. Примером таких конструкций служит

металлокомпозитный бак высокого давления (МКБВД), полученный намоткой углеродных жгутов, пропитанных эпоксидным связующим, на металлический лайнер.

Обеспечение требований прочности и надежности конструкций МКБВД может быть достигнуто на основе теоретических и экспериментальных исследований механики деформирования и разрушения. Результаты фундаментальных исследований по данной теме приведены в работах [1, 2]. Анализ структурного поведения и предельных состояний МКБВД с учетом совместного деформирования лайнера и намотанного композита проведен в [1, 3-5]. Несмотря на обширные теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку надежных и эффективных композитных сосудов давления, некоторые вопросы, связанные с их механическим поведением, все еще остаются открытыми. В частности это касается достоверного прогнозирования долговечности на этапе длительной эксплуатации МКБВД [3].

Разрушение при длительном воздействии статической нагрузки является одним из видов предельных состояний МКБВД, которое характеризуется внезапным разрушением силовой композитной оболочки при давлениях гораздо ниже предельного уровня для однократного кратковременного нагружения [6]. Основной причиной этого явления являются эффекты ползучести полимерного связующего, которые обуславливают развитие значительных деформаций в композитной оболочке, ведущих к катастрофическому разрушению всей конструкции даже при относительно низких температурах [7, 8].

Прогнозирование времени инициации и места возникновения данного типа предельного состояния представляет собой сложную задачу, потому что ввиду статистической природы прочности армирующих волокон формирование очага разрушения носит стохастический характер. В настоящее время в решении задач прогнозирования длительной прочности МКБВД отсутствуют общепринятые подходы, что определяет необходимость использования новых численных моделей и критериев, адекватно описывающих процессы деформирования и разрушения баков на разных этапах их жизненного цикла, в том числе в условиях ползучести.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Настоящая работа посвящена численному анализу напряженного состояния МКБВД под действием внутреннего давления и экспериментальному определению характеристик ползучести композиционного материала силовой оболочки с целью оценки длительной прочности бака при сроке активного существования порядка 15 лет. Объектом исследований является топливный бак электрореактивных двигателей космических аппаратов объемом 200 литров. Данный МКБВД изготовлен спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лайнер из титанового сплава 7 слоев композита углеродных волокон /эпоксидных связующих. Механические характеристики монослоя композита: $E_1 = 165$ ГПа, $E_2 = E_3 = 7.7$ ГПа, $G_{12} = G_{13} = 3.8$ ГПа, $G_{23} = 3.4$ ГПа, коэффициенты Пуассона $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.26$, $\nu_{23} = 0.49$. Условный предел текучести материала лайнера $\sigma_{0.2} = 340$ МПа, модуль упругости $E = 110$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu = 0.32$.

III. ТЕОРИЯ

Учитывая, что разрушение МКБВД определяется длительной прочностью силовой композитной оболочки, для оценки ресурса использовался подход, предложенный в работах [9, 10], который основан на предположении о предельном значении запасенной энергии для вязкоупругого материала, являющейся константой. Время до разрушения при длительном статическом нагружении определяется как функция от действующей нагрузки σ , предельной нагрузки при кратковременном статическом нагружении σ_f и вязкоупругих свойств материала. Для определения значения σ_f в настоящих исследованиях использовалось фактическое значение разрушающих напряжений, определенных по давлению разрушения, а не данные испытаний лабораторных образцов материала силовой оболочки. Преимуществом подхода является тот факт, что значения параметров уравнения не зависят от уровня нагрузки и могут быть определены по результатам относительно непродолжительных испытаний [11].

Композит моделируется как линейный вязкоупругий материал, для которого справедливо следующая зависимость:

$$\varepsilon(t) = D_0 \sigma(t) + D_1 \int_0^t \left(\frac{t-\tau}{\tau_0} \right)^n \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (1)$$

где D_0 , D_1 , n ($0 < n < 1$) – константы материала, τ_0 – характеристическое время.

При постоянной нагрузке $\sigma(t) = \sigma_0$ решением уравнения (1) является следующее выражение:

$$\varepsilon(t) = \left[D_0 + D_1 \left(\frac{t-\tau}{\tau_0} \right)^n \right] \sigma_0 \quad (2)$$

Запасенная энергия определяется как:

$$W(t) = \int_0^t \sigma(\tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau$$

В зависимости от критерия, определяющего тип предельного состояния, возможно несколько вариантов расчета времени до разрушения (ресурса).

Критерий максимальных деформаций:

$$\frac{t_f}{\tau_0} = \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{S} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (3)$$

где $S = \sigma_0/\sigma_f$, σ_f – напряжения разрушения, t_f – время до разрушения.

Критерий работы максимальных напряжений:

$$\frac{t_f}{\tau_0} = \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^{1/n} \left(\frac{1}{S^2} - 1 \right)^{1/n} \quad (4)$$

Критерий Райнера-Вайсенберга-Гуэдеса:

$$\frac{t_f}{\tau_0} = \left(\frac{1}{2-2^n} \right)^{1/n} \left(\frac{D_0}{D_1} \right)^{1/n} \left(\frac{1}{S^2} - 1 \right)^{1/n} \quad (5)$$

Анализ выражений (3-5) показывает, что критерий (3) дает наиболее консервативную оценку времени до разрушения, поэтому для расчета ресурса использовалась данная зависимость.

Расчет напряженного состояния, возникающего в МКБВД под действием внутреннего давления, выполнялся численно на конечно-элементной модели, разработанной с использованием пакета инженерного анализа ANSYS Mechanical APDL [12]. Трехмерная модель на базе 20-ти узлового конечного элемента представляет собой повторяющийся сегмент МКБВД, включающий герметизирующий лайнер и силовую композитную оболочку, взаимодействие которых осуществляется как контакт деформируемых тел по примыкающим поверхностям с учетом сил трения (рис. 1).

Результаты расчета напряженного состояния силовой оболочки для области экватора бака, где действуют максимальные напряжения, представлены на рис. 2. Указанные значения получены осреднением по толщине композитной оболочки.

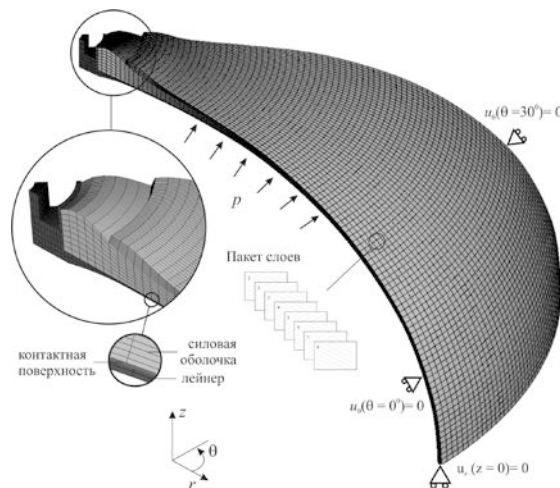


Рис. 1. Конечная-элементная модель и расчётная схема анализа напряженного состояния МКБВД

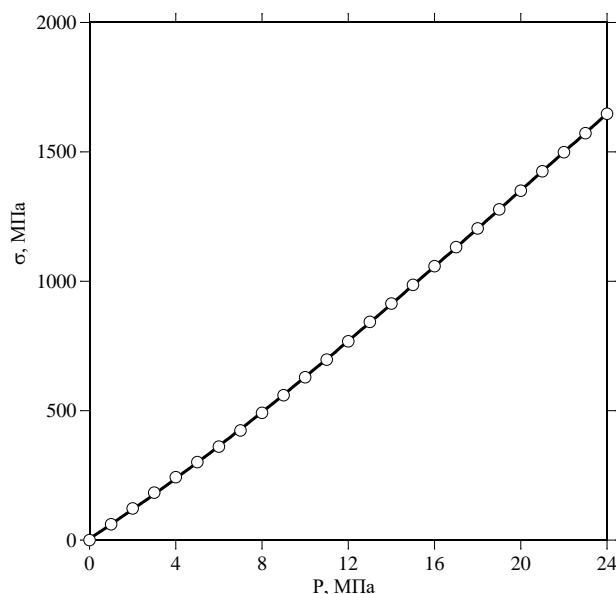


Рис. 2. Зависимость максимальных напряжений в композитной оболочке от внутреннего давления

IV. ОБСУЖДЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для определения констант уравнения (2) D_0 , D_1 , n использовались результаты, полученные при испытании МКБВД под действием длительной статической нагрузки при комнатной температуре [13]. Учитывая, что испытания проводились при различных значениях давления P , аппроксимация экспериментальных значений выполнялась для двух случаев: 1 – $P = 7.85$ МПа, $\sigma_0 = 485$ МПа (напряжения в композите вдоль направления армирования), время испытаний порядка 9300 часов; 2 – $\sigma_0 = 11.7$ МПа, $\sigma_0 = 745$ МПа, время испытаний порядка 16900 часов. На рис. 3 представлены экспериментальные данные и аппроксимирующие кривые (2), параметры которых приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1
ПАРАМЕТРЫ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ МКБВД

Давление, МПа	$D_0 \cdot 10^{-6}$, 1/МПа	$D_1 \cdot 10^{-11}$, 1/МПа	n
7.85	6.31	5.48	0.831
11.7	6.11	8.60	0.787
Средние значения	6.21	7.04	0.809

Приведенные в табл.1 значения свидетельствуют о низкой скорости ползучести и высокой устойчивости материала силовой оболочки к длительному нагружению при температуре испытаний.

При пневматических испытаниях на прочность до разрушения при кратковременном нагружении двух однотипных МКБВД предельные значения давления составили порядка 24 МПа [13], что соответствует $\sigma_f = 1647$ МПа. Подставляя значения параметров материала в (3), получаем значение ресурса $1.27 \cdot 10^6$ ч при рабочем давлении 9.3 МПа, $\sigma_0 = 583$ МПа. В расчетах использовались наиболее консервативные значения параметров, приведенных в таблице 1, т. е. при которых прогнозируются меньший ресурс. С учетом заданного ресурса (порядка $1.31 \cdot 10^5$ часов) фактический запас работоспособности по ресурсу рассматриваемого МКБВД составляет 9.6. Расчетная кривая длительной прочности для относительного уровня давления P/P_f , принимая $P_f = 24$ МПа, приведена на рис. 4.

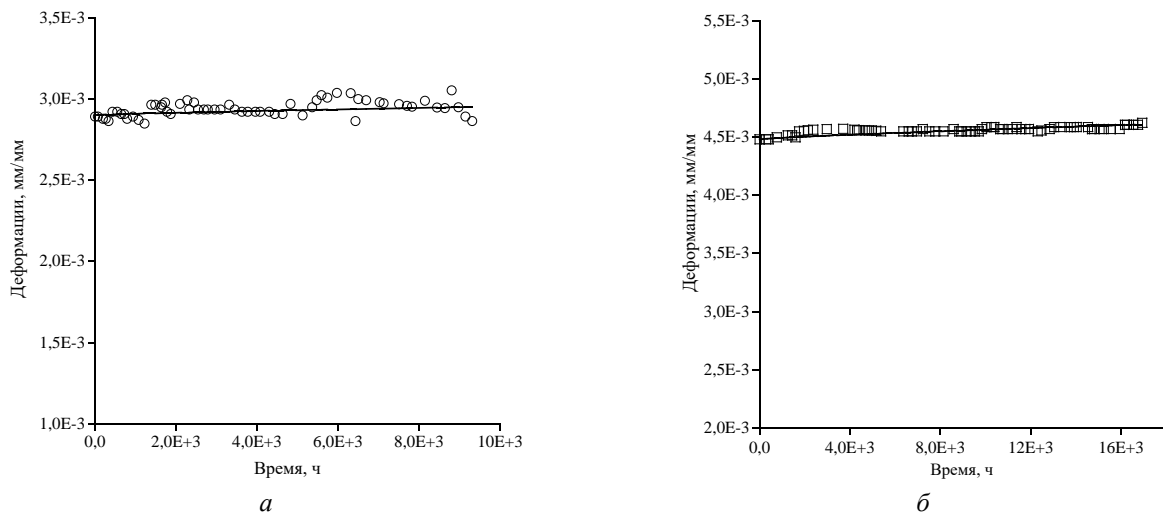


Рис. 3. Зависимость максимальных деформаций в композитной оболочке от времени при давлении 7.85 МПа (а) и 11.7 МПа (б)

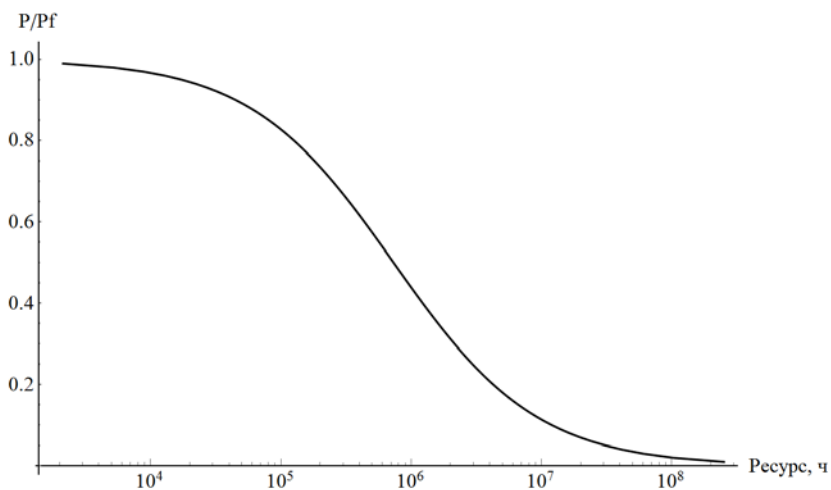


Рис. 4. Расчетная зависимость длительной прочности МКБВД от уровня внутреннего давления

Следует отметить, что достаточный высокий запас по ресурсу обусловлен не только характеристиками композита при ползучести, но и невысоким отношением рабочего давления к давлению разрушения при кратковременном нагружении, которое не превышает 0.36. Если принять значение рабочего давления 13.3 МПа, которое соответствует коэффициенту запаса 1.8 по прочности, расчетное значение ресурса будет составлять порядка $4.7 \cdot 10^5$ ч при коэффициенте запаса по ресурсу 3.6.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетного и экспериментального анализа показывают, что рассматриваемая конструкция МКБВД имеет высокие прочностные и ресурсные показатели. Это позволяет обеспечивать требуемые характеристики ресурса бака в течение заданного срока эксплуатации в условиях ползучести материала силовой оболочки. С другой стороны, завышенные запасы кратковременной и длительной прочности говорят о возможности дальнейшей оптимизации конструкции МКБВД и повышения его весовой эффективности. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и анализе конструкций сосудов высокого давления различного назначения из композиционных полимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasiliev V. V. *Composite Pressure Vessels: Analysis, Design, and Manufacturing*. Blacksburg VA : Ridge Publishing, 2009. 690 p. ISBN 0978722329.
2. Vasiliev V. V., Krikanov A. A., Razin A. F. New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications // *Composite Structures*. 2003. Vol. 62, no. 3-4. P. 449–459. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2003.09.019>.
3. Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов / В. В. Москвичев, Н. А. Тестоедов, В. В. Васильев, В. И. Халиманович, А. М. Лепихин, Е. В. Анискович, А. Е. Буров, Е. Н. Головёнкин, С. В. Доронин, Н. В. Еремин, В. А. Левко, Е. В. Москвичев, Ю. П. Похабов, А. Ф. Разин, Ф. К. Синьковский, Ю. Ф. Филиппова, А. П. Черняев, Н. А. Чернякова. Новосибирск : Наука, 2021. 440 с. DOI 10.7868/978-5-02-0041474-7.
4. Rahul B., Dharmahinder S. C., Dharani J. A comprehensive review on the performance analysis of composite overwrapped pressure vessels // *Engineering and Applied Science Research*. 2021. Vol. 49. no. 2. P. 272–287.
5. Расчетно-экспериментальная оценка прочности металлокомпозитного бака высокого давления / Е. В. Амелина, А. Е. Буров, С. К. Голушко, А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, А. В. Юрченко // *Вычислительные технологии*. 2016. Т. 21, № 5. С. 3–21.
6. Engelbrecht-Wiggans A., Phoenix S. L. A stochastic model based on fiber breakage and matrix creep for the stress-rupture failure of unidirectional continuous fiber composites // *International Journal of Fracture*. 2019. Vol. 217. P. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s10704-019-00359-9>.
7. Li J., Liu Z., Liu Y. [et al.] Tensile and long-term creep properties of structurally and functionally integrated carbon fiber reinforced plastic at room temperature // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023. Vol. 296. P. 105017. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105017>.
8. Engelbrecht-Wiggans A., Phoenix S. L. Comparison of probabilistic models for stress rupture failure in continuous unidirectional fiber composite structures // *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 7431–7452. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2101-2>.
9. Guedes R. M. Mathematical analysis of energies for viscoelastic materials and energy based failure criteria for creep loading // *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2004. Vol. 8. P. 169–192.
10. Spathis G., Kontou E. Creep failure time prediction of polymers and polymer composites // *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72, no. 9. P. 959–964. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.03.018>.
11. Corum J. M., Battiste R. L., Deng S. [et al.]. Durability-based design criteria for a quasi-isotropic carbon-fiber automotive composite // *Oak ridge national laboratory report*. ORNL/TM-2002/39. 2002. 242 p.
12. ANSYS Academic Research, Release 17.0, Help System (ANSYS Inc., 2016).
13. Экспериментальные исследования прочности и ресурса металлокомпозитных баков высокого давления / А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, А. В. Буров, Е. В. Анискович, А. П. Черняев, В. И. Халиманович // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2019. Т. 85, № 1. С. 49–56. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-1-I-49-56>.

УДК 629.78

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-21-29

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ/ВЧ-ПОТЕРЬ
В ТОРОИДАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО
ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ЕГО СПЕКТРУ ЧАСТОТ**

**DETERMINATION OF THE POWER OF THE MICROWAVE/HF LOSSES
IN THE TOROIDAL RESONATOR OF THE ACCELERATOR ION THRUSTER
BY ITS FREQUENCY SPECTRUM**

И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков, А. И. Лукьянчик, П. В. Степень
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, K. I. Zharikov, A. I. Lukyanchik, P. V. Stepen
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В работе представлен экспериментальный метод определения мощности СВЧ/ВЧ-потерь в полости тороидального резонатора прототипа ускорительного ионного двигателя. Метод основан на анализе основных частот, присутствующих в резонаторе при его возбуждении твёрдотельным автогенератором. Достоинством метода является его инвариантность оптическому излучению высокочастотного разряда и тепловым эффектам в плазме. Метод частотного анализа показал, что основная частота автогенератора в полости тороидального резонатора создаёт переменное ускоряющее напряжение величиной 276.7 В. При этом, мощность основной частоты при возникновении разряда увеличивается в 145 раз при увеличении энергопотребления прототипа в 1.8 раз. Частота, близкая к резонансной частоте резонатора создаёт ускоряющее напряжение 50 В.

Ключевые слова: резонаторный ионный двигатель, основная частота, мощность, автогенератор, спектр частот, тороидальный резонатор, добротность

Abstract. The paper presents an experimental method for determining the power of microwave/HF losses in the cavity of a toroidal resonator of a prototype accelerator ion thruster. The method is based on the analysis of the fundamental frequencies present in the resonator when it is excited by a solid-state oscillator. The advantage of the method is its invariance to the optical radiation of a high-frequency discharge and thermal effects in plasma. The method of frequency analysis showed that the main frequency of the autogenerator in the cavity of the toroidal resonator creates an alternating accelerating voltage of 276.7 V. At the same time, the power of the main frequency when a discharge occurs increases by 145 times with an increase in the energy consumption of the prototype by 1.8 times. A frequency close to the resonant frequency of the resonator creates an accelerating voltage of 50 V.

Keywords: resonator ion thruster, main frequency, power, auto generator, frequency spectrum, toroidal resonator, Q-factor.

I. ВВЕДЕНИЕ

Перед тем как непосредственно перейти к теме самой статьи, следует представить некоторые общие понятия и определения. Результаты работы авторов публикации применимы в сфере двигателестроения беспилотных космических аппаратов. В частности речь идёт о квазинейтральных ионных двигателях с резонаторным

ускорением ионизированного газа. По зарядовому распределению выхлопного шлейфа ионные микродвигатели можно разделить на две группы: ионные двигатели в классическом понимании (в струе тяжёлые положительно заряженные частицы) и квазинейтральные двигатели (в струе и положительные ионы, и отрицательные электроны). Если первая группа достаточно хорошо изучена и имеет длительную историю конструктивного совершенствования, лабораторного изучения и лётных испытаний, то вторая группа представлена единичными образцами с робкими попытками объяснить суть происходящих в таких двигателях явлений. Квазинейтральные ионные двигатели – это свежее направление двигателестроения. По сравнению с электростатическими классическими ионными двигателями они имеют ряд преимуществ: нет необходимости установки нейтрализатора, отсутствие многоэлектродной ионно-оптической системы (ИОС) устраняет проблему эрозии материала электродов быстрыми ионами. На развитие двигательных систем малых космических аппаратов в последнее время значительное влияние оказывает тенденция к миниатюризации (как геометрии, так и энергопотребления) и упрощению конструкции. Это вызвано развитием области микро- и наноспутников, которые, в свою очередь, появились благодаря расцвету микроэлектроники. Требование миниатюризации в части энергопотребления существенно влияет на эффективность ионного двигателя. В настоящее время полная электрическая мощность, которую можно выделить с бортовой системы питания наноспутника на нужды двигательной установки не превышает 8-10 Вт. Чем ниже мощность, передаваемая газу для его ионизации, тем ниже процент ионизации. Для поддержания условий ионизации необходимо обеспечивать определённый уровень давления газа в реакторе двигателя. Соответственно, при уменьшении мощности разряда и сохранения уровня требуемого для ионизации массового расхода нейтрального газа могут сложиться условия, когда основная доля реактивной тяги будет обусловлена газодинамическим истечением газа из полости двигателя. В таком случае речь уже идёт не о ионном, а о газовом двигателе. Попытки масштабировать в меньшую сторону электростатические ионные двигатели широко представлены в открытых источниках. Например, самый экономный двигатель с ИОС представлен в работе [1]. Авторы работы утверждают, что при энергопотреблении 8 Вт двигатель будет обеспечивать удельный импульс до 10700 с (тяга до 0.2 мН) на аргоне при эффективности 66%. При этом конструкция не реализована, а представлена в виде симуляции. Реализованные конструкции [2, 3] дают более скромные результаты. На ксеноне двигатель $\mu 1$ показал удельный импульс 1100 с (тяга 0.297 мН) при мощности 15 Вт. Из электростатических ионных двигателей, не выходящих по энергопотреблению за пределы 20 Вт, можно выделить MiDGIT [4] и MRIT [5]. Обе конструкции реализованы, имеют энергопотребление 13-18 Вт, источником плазмы является высокочастотный индукционный разряд. Для ксенонового двигателя MiDGIT реактивная тяга составила 0.25-0.48 мН, а для аргонового MRIT – 1.49-59 мкН при удельном импульсе 5480 с. Минимальная потребляемая мощность большинства существующих электростатических ионных двигателей [6-10] превышает 30 Вт.

Квазинейтральные двигатели, как было уже сказано, представлены очень узким рядом. По принципу ускорения заряженных частиц их можно разделить на двигатели с магнитным соплом (диффузия заряженных частиц из градиентного магнитного поля) [11, 12] и резонаторные двигатели (ускорение переменным электрическим полем возбуждённого объёмного резонатора). Двигатель с магнитным соплом на ксеноне показал следующие результаты: энергопотребление 26-50 Вт, удельный импульс 400-1000 с (тяга 0.56-0.68 мН) при эффективности 5.5-7.7 %. Высокая степень ионизации достигается посредством электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Развитием резонаторного типа ионных двигателей занимаются авторы данной публикации. Например, исследование работы прототипа такого двигателя времяпролётным методом представлено в работе [13]. Особенностью квазинейтральных ионных двигателей является сложность физических процессов ускорения компонентов плазмы. Это характерно и для магнитных сопел и для резонаторного ускорения. Энергия заряженной частицы между электродами электростатической ИОС описывается простыми уравнениями, ток пучка согласуется с законом $3/2$. В случае резонаторного двигателя определение ускоряющего напряжения является более трудной задачей.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной статье представлено решение частной задачи по определению уровня ускоряющего напряжения в резонаторном ионном двигателе. Концепция резонаторного СВЧ/ВЧ-ионного двигателя представлена авторами в ряде прошлых публикаций. Описать концепцию можно как ускорение СВЧ/ВЧ-плазмы, сформиро-

ванной в ёмкостном разряде переменным электрическим полем тороидального резонатора. Источником энергии для ионизации и ускорения является твёрдотельный автогенератор. Часть микроволновой энергии автогенератора идёт на генерацию плазмы, остальная часть рассеивается в стенках резонатора. Следствием возбуждения тороидального резонатора является пространственное разделение магнитного и электрического полей. При высокой добротности резонатора напряжённость ускоряющего электрического поля возрастает. Для определения величины ускоряющего напряжения необходимо определить мощность СВЧ/ВЧ-потерь в стенках резонатора. Определение этой величины является самой проблематичной задачей и не обходится без экспериментальных исследований. Простым и самым распространённым методом определения мощности электромагнитного излучения, рассеиваемого в резонаторе, является калориметрический метод [14]. Однако данный метод не применим для оценки мощности в резонаторе, т.к. даёт интегрированное значение мощностей оптического излучения (при существовании разряда), микроволнового излучения основных частот и «белого» шума. Соответственно, калориметрический метод даёт завышенное значение энергии в резонаторе. Косвенно о величине ускоряющего напряжения можно судить по скорости движения ионов (времяпролётный метод) или глубине проникновения ионов в газовую мишень (по величине пробега иона в веществе).

В данной статье авторы предлагают метод определения энергии в резонаторе по спектру частот, присутствующих в нём. Преимущества метода в нечувствительности к оптическому диапазону частот (возможен анализ в режимах работы двигателя без разряда (режим БР) и с разрядом (режим Р)), исключении из расчёта мощности рассеяния «белого» шума. Впервые метод был представлен в работе авторов [15], где исследовалась мощность ВЧ-потерь в тороидальном резонаторе при работе в режиме БР. Там же проведено сравнение полученных результатов с результатами калориметрического исследования того же прототипа.

Таким образом, целью данной работы является получение мощности СВЧ/ВЧ-потерь в тороидальном резонаторе прототипа ускорительного (резонаторного) ионного микродвигателя при режимах работы БР и Р. Как следствие, будет получена величина ускоряющего переменного напряжения.

Задачи исследования:

- проведение экспериментальных исследований по получению спектра частот при работе прототипа ускорительного (резонаторного) микродвигателя (УМД) на режимах БР (при атмосферном давлении) и Р (в вакуумной камере);
- анализ экспериментальных данных на основе теории передачи сигналов от передатчика к антенне и теории квазистационарных резонаторов с целью получения мощности электромагнитного излучения и величины ускоряющего напряжения.

III. ТЕОРИЯ

Концептуальная схема УМД представлена на рис. 1. ВЧ-автогенератор (поз. 1) расположен за пределами резонатора, состоящего из цилиндрических поверхностей (поз. 2 и 6) и плоских поверхностей (поз. 3, 4, 8 и 9). Резонатор выполнен из меди. Передняя торцевая крышка (поз. 4) выполнена перфорированной. Это необходимо для выхода ускоренных заряженных частиц из полости резонатора. ВЧ-энергия передаётся от автогенератора на электроды (поз. 5) по двухпроводной линии связи (поз. 10).

Напряжение в ускоряющем зазоре s тороидального резонатора можно определить из выражения:

$$P = \frac{U_m^2}{2 \cdot \rho_z \cdot Q}, \quad (1)$$

где U_m – амплитуда напряжения на зазоре, а $\rho_z = 1/\omega \cdot C_0$ – характеристическое сопротивление резонатора на циклической частоте ω ; Q – добротность резонатора; C_0 – ёмкость, на которую нагружен резонатор

Отсюда

$$U_m = \sqrt{2 \cdot \rho_z \cdot Q \cdot P}. \quad (2)$$

Для определения характеристического сопротивления резонатора на основной частоте автогенератора или резонансной частоте резонатора необходимо определить электрическую ёмкость резонатора. Ёмкость, на которую нагружен резонатор, определяется как ёмкость плоского конденсатора, образованного круглыми крышками на внутреннем и внешнем цилиндрах и ёмкостью, образованную цилиндрическими поверхностями резонаторов:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot s} + 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{h}{\ln \frac{D}{d}} \quad (3)$$

Здесь s – величина зазора между торцевой поверхностью внутреннего сердечника и медным диском крышки; D – диаметр внешней цилиндрической поверхности резонатора; d – диаметр внутреннего медного сердечника, ε_0 и ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, и относительная диэлектрическая проницаемость среды в резонаторе, соответственно; $h=H-s$ – длина внутреннего сердечника; H – длина резонатора. Указанные параметры представлены на рис. 1.

Первая часть формулы (3) есть ёмкость плоского конденсатора, образованного торцевыми крышками резонатора (между стенками под поз. 8 и 9), вторая часть – ёмкость цилиндрического конденсатора, образованного боковыми поверхностями резонатора (между стенками под поз. 2 и 6).

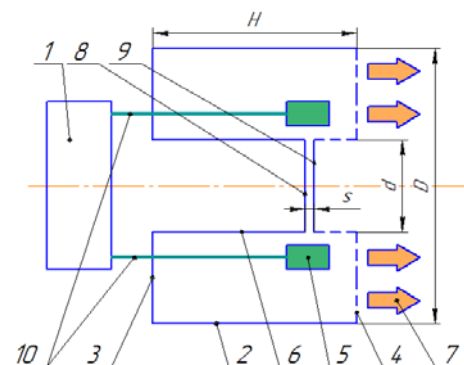


Рис. 1. Схема резонаторного ионного двигателя:

- 1 – СВЧ/ВЧ-автогенератор; 2 – внешняя боковая поверхность тороидального резонатора;
- 3 – задняя торцевая крышка; 4 – передняя перфорированная торцевая крышка;
- 5 – электроды генерации плазмы; 6 – боковая стенка внутреннего сердечника;
- 7 – направление истечения ионов/электронов; 8, 9 – торцевые стенки, образующие ускоряющий зазор; 10 – линии связи автогенератора с резонатором

Добротность тороидального резонатора, на основе расчёта коаксиального резонатора, равна [16]:

$$Q = \frac{875 \cdot \sqrt{\lambda \cdot 10^2} \cdot \left[\beta \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \beta \cdot H) \right]}{\frac{\pi}{15} + \frac{\lambda \cdot (2 \cdot \beta \cdot H + \sin(2 \cdot \beta \cdot H))}{\rho \cdot d \cdot \operatorname{ctg}(\beta \cdot H)} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\rho \cdot \operatorname{ctg}(\beta \cdot H)}{60}} \right)}, \quad (4)$$

где $\beta = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\lambda=c/f_{\text{мор}}$ – длина волны основной/ резонансной частоты в резонаторе.

Обычно истинная резонансная частота отличается от расчётной вследствие несовершенства геометрии резонатора (в первую очередь, погрешность геометрии торцевых поверхностей) и наличия в полости резонатора неоднородной среды (полимерные элементы конструкции, электроды, проводники). Поэтому целесообразно заранее получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) резонатора. Для этого применяется анализатор спектра с функцией АЧХ. Зная истинную резонансную частоту резонатора, можно определить величину экви-

валентного зазора s . Эта величина показывает расстояние между торцевыми поверхностями для идеального случая их параллельного расположения.

Расчётная резонансная частота тороидального резонатора при параметре среды в резонаторе $\mu \cdot \epsilon = 1$ равна:

$$f_{рез} = \frac{\sqrt{2 \cdot s}}{\pi \cdot d \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot H \cdot \ln \frac{D}{d}}} \quad (5)$$

Про АЧХ резонатора известно, что истинная резонансная частота резонатора опытного прототипа УМД составляет 347.7 МГц. Величина эквивалентного зазора составила $s=0.54$ мм.

Неизвестную величину мощности в уравнении (2) находим из предположения, что в замкнутой металлической оболочке (которой является тороидальный резонатор) вся подведённая электромагнитная энергия, не ушедшая на создание, поддержание разряда и оптическое излучение, рассеивается в стенках резонатора. Чувствительным элементом для регистрации данной электромагнитной энергии является антенна, регистрирующим элементом – анализатор спектра. Антенна, коаксиальный кабель и анализатор спектра являются принимающей линией. У принимающей линии имеется входное сопротивление. Таким образом, зная показания (мощность сигнала или напряжение) регистрирующего прибора (анализатора спектра) и параметры чувствительного элемента (входное сопротивление принимающей линии), можно получить напряжение сигнала в резонаторе. Зная напряжение сигнала и сопротивление материала стенок резонатора с учетом скин-слоя, можно получить мощность сигнала, рассеиваемую в резонаторе.

По показаниям анализатора спектра и входному сопротивлению принимающей антенны можно получить значение напряжения в резонаторе:

$$|U| = \sqrt{2 \cdot P_{Bm} \cdot |Z|}, \quad (6)$$

где P_{Bm} – уровень мощности сигнала в тороидальном резонаторе в Вт (по показаниям анализатора спектра частот); $|Z| = R_{вол} + R_{каб} + |R + i \cdot X|$ – входное сопротивление принимающей линии; $R_{вол}$ – волновое сопротивление анализатора спектра (50 Ом); $R_{каб}$ – полное сопротивление коаксиального кабеля между антенной и анализатором спектра; R – активное сопротивление антенны; $i \cdot X$ – реактивное сопротивление антенны.

Расчёт полного сопротивления коаксиального кабеля из медных проводников длиной 1 м можно произвести по формуле [17]:

$$R_{каб} = 4.18 \cdot 10^{-5} \cdot l \cdot \sqrt{f_{мор}} \cdot \left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right), \quad (7)$$

где l – длина кабеля, м; $f_{мор}$ – частота ВЧ-сигнала, Гц; r_a – радиус внутреннего проводника, мм; r_b – внутренний радиус внешнего проводника, мм.

Определение активного и реактивного сопротивлений антенны осуществляется методом моментов в программе MMANA-GAL.

Среднюю мощность сигнала, рассеиваемого в стенках тороидального резонатора, можно определить по формуле:

$$P = \frac{|U|^2}{2 \cdot Z_{SL}}, \quad (8)$$

где $Z_{SL} = |R_{SL} + i \cdot X_{SL}|$ – полное сопротивление резонатора с учётом скин-слоя; R_{SL} – активное сопротивление стенок резонатора с учётом скин-слоя; X_{SL} – реактивное сопротивление, которое по величине равно характери-

стическому сопротивлению. Реактивное сопротивление – это сопротивление резонатора (как электрической ёмкости) переменному току.

Активное сопротивление стенок тороидального резонатора обусловлено скин-эффектом и выражается формулой:

$$R_{SL} = R_{const} \cdot \frac{S_{const}}{S_{SL}}, \quad (9)$$

где $R_{const} = \rho \cdot \frac{L}{S_{const}}$ – электрическое сопротивление при постоянном токе эквивалентного полого цилиндра (ци-

линдр, площадь поверхности и объём которого соответствуют аналогичным параметрам тороидального резонатора); ρ – удельное электрическое сопротивление материала резонатора; L – длина эквивалентного цилиндра; S_{const} – площадь поперечного сечения стенки эквивалентного цилиндра при постоянном токе;

$S_{SL} = \frac{\pi}{4} \cdot [(D_e - 2 \cdot t_e + 2 \cdot \delta)^2 - (D_e - 2 \cdot t_e)^2]$ – площадь поперечного сечения эквивалентного цилиндра при пере-

менном токе; D_e – наружный диаметр эквивалентного цилиндра; $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_{mop} \cdot \sigma \cdot \mu_c \cdot \mu_0}}$ – глубина скин-

слоя; σ – электрическая проводимость материала стенок резонатора; μ_c – магнитная проницаемость материала стенок резонатора.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерительная схема представлена на рис. 2. Для регистрации спектра излучения в тороидальном резонаторе применялась спиральная антенна в изоляции и портативный анализатор спектра Arinst SSA-TG R2.

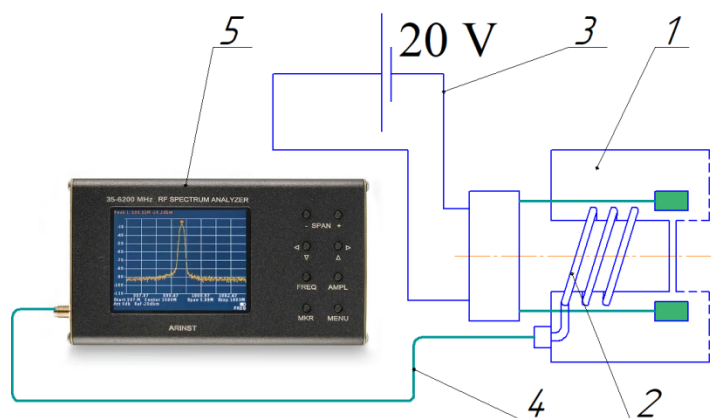


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – прототип УМД; 2 – спиральная антенна; 3 – питание автогенератора;
- 4 – коаксиальный кабель; 5 – анализатор спектра частот Arinst SSA-TG R2

Замеры проводились при атмосферном давлении (режим БР) и в вакууме в остаточной атмосфере воздуха при давлении 10 Па (режим Р). Анализатор спектра частот располагался за пределами вакуумной камеры. Через коаксиальный провод с волновым сопротивлением 50 Ом сигналы снимались с антенны, длиной 20 см и диаметром 0.5 мм, закрученной вокруг внутреннего медного сердечника прототипа. Провод антенны в изоляции. В статье представлены основные частоты спектра, т. к. доля мощности остальных гармоник в 100-1000 раз ниже, чем у основной частоты.

На режиме БР прототип потребляет 5.4 Вт, на режиме Р -10 Вт. На режиме БР присутствует сильная частота 347.5 МГц (1.1 дБм), основная частота автогенератора 173.7 (-14 дБм). На режиме Р при возникновении

плазмы частоты смещаются и меняются местами по мощности: частота 305.1 МГц (-1.5 дБм), частота 152.5 (7.6 дБм).

В Табл. 1 представлены данные по падению/подъёму уровня сильных частот в единицах дБм и Вт.

ТАБЛИЦА 1
ПАДЕНИЕ/ПОДЪЁМ УРОВНЯ СИЛЬНЫХ ЧАСТОТ НА ВОЗДУХЕ НА РЕЖИМАХ БР И Р

Режим БР			Режим Р			Отношение
Частота, МГц	Уровень, дБм	$P_{БР} (P_{Вм}), Вт$	Частота, МГц	Уровень, дБм	$P_{Р} (P_{Вм}), Вт$	$P_{БР}/P_{Р}$
173.7	-14	$3.98 \cdot 10^{-5}$	152.5	7.6	$5.754 \cdot 10^{-3}$	0.0069
347.7	1.1	$1.28 \cdot 10^{-3}$	305.1	-1.5	$7.079 \cdot 10^{-4}$	1.82

С помощью программы MMANA были получены активное (R) и реактивное (iX) сопротивления антенны на частотах 152.5 МГц, 173.7 МГц, 305.1 МГц и 347.7 МГц установленной в резонаторе прототипа УМД. Сопротивления антенны зависят от выбора места питания антенны. Спиральная антенна разбита на 20 прямолинейных сегментов. Т. к. неизвестна точка приложения напряжения на антенну, были рассчитаны возможные точки приложения и взяты средние значения (нагрузка сегмента № 10). Спиральная антенна охватывает внутренний медный сердечник, состоит из двух витков, диаметром 50 мм. Последний виток антенны наиболее близок к зазору между сердечником и магнитным кольцом, но не находится в зазоре, чтобы не влиять на генерацию плазмы. Результаты представлены в Табл. 2. Учёт изоляции на антенне производился через приложение NEC-2 MMANA.

ТАБЛИЦА 2
РАСЧЁТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ АКТИВНОГО И РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АНТЕННЫ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ

Режим	Частота, МГц	$R, Ом$	$iX, Ом$
Р	152.5	0.083	-849.7
	305.1	0.466	-301.791
БР	173.7	0.111	-723.764
	347.7	0.691	-218.362

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате решения уравнений (1-9) с учётом экспериментально и численно полученных данных для каждой сильной частоты режимов Р и БР были получены основные параметры прототипа УМД. Данные представлены в Табл. 3.

ТАБЛИЦА 3
ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЁТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Режим	Частота, МГц	$R_{каб}, Ом$	$R_{SL}, Ом$	$\rho_z, X_{SL}, Ом$	Q	$ U , В$	$P, Вт$	$U_m, В$
БР	173.7	1.24	$6.07 \cdot 10^{-3}$	36.189	7300	0.248	$8.52 \cdot 10^{-4}$	21.221
	347.7	1.754	$8.59 \cdot 10^{-3}$	18.08	4249	0.834	0.019	54.365
Р	152.5	1.16	$5.69 \cdot 10^{-3}$	41.2	7386	3.22	0.126	276.7
	305.1	1.643	$8.05 \cdot 10^{-3}$	20.6	5014	0.707	0.012	50.09

При включении автогенератора в спектре существует две сильные стабильные частоты близкие по мощности. В режиме разряда энергопотребление прототипа увеличивается в 1.8 раза. Энергия более низкой частоты увеличивается в 145 раз, более высокая частота теряет энергию в 1.8 раз. Из-за возникновения дополнительной ёмкости в виде плазмы частоты смещаются в сторону более низких значений. Возникновение разряда снижает уровень «белого» шума в резонаторе. Таким образом, возникает ситуация, при которой на возникновение разряда и нагев плазмы уходит часть энергии спектра (падают уровни «белого» шума и частоты 347.7 МГц), а энергия, идущая на ускорение заряженных частиц (основная частота автогенератора) возрастает.

Видно, что основной вклад в ускорение заряженных частиц даёт не частота, близкая к резонансной частоте тороидального резонатора, а основная частота автогенератора.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод частотного анализа является экспериментальным и требует доработки в части выбора единой формы антенны тороидального резонатора (предпочтительный вид – штыревая короткая антенна большого диаметра, т.к. легко поддается моделированию) и расположения антенны в области максимальной пучности энергии (т.е. стоит вопрос экспериментального определения мест максимальной амплитуды), в части унификации коаксиальных кабелей и минимизации их длины. Данный метод показал хорошее совпадение с времяпролётными исследованиями прототипа УМД. По результатам времяпролётных исследований ионизированного воздуха (остаточный воздух в вакуумной камере), ускоренного прототипом УМД, была получена величина ускоряющего напряжения ≈ 300 В.

К достоинству метода относится возможность определения остаточной ВЧ/СВЧ-мощности в резонаторе в режиме разряда, когда калориметрический метод даёт интегрированную завышенную величину потерь (оптические и тепловые потери в плазме).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-79-10038, <https://rscf.ru/project/19-79-10038/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taunay P. Y. C. R., Bilén S. G., Micci M. M. Numerical simulations of a miniature microwave ion thruster // 33rd International Electric Propulsion Conference / The George Washington University. 2013. P. 1–18. URL: <https://electricrocket.org/IEPC/p4vj38iw.pdf> (date accessed: 12.10.2023).
2. Koizumi H., Kuninaka H. Switching Operation of Ion Beam Extraction and Electron Emission Using the Miniature Ion Thruster $\mu 1$ // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan. 2010. Vol. 8, no. 27. P. 85–90. https://doi.org/10.2322/tastj.8.Pb_85.
3. Koizumi H., Kuninaka H. Performance evaluation of a miniature ion thruster $\mu 1$ with a unipolar and bipolar operation // 32nd International Electric Propulsion Conference. Wiesbaden, Germany. 2011 URL: <https://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2011-297.pdf> (date accessed: 12.10.2023).
4. Collingwood C. M., Gabriel S. B., Corbett M. H. [et al.]. The MiDGIT thruster: Development of a multi-mode thruster // 31st International Electric Propulsion Conference / University of Michigan. 2009. P. 1–13. URL: <https://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2009-171.pdf> (date accessed: 12.10.2023).
5. Trudel T. A., Bilén S. G., Micci M. M. Design and performance testing of a 1-cm miniature radio-frequency ion thruster // 31st International Electric Propulsion Conference / University of Michigan. 2009. P. 20-24. URL: <https://electricrocket.org/IEPC/IEPC-2009-167.pdf> (date accessed: 12.10.2023).
6. Горшков О. А., Муралев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М. : Машиностроение, 2008. 278 с. ISBN 978-5-217-03440-6.
7. Samples S., Li G. Z., Wirz R. E. Performance Testing and Development of the MiXI Thruster with the ARCH Discharge // 2018 Joint Propulsion Conference. 2018. P. 1 – 11. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4648>.

8. Capacci M., Matticari G., Noci G. E. [et al.]. Radiofrequency with Magnetic field ion Thruster (RMT): review of the Engineering Phase accomplished under ASI Contract // IEPС Paper. 2003. P. 1–10. URL: <https://electricrocket.org/IEPC/0289-0303iepc-full.pdf> (date accessed: 12.10.2023).
9. Groh K., Blum O., Rado H. [et al.]. Inert gas radio-frequency thruster RIT 10 // 14th International Electric Propulsion Conference. 1979. P. 1–9. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1979-2100> (date accessed: 12.10.2023). <https://doi.org/10.2514/6.1979-2100>.
10. Takao Y., Miyamoto T., Yamawaki K. [et al.] Development of ECR microwave discharge ion thruster // Vacuum. 2002. Vol. 65, no. 3-4. P. 361–366. [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00443-2](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00443-2).
11. Jarrige J., Elias P.-Q., Packan D. [et al.] Characterization of a coaxial ECR plasma thruster // 44th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference. 2013. P. 1–9. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2013-2628> (date accessed: 12.10.2023). <https://doi.org/10.2514/6.2013-2628>.
12. Vialis T., Jarrige Ju., Aanesland A. [et al.]. Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster // Journal of Propulsion and Power. 2018. Vol. 34, no. 5. P. 1323–1333. <https://doi.org/10.2514/1.B37036>.
13. Determination of the ion beam velocity of an accelerator two-gap ion thruster / V. V. Fedyanin, I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, K. I. Zharikov, A. I. Lukyanchik, P. V. Stepen' // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2022. Vol. 2182, no. 1. P. 012051. DOI 10.1088/1742-6596/2182/1/012051.
14. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия : Теория и практика. М. : Химия, 1989. 175 с. ISBN 5-7245-0359-Х.
15. Исследование тороидального резонатора ускорительного СВЧ-ионного двигателя / И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 7. С. 857–870.
16. Орлов С. И. Расчёт и конструирование коаксиальных резонаторов. М. : Советское радио, 1970. 256 с.
17. Гроднев И. И., Фролов П. А. Коаксиальные кабели связи. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1983. 209 с.

УДК 629.78

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-30-36

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОТОТИПА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ВРЕМЯПРОЛЕТНЫМ МЕТОДОМ

EXPERIMENTAL STUDY OF ION THRUSTER BY TIME-OF-FLIGHT METHOD

И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков, А. И. Лукьянчик, П. В. Степень
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, K. I. Zharikov, A. I. Lukyanchik, P.V. Stepen
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований резонаторного ионного двигателя времяпролетным методом с целью определения ускоряющих элементов конструкции. Исследовано четыре варианта сборки: истечение ионов из магнитной ячейки; истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником; истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора истечение; истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора с сетчатой крышкой. Энергопотребление магнитной ячейки составляло 5.6 Вт, а скорость пучка ионов при 11 Па составила не более 7 м/с. В сборке по второму варианту энергопотребление составило 6.6 Вт при давлении 11 Па и скорости не более 30 м/с. Энергопотребление по третьему и четвертому вариантам сборки составляло 6 Вт, а скорость пучка ионов при 11 Па составила не более 48 м/с.

Ключевые слова: резонаторный ионный двигатель, времяпролетный метод, СВЧ/ВЧ, магнитная ячейка, плазма.

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the resonator ion thruster by the time-of-flight method in order to determine the accelerating structural elements. Four assembly variants were investigated: the outflow of ions from a magnetic cell; the outflow of ions from a magnetic cell with an installed core; the outflow of ions from a magnetic cell with an installed core and the side wall of the resonator; the outflow of ions from a magnetic cell with an installed core and the side wall of the resonator with a mesh cover. The energy consumption of the magnetic cell was 5.6 W, and the ion beam velocity at 11 Pa was no more than 7 m/s. In the assembly according to the second variant, the power consumption was 6.6 W at a pressure of 11 Pa and a speed of no more than 30 m/s. The power consumption for the third and fourth assembly variants was 6 watts, and the ion beam velocity at 11 Pa was no more than 48 m/s.

Keywords: resonator ion thruster, time-of-flight method, microwave/HF, magnetic cell, plasma.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионные двигатели обладают широкими перспективами применения в аэрокосмической отрасли и являются одним из высокотехнологичных направлений, развиваемых во многих странах. Кроме того, тенденция на уменьшение массы космических аппаратов ведет к уменьшению габаритно-массовых характеристик и энергопотребления ионных двигателей с обеспечением максимально возможных выходных характеристик, таких как тяга и удельный импульс [1, 2].

По способу создания рабочего тела-плазмы существуют ионные двигатели с разрядом постоянного тока, высокочастотного разряда (ВЧ) и сверхвысокочастотного разряда (СВЧ) [3-7]. В основном ускорение плазмы в ионных двигателях осуществляется ионно-оптической системой [8], т. е. электростатическим полем между перфорированными электродами. Перспективным типом двигателя являются безэлектродные двигатели. Преимуществом безэлектродных двигателей является квазинейтральность выбрасываемой плазмы: нет необходимости в нейтрализующем катоде, который является одним из самых хрупких компонентов в ионных двигателях [9].

В безэлектродных двигателях ускорение заряженных частиц осуществляется магнитным соплом или переменным электрическим полем [9-12].

В ОмГТУ проводятся работы по созданию квазинейтрального резонаторного ионного двигателя с ВЧ/СВЧ генерацией плазмы, в котором электрическое поле сконцентрировано между плоскими поверхностями резонатора, а магнитное поле вытесняется в кольцевую полость тороидального резонатора [12].

В мировой практике экспериментального определения скорости и энергии заряженных частиц находит применение времяпролетный метод, в англоязычной литературе данный метод известен как TOF (Time-of-flight) [13-15].

В рамках времяпролетного метода осуществлялось измерение величины скорости ионизированного газа, истекающего из рабочей полости прототипа ионного двигателя [16].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальные исследования скорости потока заряженных частиц, истекающих из полости тороидального резонатора под действием переменного электрического поля при различных вариантах сборки:

- истечение ионов из магнитной ячейки;
- истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником;
- истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора;
- истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора с сетчатой крышкой.

Методом экспериментальных исследований выбран времяпролетный метод.

III. ТЕОРИЯ

Объектом исследования является резонаторный ионный двигатель с ВЧ/СВЧ генерацией плазмы (рис.1.). Принцип работы двигателя основан на резонаторном ускорении СВЧ/ВЧ плазмы. Плазма генерируется между электродами магнитной ячейки. СВЧ/ВЧ мощность, излучаемая автогенератором, рассеивается в ёмкости тороидального резонатора, образованного наружной боковой поверхностью, основанием и внутренней стенкой. При рассеивании энергии в резонаторе, обладающего добротностью, возникает переменное ускоряющее напряжение. Данное напряжение ускоряет плазму и, как следствие, создает реактивную тягу. Для дополнительного ускорения плазмы в двигателе на торце сердечника имеется концентратор напряжения.

На рис. 1 представлена 3D модель кольцевой магнитной ячейки. Ячейка состоит из двух корпусных элементов, изготовленных из PLA-пластика методом аддитивных технологий, и двенадцатью дисковыми магнитами диаметром 12 мм и толщиной 5 мм. Магниты расположены по схеме N-S по кольцу. Каждые 4 магнита связаны гальванической связью между собой и составляют электрод ёмкостного зазора. На рис. 1. А, В и С – это электроды. Для защиты платы автогенератора от вероятного пробоя (при экспериментах с постоянной разностью потенциалов) электроды покрыты слоем литьевого воска. Способ крепления корпусов – клеевой. Метод обеспечения гальванической связи между магнитами – пайка.

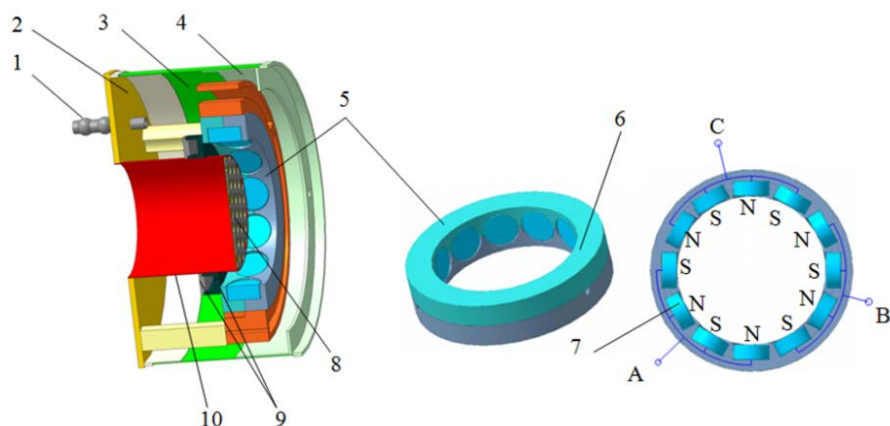


Рис. 1. 3D модель резонаторного ионного двигателя:

- 1 – штуцер ввода рабочего тела; 2 – основание; 3 – наружная стенка резонатора;
 4 – подвижная крышка; 5 – магнитная ячейка; 6 – корпус кольцевой магнитной ячейки;
 7 – магнит; 8 – концентратор напряжений; 9 – газораспределитель;
 10 – внутренняя стенка резонатора (сердечник)

Для проведения экспериментальных исследований по определению скорости ионизированного пучка ионов использовался времяпролетный метод (рис. 2). При подаче напряжения на ионный двигатель происходит генерация плазменного разряда между электродами магнитной ячейки. За счет переменного напряжения, возникающего в полости резонатора, плазма выбрасывается из ионного двигателя и пролетает между чувствительными элементами датчиков ионов, которые регистрируют показания только положительно заряженных ионов. Чувствительные элементы выполнены в виде сеток. Ускоренные положительные ионы поступают на датчики в разное время и регистрируются каналами x и y осциллографа.

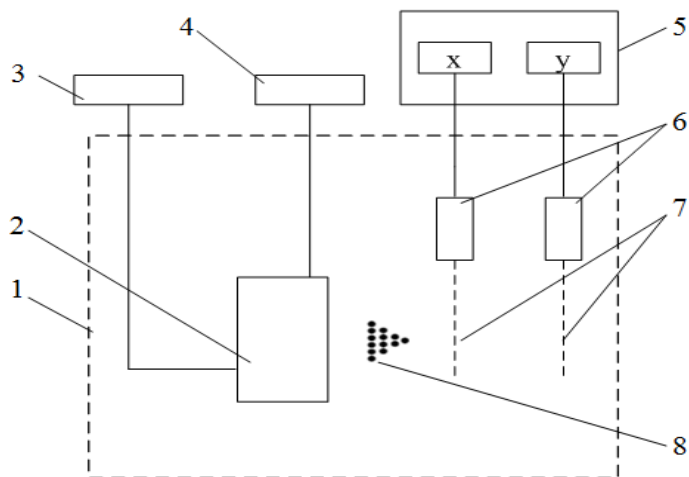


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения времени полета ионизированного пучка ионов:

- 1 – вакуумная камера; 2 – ионный двигатель; 3 – газовое оборудование;
 4 – лабораторный источник питания; 5 – осциллограф;
 6 – детектор ионов; 7 – чувствительные элементы; 8 – ионизированный пучок ионов

На рис. 3. представлена осциллограмма замеров времени пролета, полученная в ходе предварительных отработочных экспериментов.



Рис. 3. Пример осциллограммы, полученной при измерении скорости потока ионов

Из осциллограммы, представленной на рис. 3 видно, что срабатывание датчиков происходит в разное время. Желтый луч осциллографа регистрирует момент срабатывания датчика №2, синий – момент срабатывания датчика №1. Время пролета положительно заряженных ионов определяется как разность замеренных сигналов датчиками и определяется по выражению:

$$\Delta t = t_{д2} - t_{д1},$$

где $t_{д1}$, $t_{д2}$ – момент срабатывания датчиков.

Датчики ионов конструктивно объединены в времяпролетный канал (рис. 4). Расстояние L между чувствительными элементами при проведении экспериментальными исследованиями составляло 10 см. Чувствительные элементы установлены по торцам времяпролетного канала.

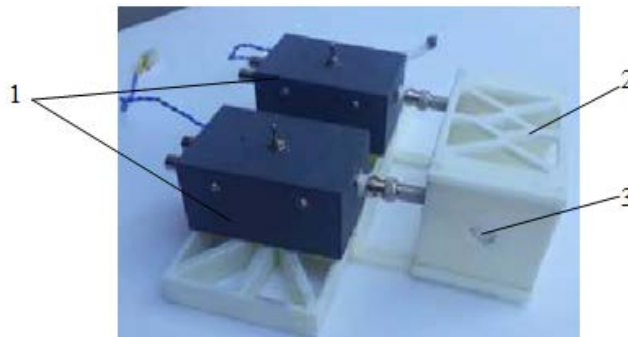


Рис. 4. Датчики ионов с времяпролётным каналом
1 – датчики ионов; 2 – времяпролетный канал; 3 – чувствительный элемент

Расчет скорости ионного пучка определялся по выражению:

$$V = \frac{L}{\Delta t}.$$

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты экспериментальных исследований резонаторного ионного двигателя времяпролетным методом при различных давлениях в вакуумной камере приведены в таблице 1 и на рис. 5. Представлено четыре варианта сборки.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РЕЗОНАТОРНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

р, Па	Δt , с	V, м/с
Вариант сборки № 1 (СВЧ 20 В, 0,28 А)		
12	0.0207	4.83
12	0.0178	5.61
11	0.0149	6.71
11	0.0167	5.98
11	0.0140	7.14
9.9	0.00925	10.81
9.5	0.0120	8.33
9.2	0.0117	8.54
9.2	0.0120	8.33
Вариант сборки № 2 (СВЧ 20 В, 0,33 А)		
11	0.00334	29.94
11	0.00234	42.73
10	0.00332	30.12
10	0.00228	43.85
9.6	0.00298	33.55
9.5	0.00208	48.07
9.2	0.00188	53.19
9	0.00148	67.56
9	0.00172	58.14
8.9	0.00146	68.49
8.8	0.00192	52.08
8.3	0.00150	66.66
8	0.00125	80
7.7	0.00112	89.28
7.5	0.00099	101.01
7.3	0.00091	109.89
7.1	0.000894	111.85
7	0.000814	122.85
Вариант сборки № 3 (СВЧ 20 В, 0,3 А)		
11	0.00238	42.01
10	0.00184	54.34
10	0.00230	43.47
10	0.00270	37.03
9.7	0.00290	34.48
9.7	0.00200	50
9.6	0.00188	53.19
9.6	0.00218	45.87
Вариант сборки № 4 (СВЧ 20 В, 0,3 А)		
11	0.00208	48.07
11	0.00268	37.31
11	0.00248	40.32
10	0.00288	34.72
10	0.00188	53.19
10	0.00208	48.07
10	0.00196	51.02
10	0.00206	48.54

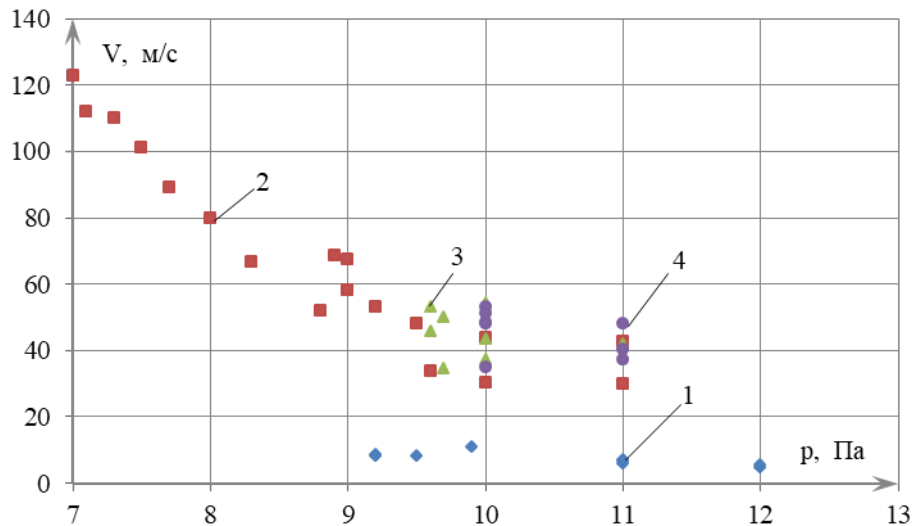


Рис. 5. Зависимость скорости ионизированного пучка ионов от остаточного давления: 1 – истечение ионов из магнитной ячейки; 2 – истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником; 3 – истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора истечение; 4 – истечение ионов из магнитной ячейки с установленным сердечником и боковой стенки резонатора с сетчатой крышкой

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в табл. 1 и на рис. 5. данные показывают степень влияния элементов конструкции прототипа на скорость ионов. Видно, что магнитная ячейка сама является источником ускоренных ионов. Однако введение медного сердечника увеличивает скорость в 5-6 раз. При этом потребляемая мощность увеличивается на 1 Вт. Наружная цилиндрическая поверхность резонатора и сетчатая торцевая крышка влияют на скорость незначительно. При этом потребляемая мощность падает на 0.6 Вт по сравнению с предыдущим случаем.

Малые значения скорости ионизированного пучка по сравнению с существующими образцами ионных двигателей обусловлены наличием остаточной атмосферы в вакуумной камере и большим расстоянием между чувствительными элементами датчиков. В этом случае потери энергии пучка ионов связаны с упругими взаимодействиями ионов с нейтральными молекулами и процессами перезарядки.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным ускоряющим элементом резонатора ионного двигателя является внутренний сердечник. Наибольшая напряженность переменного электрического поля достигается в зазоре между магнитной ячейкой и баковой стенкой, а также на плоском концентраторе напряжения. Из экспериментальных исследований определено, что внутренний сердечник является ускорителем, а боковая стенка и крышка снижают потребляемую мощность, незначительно влияя на скорость ионизированного пучка.

Источник финансирования. Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19- 79-10038, <https://rscf.ru/project/19-79-10038/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martinez J. M., Rafalskiy D., Aanesland A. Development and testing of the NPT30-I2 iodine ion thruster // 36th International electric propulsion conference / University of Vienna. 2019. P. 1–11. URL: <https://electricrocket.org/2019/811.pdf> (date accessed: 12.10.2023).

2. Levchenko I., Bazaka K., Ding Yo. [et al.]. Space micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. no. 1. P. 011104-1– 011104-37. <https://doi.org/10.1063/1.5007734>.
3. Samples S., Li G. Z., Wirz R. E. Performance testing and development of the MiXI thruster with the ARCH discharge // 2018 Joint Propulsion Conference. 2018. P. 1–11. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2018-4648> (date accessed: 12.10.2023). <https://doi.org/10.2514/6.2018-4648>.
4. Beller E., Roessler C., Probst U. [et al.]. A radio-frequency generator for ion thrusters based on a Class-E power circuit // *Journal of Electric Propulsion*. 2022. Vol. 1. P. 8. <https://doi.org/10.1007/s44205-022-00008-9>.
5. Tani Y., Tsukizaki R., Koda D. [et al.]. Performance improvement of the $\mu 10$ microwave discharge ion thruster by expansion of the plasma production volume // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 157. P. 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.12.023>.
6. Yavuz B., Turkoz E., Celik M. Prototype design and manufacturing method of an 8 cm diameter RF ion thruster // 2013 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). IEEE, 2013. P. 619–624. DOI: 10.1109/RAST.2013.6581285.
7. Chen S. S., Li X-Y., Li B-Y., Li J. Belief Reliability Modeling and Analysis for the Three-Grid Ion Thruster // 2021 5th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS). IEEE, 2021. P. 58–65. DOI: 10.1109/ICSRS53853.2021.9660754.
8. David L. C., Varghese J. T., Syamala S. R. N. A. Ion propulsion technology: NASA's evolutionary xenon thruster (NEXT) development and long duration tests results and its applications // 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ASET48392.2020.9118370.
9. Vialis T., Jarrige J., Aanesland A., Packan D. Direct thrust measurement of an electron cyclotron resonance plasma thruster // *Journal of Propulsion and Power*. 2018. Vol. 34, no. 5. P. 1323–1333. <https://doi.org/10.2514/1.B37036>.
10. Arefiev A. V., Breizman B. N. Ambipolar acceleration of ions in a magnetic nozzle // *Physics of Plasmas*. 2008. Vol. 15, no. 4. P. 042109. <https://doi.org/10.1063/1.2907786>.
11. Charles C. Plasmas for spacecraft propulsion // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42, no. 16. P. 163001. DOI 10.1088/0022-3727/42/16/163001.
12. Двухазорный СВЧ ионный двигатель и его исследование аэродинамическим методом / И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, К. И. Жариков, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик, И. А. Кузьменко // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 1. С. 109–117. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-1-109-117.
13. Lohmann S., Niggas A., Charnay V. [et al.]. Assessing electron emission induced by pulsed ion beams: a time-of-flight approach // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2020. Vol. 479. P. 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.06.026>.
14. Huang Z., Tan G., Zhou Z. [et al.]. Development of a miniature time-of-flight mass/charge spectrometer for ion beam source analyzing // *International Journal of Mass Spectrometry*. 2015. Vol. 379. P. 60–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2014.12.003>.
15. Courtney D. G., Shea H. Fragmentation in time-of-flight spectrometry-based calculations of ionic electrospray thruster performance // *Journal of Propulsion and Power*. 2015. Vol. 31, no. 5. P. 1500–1504.
16. Determination of the ion beam velocity of an accelerator two-gap ion thruster / V. V. Fedyanin, I. S. Vavilov, P. S. Yachmenev, K I Zharikov, A I Lukyanchik, P V Stepen' // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2022. Vol. 2182, no. 1. P. 012051.1– P. 012051.12. DOI 10.1088/1742-6596/2182/1/012051.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДВУХИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕЛЁТА В ЗАДАЧЕ О ВСТРЕЧЕ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОРБИТЕ МАРСА

UTILIZING A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF TWO-IMPULSE RENDEZVOUS MANEUVERS BETWEEN SPACECRAFT IN THE MARTIAN ORBIT

С. Веиси, В. В. Любимов

Самарский университет, г. Самара, Россия

S. Veisi, V. V. Lyubimov

Samara National Research University, Samara, Russia

Аннотация. В данном исследовании рассматривается применение генетического алгоритма для решения линеаризованных уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира, описывающих двухимпульсный перелёт манёвренного космического аппарата для встречи с пассивным космическим аппаратом на орбитах с большей и меньшей высотами относительно пассивного космического аппарата. Предполагается, что пассивный космический аппарат находится на круговой орбите Марса на высоте 300 км с известными орбитальными параметрами. Используя генетический алгоритм, мы стремимся оптимизировать параметры точки встречи. В частности речь идёт об оптимизации продолжительности перелёта для встречи, а также об оптимизации начального вектора скорости манёвренного космического аппарата в аэроцентрической экваториальной системе. При этом производится минимизация необходимой величины приращения скорости для встречи. Начальное расстояние 20 км между космическими аппаратами рассматривается в обоих рассматриваемых случаях. В то время как изменение вектора положения манёвренного космического аппарата наблюдается в каждом случае. Результаты показывают, что глобальный минимум приращения скорости достигается на траекториях с приближенной продолжительностью 75 минут. Более короткие траектории требуют немного большей величины приращения скорости, что представляет собой компромисс между продолжительностью и затратами энергии, требуемой на перелёт. Увеличение продолжительности перелёта для встречи необязательно приводит к уменьшению требуемого приращения скорости. Кроме того, численный анализ показывает, что результаты оптимизации в обоих случаях поразительно схожи, а ключевое различие состоит в направлении траектории встречи. Это исследование предоставляет ценные численные сведения о процессе оптимизации двухимпульсного перелёта для встречи двух космических аппаратов, демонстрируя практическую ценность генетических алгоритмов в данном контексте.

Ключевые слова: двухимпульсный перелёт, оптимизация с помощью генетического алгоритма, уравнения Хилла-Клохесси-Уилтшира, низкая орбита Марса, минимизация приращения скорости.

Abstract. In this research, we delve into the application of genetic algorithms for optimizing the two-impulse rendezvous maneuver of an active spacecraft with a passive spacecraft, situated at orbits with both higher and lower altitudes relative to the passive counterpart. Assumedly, the passive spacecraft resides in a circular Mars orbit at an altitude of 300 km, with defined orbital parameters. Through the employment of genetic algorithms, our primary objective is the optimization of rendezvous parameters, specifically focusing on the rendezvous duration and the initial velocity vector of the active spacecraft within the areocentric equatorial system, while simultaneously striving to minimize the requisite energy expenditure for the rendezvous. In both cases under consideration, we maintain an initial separation of 20 km between the spacecraft. In each case, we track the shift in the relative position vector of the active spacecraft with respect to the passive spacecraft. Our findings reveal that trajectories approximating 75 minutes in duration yield a global minimum energy requirement. Conversely, shorter trajectories necessitate a marginally larger energy expenditure, thereby embodying a trade-off between flight duration and energy expenditure. Interestingly, lengthening the duration of the rendezvous ma-

never does not invariably result in a lower energy requirement. Moreover, a thorough numerical analysis uncovers a remarkable similarity in the optimization outcomes across both cases, with the rendezvous trajectory direction serving as the principal differential factor. This investigation furnishes crucial numerical insights into the optimization process of two-impulse rendezvous maneuvers, thereby substantiating the practical utility of genetic algorithms in this domain.

Keywords: Two-Impulse Rendezvous, Genetic Algorithm Optimization, Hill-Clohessy-Wiltshire Equations, Low Mars Orbit, Energy Expenditure Minimization.

I. Введение

Встреча двух космических аппаратов (КА) используется для решения целого ряда различных задач, таких как стыковка, удаление космического мусора или обслуживание на одного из КА на орбите. Один из самых распространённых подходов в задаче о такой встрече, а именно встреча по Хиллу-Клохесси-Уилтширу, подробно описана в [1]. В последующих работах использовались и были обобщены методы и подходы, предложенные в [1]. Статья [2] представляет стратегию решения детерминированных игр преследования-уклонения с оптимальным временем с линейными ограничениями состояния и управления, проиллюстрированных симуляциями для группы спутников на низкой околоземной орбите. Исследование [3] подчёркивает настоятельную необходимость раннего обнаружения аномалий в миссиях с участием нескольких космических аппаратов. Исследование [4] представляет новый метод определения времени оптимального управления для космического аппарата, перемещающегося между двумя произвольными состояниями вблизи круговой опорной орбиты. Статья [5] предлагает стратегию прогностического управления с временным ограничением для 6 степеней свободы при автономной встрече и стыковки КА. Исследование [6] демонстрирует подход обучения с подкреплением на основе модели для руководства встречей космического аппарата. В статье [7] обсуждается планирование траекторий для орбитальных встреч и операций близкого сближения с использованием техник выпуклой оптимизации. В исследовании [8] обсуждается применение моделей машинного обучения для коррекции траектории в контексте автономной встречи космических аппаратов. В работе [9] исследуется проблема встречи маневрирующего космического аппарата с пассивным космическим аппаратом для их последующей стыковки. Авторы статьи [10] решают проблему встречи двух космических аппаратов на двух геоцентрических круговых орбитах для дистанционной зарядки батареи пассивного космического аппарата через передачу света на его солнечные панели. Тем не менее, несмотря на разнообразие существующих методов и стратегий, ряд вопросов остается открытым, и наличие определенных проблем и вызовов указывает на необходимость дальнейших исследований в данной области.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваются два беспилотных КА на орбите Марса, с акцентом на невозможность их столкновения во время их встречи. Целью исследования является использование линеаризованных уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира для выполнения двухимпульсного манёвра встречи между маневренным и пассивным космическими аппаратами, и затем применение генетического алгоритма для оптимизации параметров сближения – вектора скорости V_b маневренного КА и продолжительности перелёта t , обеспечивая минимальную величину импульса скорости ΔV . Предоставляются сведения о выводе и применении уравнений относительного движения для двух КА при их встрече, а также описывается система определения орбиты, ориентация и система управления сближением двух КА.

Мы исследуем сценарии встречи двух космических аппаратов как с большей, так и с меньшей высоты относительно пассивного КА. Предполагается, что пассивный КА находится на круговой орбите Марса на высоте 300 км при следующих орбитальных параметрах: наклон орбиты $i = 40^\circ$, истинная аномалия $\vartheta = 60^\circ$, аргумент перигея $\omega = 0^\circ$ и прямое восхождение $\gamma = 20^\circ$. Векторы состояния \mathbf{r}_a и \mathbf{V}_a пассивного КА в ареоцентрической экваториальной системе координат (АЭСК) могут быть вычислены согласно формулам (1)

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_b &= \mathbf{r}_a + \Delta \mathbf{r}, & \text{для первого случая,} \\ \mathbf{r}_b &= \mathbf{r}_a - \Delta \mathbf{r}, & \text{для второго случая.} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\Delta \mathbf{r}$ – вектор расстояния между маневренным и пассивным КА. Модуль начальной величины этого вектора принят равным 20 км.

Затем требуется вычислить вектор скорости \mathbf{V}_b манёвренного КА, а также продолжительность перелёта t для расчёта общего приращения относительной скорости $\Delta\mathbf{V}$. При этом применяется генетический алгоритм для оптимизации этих параметров, обеспечивая минимальную величину ΔV . Дальнейшие расчеты оптимальных параметров позволяют нам построить траекторию встречи, облегчая более глубокий анализ рассматриваемого перелёта.

III. ТЕОРИЯ

1. Уравнения Хилла-Клохесси-Уилтшира и алгоритм встречи

В данном исследовании предполагается, что пассивный КА совершает движение по неизменной круговой орбите. Соответственно, в орбитальной системе координат местный вертикальный горизонт (МВГ) называется кадром Хилла-Клохесси-Уилтшира. Относительное движение двух КА в непосредственной близости друг от друга описывается уравнениями Хилла-Клохесси-Уилтшира, имеющими вид системы уравнений (2):

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 3n^2x - 2n\dot{y} &= 0, \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} &= 0, \\ \ddot{z} + nz &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь n обозначает среднее движение пассивного КА, представленное $n = V/R$, где V и R обозначают абсолютную скорость пассивного КА и его расстояние от центра масс планеты, вокруг которого этот КА обращается.

Предполагаем, что пассивный КА находится на круговой орбите и элементы орбиты обоих космических аппаратов известны. При этом мы можем определить необходимую величину ΔV для встречи, указав продолжительность рассматриваемого перелёта t . В этом случае мы можем вычислить векторы состояния \mathbf{r}_a и \mathbf{V}_a , которые описывают положение и скорость пассивного КА, и аналогичные векторы \mathbf{r}_b и \mathbf{V}_b , которые относятся к положению и скорости манёвренного КА.

Первый шаг заключается в построении матрицы косинусов углов \mathbf{Q} , которая преобразует движение КА из АЭСК в целевую орбитальную систему МВГ пассивного КА. Эта матрица преобразования \mathbf{Q} состоит из координат единичных векторов целевой системы координат i, j и k , как указано ниже:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \\ j_x & j_y & j_z \\ k_x & k_y & k_z \end{bmatrix}, \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{i}} &= \frac{\mathbf{r}_a}{\|\mathbf{r}_a\|} = \left(\frac{r_{a_x}}{\|\mathbf{r}_a\|} \right) \hat{\mathbf{I}} + \left(\frac{r_{a_y}}{\|\mathbf{r}_a\|} \right) \hat{\mathbf{J}} + \left(\frac{r_{a_z}}{\|\mathbf{r}_a\|} \right) \hat{\mathbf{K}}, \\ \hat{\mathbf{j}} &= \frac{\mathbf{v}_a}{\|\mathbf{v}_a\|} = \left(\frac{v_{a_x}}{\|\mathbf{v}_a\|} \right) \hat{\mathbf{I}} + \left(\frac{v_{a_y}}{\|\mathbf{v}_a\|} \right) \hat{\mathbf{J}} + \left(\frac{v_{a_z}}{\|\mathbf{v}_a\|} \right) \hat{\mathbf{K}}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{k}} = \hat{\mathbf{i}} \times \hat{\mathbf{j}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{I}} & \hat{\mathbf{J}} & \hat{\mathbf{K}} \\ \frac{r_{a_x}}{\|\mathbf{r}_a\|} & \frac{r_{a_y}}{\|\mathbf{r}_a\|} & \frac{r_{a_z}}{\|\mathbf{r}_a\|} \\ \frac{v_{a_x}}{\|\mathbf{v}_a\|} & \frac{v_{a_y}}{\|\mathbf{v}_a\|} & \frac{v_{a_z}}{\|\mathbf{v}_a\|} \end{bmatrix}.$$

Далее следует построить векторы положения и скорости $\delta\mathbf{r}$ и $\delta\mathbf{V}$ для манёвренного КА по отношению к пассивному КА.

$$\delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_b - \mathbf{r}_a, \quad \delta\mathbf{V} = \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_a - \boldsymbol{\Omega} \times \delta\mathbf{r}. \quad (4)$$

здесь $\boldsymbol{\Omega} = n\mathbf{k}$ обозначает вектор угловой скорости пассивного КА.

Далее мы преобразуем относительные векторы положения и скорости $\delta\mathbf{r}$ и $\delta\mathbf{V}$ из АЭСК в целевую орбитальную систему координат МВГ. Система уравнения (5) описывает относительные векторы положения и скорости в целевой системе:

$$\delta\mathbf{r}_0 = \mathbf{Q}\delta\mathbf{r}, \quad \delta\mathbf{V}_0^- = \mathbf{Q}\delta\mathbf{V}. \quad (5)$$

В этих уравнениях $\delta\mathbf{V}_0$ обозначает вектор скорости манёвренного КА по отношению к пассивному КА в целевой орбитальной системе координат, рассчитываемый непосредственно перед началом траектории рассматриваемого перелёта.

Применяя матрицу Хилла-Клохесси-Уилтшира Φ , мы можем рассчитать векторы скорости манёвренного КА по отношению к пассивному КА в целевой орбитальной системе координат сразу после начала сближения двух КА ($\delta\mathbf{V}_0^+$) и перед их встречей $\delta\mathbf{V}_f^-$ [1]. Выражения (6) описывают эти векторы скорости.

$$\begin{aligned} \delta\mathbf{V}_0^+ &= -[\Phi_{rv}(t_f)]^{-1}[\Phi_{rr}(t_f)]\delta\mathbf{r}_0, & \delta\mathbf{V}_f^- &= [\Phi_{vr}(t_f)]\delta\mathbf{r}_0 + [\Phi_{vv}(t_f)]\delta\mathbf{V}_0^+, \\ \Phi_{rv}(t_f) &= \begin{bmatrix} \frac{1}{n}\sin nt_f & \frac{2}{n}(1-\cos nt_f) & 0 \\ \frac{2}{n}(\cos nt_f - 1) & \frac{1}{n}(4\sin nt_f - 3nt_f) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n}\sin nt_f \end{bmatrix}, & \Phi_{vr}(t_f) &= \begin{bmatrix} 3n\sin nt_f & 0 & 0 \\ 6n(\cos nt_f - 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n\sin nt_f \end{bmatrix}, \\ \Phi_{rr}(t_f) &= \begin{bmatrix} 4-3\cos nt_f & 0 & 0 \\ 6(\sin nt_f - nt_f) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cos nt_f \end{bmatrix}, & \Phi_{vv}(t_f) &= \begin{bmatrix} \cos nt_f & 2\sin nt_f & 0 \\ -2\sin nt_f & 4\cos nt_f - 3 & 0 \\ 0 & 0 & \cos nt_f \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Получив относительные векторы скорости, мы можем рассчитать величину ΔV в момент начала перелёта, используя уравнение (7)

$$\Delta\mathbf{V}_0 = \delta\mathbf{V}_0^+ - \delta\mathbf{V}_0^-. \quad (7)$$

Аналогично уравнение (8) позволяет нам определить необходимую величину ΔV , чтобы привести манёвренный КА к стабилизации относительно пассивного КА, т. е. завершить перелёт, обеспечивающий встречу этих двух КА.

$$\Delta\mathbf{V}_f = \delta\mathbf{V}_f^+ - \delta\mathbf{V}_f^-. \quad (8)$$

Важно отметить, что относительный вектор скорости должен быть равен нулю после завершения встречи. Естественно, общую величину ΔV можно определить, сложив абсолютные значения двух модулей скоростей, как это показано в уравнении (9).

$$\Delta V_{total} = \|\Delta\mathbf{V}_0\| + \|\Delta\mathbf{V}_f\|. \quad (9)$$

2. Оптимизация продолжительности сближения и начальной скорости активного КА в ареоцентрической экваториальной системе координат с помощью генетического алгоритма

Приращение скорости сближения ΔV , рассчитанное в полученном алгоритме, зависит от различных параметров, таких как продолжительность перелёта t при сближении двух КА и векторы состояния \mathbf{r} и \mathbf{V} обоих КА в начале перелёта. Исходя из начального расстояния 20 км между двумя КА и двух различных орбит (начальной и конечной) для манёвренного КА, мы стремимся оптимизировать продолжительность t перелёта и начальный вектор скорости \mathbf{V}_b манёвренного КА в геоцентрической экваториальной системе координат, чтобы минимизировать ΔV . Для этой оптимизации мы полагаемся на генетический алгоритм [11, 12].

Генетический алгоритм основан на принципе естественного отбора образцов из набора популяции в каждом поколении для выбора наилучших и наиболее приспособленных данных. В контексте данной задачи о встрече, мы настраиваем генетический алгоритм на прохождение через 200 поколений с размером популяции 100. Указывается ряд параметров оптимизации, ограниченных нижней и верхней границей, в рамках которых алгоритм выбирает образцы для мутации. В этом исследовании мы рассматриваем ряд параметров $P = [V_{bx}, V_{by}, V_{bz}, t]$ оптимизации с конкретными границами. Здесь V_{bx} , V_{by} и V_{bz} представляют собой компоненты x , y и z начального вектора скорости \mathbf{V}_b манёвренного КА в АЭСК, принимающие значения от -10 до 10 км/с. Параметр

t обозначает продолжительность перелёта при сближении двух КА. Он рассматривается в пределах от 10 до 130 минут.

Достаточно большой размер популяции гарантирует, что алгоритм не попадет в локальные оптимумы. Кроме того, чтобы избежать такого рода подводных камней, мы применяем другой подход. Мы разделяем границу продолжительности на шесть 20-минутных интервалов. Иными словами, мы выполняем генетический алгоритм 6 раз и находим минимальную величину ΔV в каждом интервале.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Численно моделируем сближение двух КА с более высокой начальной орбиты манёвренного КА, и затем выполняем оптимизацию параметров. Рис. 1 представляет результаты этой оптимизации.

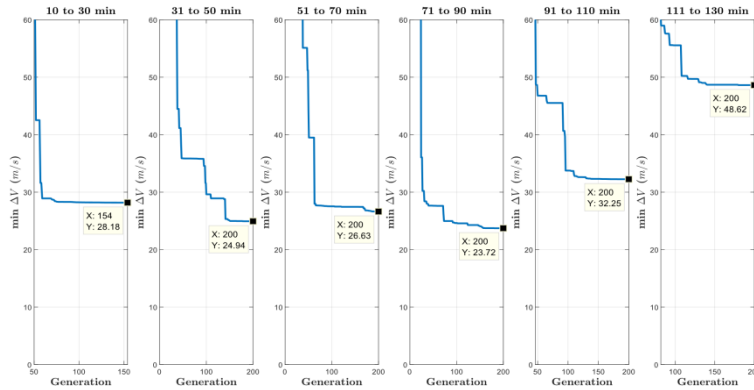


Рис. 1. Минимальное общее значение ΔV , необходимое для сближения с более высокой орбиты манёвренного КА в каждом интервале оптимизации

Как показано на рисунке 1, в каждом интервале идентифицируется минимальное значение ΔV , при этом глобальный минимум $\Delta V = 23,72$ м/с находится в четвертом интервале. Это соответствует продолжительности сближения от 71 до 90 минут. Отметим, что в первых двух интервалах, где продолжительность сближения значительно короче, минимальное значение ΔV колеблется около величины 26,5 м/с. Это не намного выше глобального минимального значения ΔV . Кроме того, из рис. 1 следует, что увеличение продолжительности сближения необязательно уменьшает необходимое значение ΔV . Действительно, эта величина может остаться неизменной или даже потенциально увеличиться. Рис. 2 иллюстрирует траектории сближения в каждом рассмотренном интервале оптимизации, построенные с использованием оптимальных значений продолжительности сближения и начальных компонентов скорости манёвренного КА в АЭСК.

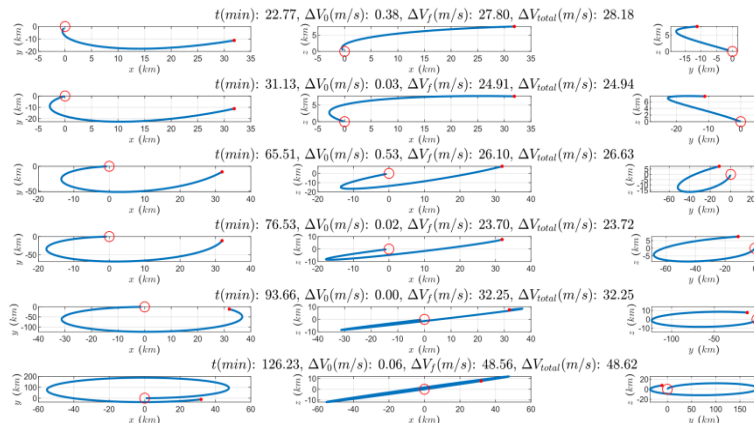


Рис. 2. Траектории сближения по уравнениям Хилла-Клохесси-Уилтшира, начинающиеся с более высокой высоты манёвренного КА для нескольких интервалов оптимизации

На этом рисунке 2 точка и круг обозначают положение манёвренного и пассивного КА, соответственно. Траектории показывают, что сближение двух КА происходит по пространственной кривой. Кроме того, можно заметить, что с увеличением продолжительности перелёта траектория приближается к замкнутой эллиптической орбите. При более длительных временах сближения манёвренный КА может даже несколько раз обойти вокруг пассивного КА, прежде чем добраться до пассивного КА. В визуализации каждой траектории представлены оптимальные параметры, определённые с использованием генетического алгоритма. Заслуживает внимания тот факт, что оптимальное начальное изменение скорости, ΔV_0 , является минимальным, в то время как импульс тормозной скорости, ΔV_f , необходимый для завершения манёвра сближения, практически равен общей величине ΔV_{total} . Такая незначительная величина ΔV_0 связана с аналогичными начальными орбитальными условиями обоих КА. Эти траектории построены на основе использования уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира, которые моделируют положение манёвренного КА относительно пассивного КА. Важно отметить, что оба КА совершают орбитальное движение вокруг центра масс планеты.

После численного моделирования сближения двух КА с более высокой начальной орбиты манёвренного КА рассмотрим другой случай: сближение с более низкой орбиты манёвренного КА. Пусть начальное расстояние между двумя КА также равно 20 км. Учитывая вектор положения $\mathbf{r}_b = \mathbf{r}_a - \Delta \mathbf{r}$ манёвренного КА в АЭСК, мы применим аналогичный ранее рассмотренному подход. А именно, мы применим генетический алгоритм с идентичными границами для параметров, чтобы оптимизировать продолжительность времени сближения t с учётом начального вектора скорости \mathbf{V}_b манёвренного КА на его начальной орбите в АЭСК. На рис. 3 представлено минимальное значение ΔV , полученное в каждом интервале, что соответствует подходу, используемому в предыдущей части этого исследования.

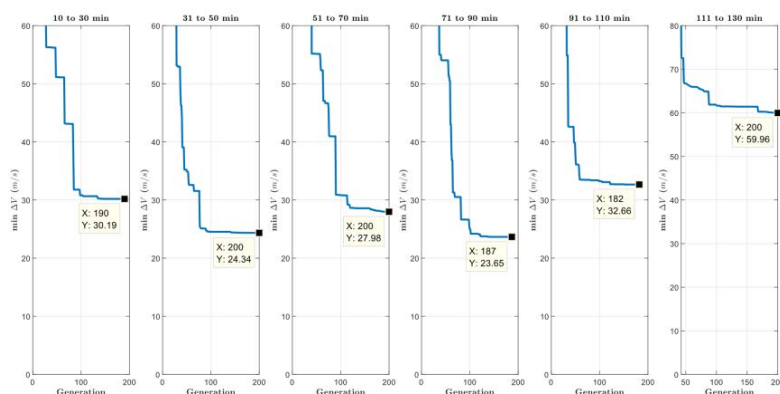


Рис. 3. Минимальное общее значение ΔV , необходимое для сближения с более низкой орбиты манёвренного КА в каждом интервале оптимизации

Аналогично предыдущему случаю, изображённому на рис. 1, мы можем наблюдать, что глобальное минимальное значение 23.65 м/с для общего ΔV определяется в четвертом интервале. Здесь оптимальная продолжительность манёвра охватывает 72-минутный интервал, колеблющийся от 70 до 90 минут. Аналогично, из рис. 3 можно сделать вывод, что более короткое время сближения не требует значительно большего изменения скорости ΔV . Кроме того, последующее увеличение продолжительности времени сближения, по-видимому, не приводит к уменьшению необходимого значения ΔV .

На рис. 4 представлены траектории сближения двух КА с более низкой начальной высокой высоты манёвренного КА, полученные на основе применения уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира для нескольких интервалов оптимизации.

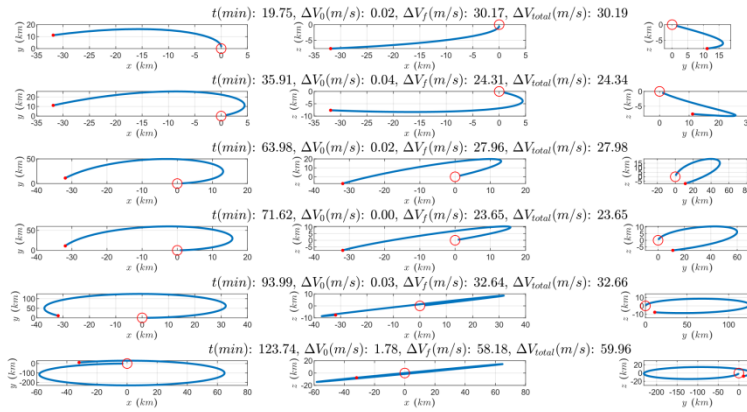


Рис. 4. Траектории сближения по уравнениям Хилла-Клохесси-Уилтшира, начинающиеся с более низкой высоты манёвренного КА для нескольких интервалов оптимизации

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, минимальное значение ΔV достигается при совпадении направлений векторов начальной скорости и импульса скорости. В четвертом интервале время сближения демонстрирует минимальное значение ΔV . В этот момент углы наклона между векторами начальной и конечной скоростей, а также их импульсами, наименьшие. В других диапазонах времени, чтобы соответствовать заданным требованиям, углы наклона между этими векторами отклоняются от оптимальных, что увеличивает значение ΔV .

Хотя, интуитивно, кажется, что долгий маневр сближения потребует меньше энергии, фиксированное начальное и конечное положения КА, а также формы их орбит, приводят к тому, что отклонение продолжительности маневра от оптимума увеличивает угол наклона между векторами импульса скорости и начальной и конечной скоростями, что увеличивает энергетические затраты.

Траектории сближения, начиная с меньшей высоты маневренного КА, схожи с теми, где маневр начинается с большей высоты. Оптимальные параметры в обоих случаях практически совпадают, что логично, учитывая, что направление вектора положения \mathbf{r}_0 остается неизменным.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании мы рассмотрели процесс численной оптимизации двух случаев двухимпульсного сближения двух КА на основе решения уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира, полученных с более низкой и более высокой начальной орбиты манёвренного КА. При этом требуется произвести численное моделирование сближения манёвренного КА с пассивным КА, находящимся на низкой орбите вокруг планеты Марса на высоте 300 км. В обоих случаях пассивный КА имеет одинаковые орбитальные параметры: наклон орбиты 40 градусов, истинную аномалию 60 градусов и прямое восхождение 20 градусов. Манёвренный КА находится на расстоянии 20 км от пассивного КА. В первом случае он расположен выше, чем пассивный КА, а во втором случае он находится ниже пассивного КА. Мы применили генетический алгоритм в шести интервалах, каждый из которых представлял различную продолжительность сближения в 20 минут и тот же диапазон начальных скоростей, чтобы обеспечить метод минимизации требуемой ΔV для сближения. В результате мы оптимизировали четыре параметра в каждом интервале: продолжительность сближения t и компоненты вектора начальной скорости V_{bx} , V_{by} и V_{bz} в ареоцентрической экваториальной системе координат. Соответствующие графики оптимизации ΔV и траектории сближения позволяют провести дальнейший анализ процессов оптимизации и сближения.

Из этого исследования мы можем сделать следующие выводы:

1. На траекториях примерной продолжительностью в 75 минут достигается минимальное значение ΔV . В то время как для более коротких траекторий около 30 минут требуется несколько большее значение ΔV , что указывает на существование компромисса между временем выполнения маневра и затратами энергии. Увеличение продолжительности маневра сближения не гарантирует уменьшения ΔV .

2. Оба рассмотренных сценария демонстрируют существенное сходство результатов оптимизации и траекторий сближения, основное различие которых сводится к направлению. Это объясняется тем, что начальное направление вектора положения активного космического аппарата в обоих случаях идентично.

3. Начальное значение ΔV_0 , необходимое для начала маневра сближения, существенно мало, что отражает близость начальных орбитальных условий обоих космических аппаратов.

В заключение отметим, что данное исследование демонстрирует эффективное применение уравнений Хилла-Клохесси-Уилтшира и генетического алгоритма для численной оптимизации параметров в двухимпульсных маневрах сближения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clohessy W. H., Wiltshire R. S. Terminal guidance system for satellite rendezvous // *Journal of the aerospace sciences*. 1960. Vol. 27, no. 9. P. 653–658. <https://doi.org/10.2514/8.8704>.
2. Jansson O., Harris M. W. A Geometrical, Reachable Set Approach for Constrained Pursuit–Evasion Games with Multiple Pursuers and Evaders // *Aerospace*. 2023. Vol. 10, no. 5. P. 477. <https://doi.org/10.3390/aerospace10050477>.
3. Caruso A., Quarta A. A., Mengali G., Bassetto M. Optimal On-Orbit Inspection of Satellite Formation // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, no. 20. P. 5192. <https://doi.org/10.3390/rs14205192>.
4. Sevier M., Romano M. Time-optimal maneuvers of a spacecraft between two arbitrary states in proximity of a circular reference orbit // *Advances in Space Research*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117723003150>. (date accessed: 12.10.2023). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.04.037>.
5. Behrendt G., Soderlund A., Hale M., Phillips S. Autonomous Satellite Rendezvous and Proximity Operations with Time-Constrained Sub-Optimal Model Predictive Control // *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, no. 2. P. 9380–9385. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.228>.
6. Yang Z., Xing L., Gu Z. [et al.]. Model-based reinforcement learning and neural-network-based policy compression for spacecraft rendezvous on resource-constrained embedded systems // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2022. Vol. 19, no. 1. P. 1107–1116. DOI: 10.1109/TII.2022.3192085.
7. Ortolano N., Geller D. K., Avery A. Autonomous optimal trajectory planning for orbital rendezvous, satellite inspection, and final approach based on convex optimization // *The Journal of the Astronautical Sciences*. 2021. Vol. 68, no. 2. P. 444–479. <https://doi.org/10.1007/s40295-021-00260-5>.
8. Dedecker L. Artificial intelligence techniques for uncooperative space objects rendezvous. 2022. URL: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/194953> (date accessed: 12.10.2023).
9. Soderlund A. A., Phillips S., Zaman A., Petersen C. D. Autonomous satellite rendezvous and proximity operations via geometric control methods // *AIAA Scitech 2021 Forum*. 2021. P. 0075. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0075>.
10. Veisi S., Lyubimov V. V. The Rendezvous Mission of Two in-Orbit Satellites Using Numerical Simulation // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2022. Vol. 23, no. 10. P. 555–559.
11. Woffinden D., Eckman R., Robinson S. Optimized Trajectory Correction Burn Placement for the NASA Artemis II Mission // *45th Annual AAS Guidance, Navigation and Control (GN&C) Conference*. Breckenridge, CO. 2023. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20230000223> (date accessed: 12.10.2023).
12. Woffinden D., Barton B. Optimized Trajectory Correction Burn Placement for NRHO Orbit Maintenance // *33rd AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*. 2023. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220019162> (date accessed: 12.10.2023).

УДК 629.78

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-45-50

МОДЕЛИРОВАНИЕ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА С УЧЁТОМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНОЙ СТРУИ

MODELING THE ANGULAR MOTION OF VARIABLE STRUCTURE SPACECRAFT ACCOUNT TO THE DESTABILIZING PROPERTIES OF THE JETSTREAM

Equation Section (Next)

М. М. Крикунов

Самарский университет им. Королева, г. Самара, Россия

M. M. Krikunov

Samara National Research University, Samara, Russia

Аннотация. В работе моделируется динамика космического аппарата (КА) переменной массы. Применяется обобщённый метод анализа кривизны фазовой траектории, уточнённый для случая, при котором моменты сил, приложенных к аппарату, зависят от угловой скорости. Рассматриваются частные случаи и осуществляется анализ КА с динамической асимметрией. С помощью метода показывается наличие сложных эволюций углового движения, при которых реактивная струя двигателя создает кориолисовы эффекты (эффект Магнуса), дестабилизирующие конус прецессии, и приводящие к росту угла нутации.

Ключевые слова: переменный состав, обобщённый метод анализа кривизны фазовой траектории, космический аппарат, качественный анализ.

Abstract. The work presents simulation of dynamics of a spacecraft-(SC) with variable mass. A generalized method for analyzing the phase trajectory curvature is used, being refined for the case in which the moments of forces applied to the SC depend on the angular velocity. Special cases are considered along with analyzing a spacecraft with dynamic asymmetry. Using the method, the presence of complex evolutions of angular motion is shown, in which the jet stream of the engine creates Coriolis effects (Magnus effect), destabilizing the precession cone and leading to an increase in the nutation angle.

Keywords: variable structure, generalized method for analyzing the curvature of a phase trajectory, spacecraft, qualitative analysis.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач механики космического полёта является моделирование процессов ориентации и переориентации КА при выполнении активных маневров. Данная задача рассматривается в различных постановках, которые учитывают различные аспекты [1–5]. В настоящей работе осуществляется численное моделирование динамики космического аппарата (КА) переменной массы с изменением всех инерционно-массовых параметров при создании струи реактивной тяги. Для анализа углового движения КА и исследования эволюции его прецессионного движения применяется обобщённый метод анализа кривизны фазовой траектории [6], который основывался на работах [7, 8] и был уточнён для случая, при котором моменты сил, приложенных к аппарату, зависят от угловой скорости. Рассматриваются частные случаи и осуществляется анализ КА с динамической асимметрией. С помощью метода показывается наличие сложных эволюций углового движения, при которых реактивная струя двигателя создает кориолисовы эффекты (эффект Магнуса), дестабилизирующие конус прецессии, и приводящие к росту угла нутации.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [9] был рассмотрен эффект создания кориолисовыми силами движущихся внутри каналов горения частиц суммарного динамического эффекта (эффекта Магнуса), осуществляющего демпфирующее воздействие на пространственные колебания, приводящие к уменьшению раствора конуса прецессии, что является позитивным стабилизирующим фактором. В настоящей работе на основе метода анализа эволюции величины кривизны апекса продольной оси тела осуществляется изучение прецессионного движения КА переменной массы и более детальный анализ реализации эффекта Магнуса, в том числе, когда этот эффект перестает быть позитивным стабилизирующим фактором, становясь тем самым дополнительным возмущением. В этом негативном случае реализации эффекта Магнуса в рамках углового движения КА будут увеличиваться амплитуды нутационных колебаний, тем самым разваливая конус прецессии и ухудшая качество выдачи импульса реактивной тяги, распыляя ее в пространстве.

Следуя обобщённому методу анализа кривизны фазовой траектории [6], требуется вычислить функцию:

$$\langle P \rangle = \frac{\langle \dot{F} \rangle - \langle r \rangle}{\langle G \rangle} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\langle F \rangle - \langle r \rangle}{\langle G \rangle} \right), \tag{1}$$

где $\langle F \rangle$, $\langle G \rangle$ и $\langle r \rangle$ для случая с приложенными к аппарату моментами сил, зависящими от угловой скорости, определяются выражениями:

$$\langle \dot{F} \rangle = 1/2 r \alpha, \quad \langle \dot{G} \rangle = -1/2 D v_r G (1/A + 1/B), \quad \langle \dot{r} \rangle = M_z / C, \tag{2}$$

где $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ – главные моменты инерции в связанной с аппаратом системе координат, r – компонент вектора угловой скорости, соответствующий оси Cz связанной с аппаратом системы координат (СК); M_z – компонент момента внешних и реактивных сил, приложенных к КА, относительно оси Cz (рис. Рис. 1); $D = \gamma((l + L)^2 - l^2)$, v_r – относительная скорость отбрасываемых частиц; $\alpha = B/A - C/A + A/B - C/B$.

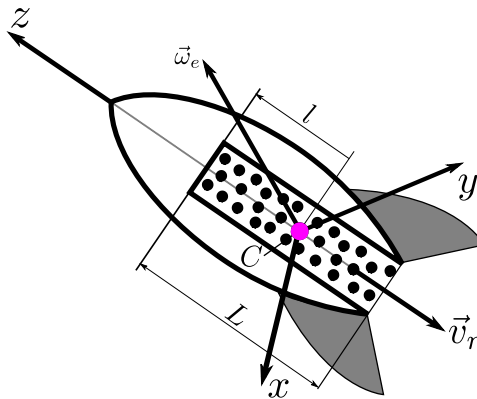


Рис. 1. Общий вид аппарата и расположение осей связанной системы координат

После подстановки (2) в (1) будет иметь место следующая функция эволюции кривизны апекса продольной оси:

$$\langle P \rangle = \frac{r^2 (\alpha - 2)^2}{4G^2} \left(\frac{M_z}{Cr} + \frac{\dot{\alpha}}{\alpha - 2} + \frac{1}{2} D v_r \left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right) \right), \tag{3}$$

причём последнее слагаемое в скобках (3), содержащее множитель D , описывает воздействие на динамику системы со стороны реактивной струи ракетного двигателя, которая создает эффект Магнуса [9] вследствие возникновения кориолисовых сил при движении частиц реактивной струи вдоль канала горения (сопла).

Реактивная струя может создавать «положительный» эффект Магнуса, который обеспечивает демпфирование угловых колебаний, подавление конуса прецессии и уменьшение угла нутации, но также имеется возможность возникновения «отрицательного» эффекта Магнуса, когда происходит увеличение нутационных колебаний и раскрытие конуса прецессии. В случаях с твердотопливными ракетными двигателями указанный эффект Магнуса может иметь противоположную динамику, приводящую к росту угла нутации. Реализация и конкретный динамический тренд эффекта Магнуса будет зависеть от конструкции канала горения и его положения относительно центра масс аппарата, что и описывается множителем D . В этой связи представляется актуальной задача поиска и анализа подобных отрицательных случаев для их парирования, либо устранения на этапах проектирования ракетных средств.

Рассмотрим величину D из (3) и запишем её в следующем виде:

$$D = \gamma L(L + 2l). \quad (4)$$

Легко видеть, что знак выражения (4) определяется величиной $L + 2l$, поэтому целесообразно рассмотреть три случая (рис. Рис. 2):

$$\text{а) } l > -L/2, \quad \text{б) } l = -L/2, \quad \text{в) } l < -L/2.$$

Здесь стоит отметить, что параметр L определяет длину канала горения, в котором частицы реактивной тяги движутся с существенными скоростями к выходу из сопла, создавая при этом кориолисовы силы и моменты сил, формирующие эффект Магнуса. Величина L отсчитывается от нижнего среза канала горения (среза сопла) в сторону к носовой части аппарата. Величина l определяет, в свою очередь, положение центра масс аппарата по отношению к верхнему срезу канала горения, и отсчитывается в сторону носовой части от верхнего среза канала горения.

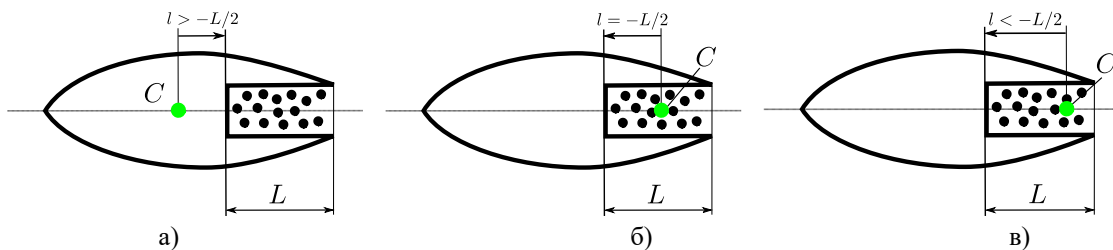


Рис. 2. Варианты расположения центра масс внутри аппарата

Заметим, что случай б) является вырожденным в том смысле, что доставляет нулевое значение $D = 0$ и, следовательно, в этом случае эффект Магнуса будет отсутствовать.

Случай а) изучался Магнусом [9] при исследовании гироскопов переменного состава, когда обеспечивается «положительное» демпфирующее влияние кориолисовых сил на динамику конуса прецессии. В этом варианте кориолисовы силы будут «усиливать» устойчивость продольной оси аппарата и процесса формирования тяги в заданном направлении.

Особо важен в текущем исследовании случай в) и ему подобные, когда в силу изменения массовых и инерционных характеристик центр масс геометрически перемещается в заднюю часть канала горения дальше его середины. Подобные ситуации с геометрическим расположением центра масс не изучались Магнусом, так как в его исследованиях кориолисовы эффекты создавались частицами реактивной струи при их движении по каналу горения в «нижней» части ракеты в довольно коротком сопле, что характерно для жидкостных ракет. Однако, вполне возможны иные случаи. Так, для ракет на твёрдом топливе, канал горения по своей сути является длинным соплом, а частицы реактивной струи одновременно формируются во всех частях канала сразу и движутся в сторону нижнего среза с большим давлением и скоростями, интегрально создавая эффект Магнуса. В этих случаях вполне возможны ситуации с инерционно-массовой геометрией, представленной схематически на рисунке (рис. Рис. 3). Именно в подобных случаях и будут реализовываться «отрицательные» эффекты Магнуса, увеличивающие раствор конуса прецессии, и тем самым распыляя реактивную тягу без ее фокусировки, что, безусловно, является негативным сценарием в динамике аппарата с твердотопливным ракетным двигателем.

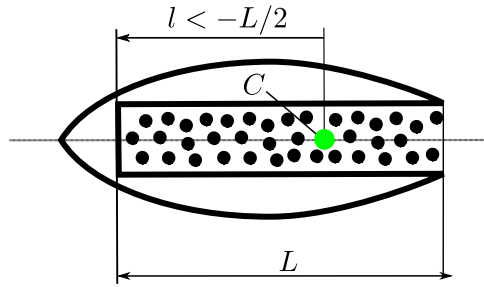


Рис. 3. Канал горения для некоторых ракет на твёрдом топливе

Другими словами, чтобы замечать и устранять «отрицательный» эффект Магнуса, необходимо уже на этапе проектирования принимать во внимание возможность его формирования, учитывая все особенности конструкции ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) и перспективных схем его реализации, в т. ч. [10].

III. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим негативный вариант динамики, когда имеет место «отрицательный» эффект Магнуса на примере работы перспективной разработки РДТТ на гранулированном топливе (рис. Рис. 4), предложенной в [10].

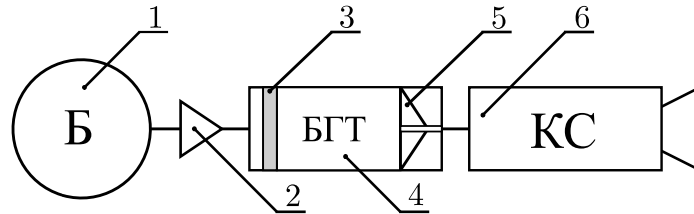


Рис. 4. Схема ракетного двигателя гранулированного твёрдого топлива [10]:

- 1 – баллон с газом; 2 – редуктор; 3 – газопроницаемый поршень; 4 – бак гранулированного топлива;
5 – запорно-регулирующий клапан; 6 – камера сгорания с сопловым блоком

В зависимости от конкретной реализации предложенной схемы и инерционно-массовой компоновки аппарата в целом вполне возможны следующие случаи:

- 1) геометрическое положение центра масс по отношению к корпусу аппарата изменяется в процессе экстрагирования топлива и изменения массы аппарата, но при этом остается неизменным соотношение между l и $-L/2$;
- 2) геометрическое положение центра масс изменяется, и при этом также изменяется соотношение между l и $-L/2$, причем при выгорании топлива величина l может переходить через значение $-L/2$ двумя способами:
 - а) параметр l увеличивается,
 - б) параметр l уменьшается.

В первом случае динамика углового движения изучена и может представлять собой единственный режим: с реализацией либо «положительного» эффекта Магнуса со «скруткой» апекса продольной оси, либо «отрицательного» эффекта Магнуса – с «раскруткой» спирали апекса.

Во втором случае динамика будет реализовываться более сложным образом, когда характер поведения годографа вектора тяги будет изменяться с переменным трендом: начинает сворачиваться по спирали, а потом разворачиваться, либо наоборот. В таком случае целесообразно поставить задачу о том, будет ли выходить годограф вектора тяги в процессе работы двигателя за какую-то наперед заданную область или нет, внося тем самым ошибку в формирование реактивного импульса, когда, например, реализуется межорбитальный переход и эта величина критически важна, как и ее ошибка.

Проведем некоторое моделирование. Пусть $l = l_0 + (l_k - l_0)t / T_k$. Рассмотрим два случая:

1. $l_0 = -0,45L$; $l_k = -0,55L$.

Тогда графики функции эволюции кривизны апекса продольной оси (красные линии) и ее осредненное (синие линии) значение $\langle P \rangle$, а также фазовые портреты на плоскости малых углов Крылова будут иметь вид, описывающий соответствующую динамику конуса прецессии, представленные на рис.Рис. 5а иРис. 6а.

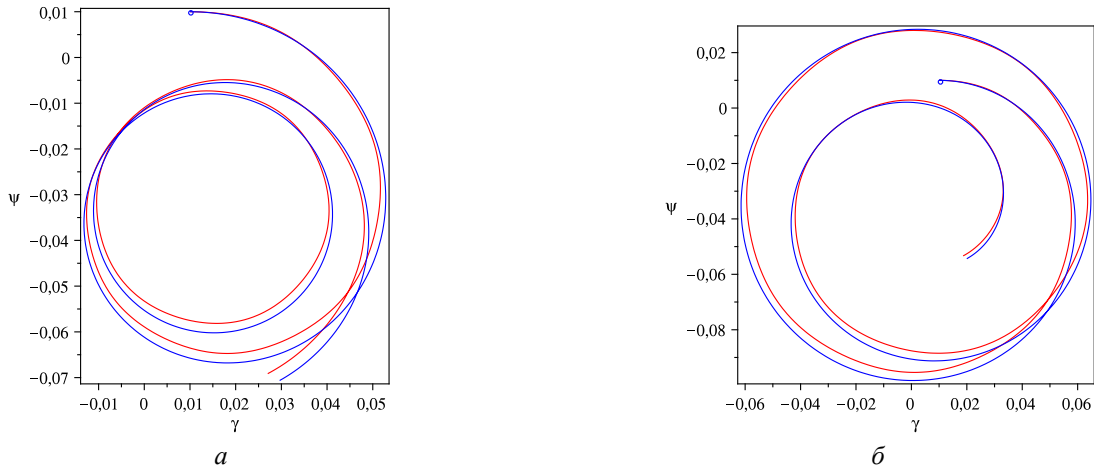


Рис. 5. Фазовый портрет в углах Крылова для случаев:
 а) $l_0 = -0,45L$, $l_k = -0,55L$; б) $l_0 = -0,55L$; $l_k = -0,45L$

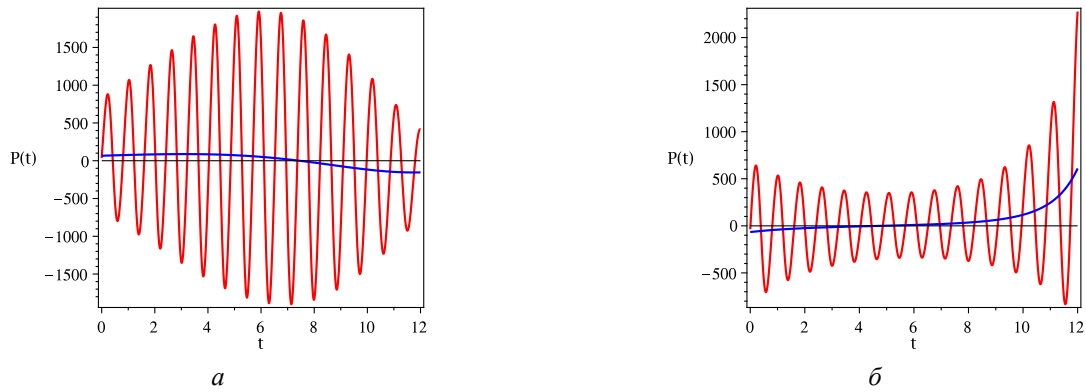


Рис. 6. Функция $\langle P \rangle$ для случаев:
 а) $l_0 = -0,45L$, $l_k = -0,55L$; б) $l_0 = -0,55L$; $l_k = -0,45L$

2. $l_0 = -0,55L$; $l_k = -0,45L$.

Тогда графики функции $\langle P \rangle$ и фазовый портрет будет выглядеть, как показано на рис.Рис. 5б иРис. 6б.

Далее можем увеличивать диапазон изменения l . Например, $l_0 = -0,35L$; $l_k = -0,65L$ (рис.Рис. 7а,Рис.

8а).

В обратную сторону $l_0 = -0,65L$; $l_k = -0,35L$ (рис.Рис. 7б,Рис. 8б).

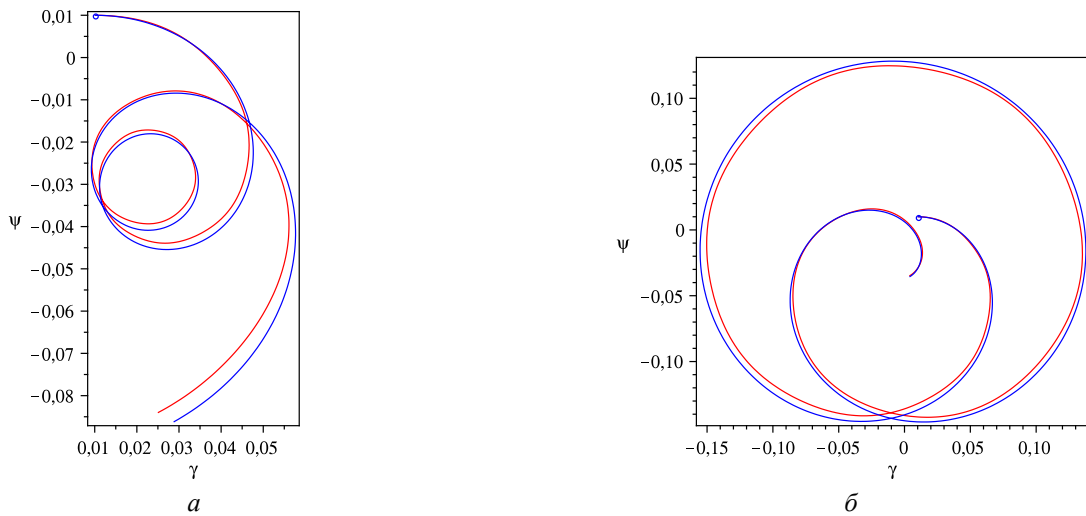


Рис. 7. Фазовый портрет в углах Крылова для случаев:
 а) $l_0 = -0,35L$, $l_k = -0,65L$; б) $l_0 = -0,65L$; $l_k = -0,35L$

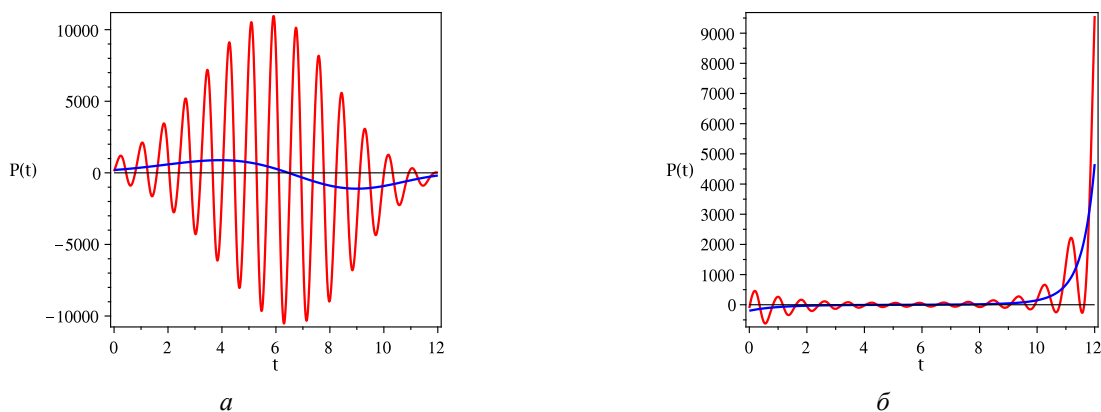


Рис. 8. Функция $\langle P \rangle$ для случаев:
 а) $l_0 = -0,35L$, $l_k = -0,65L$; б) $l_0 = -0,65L$; $l_k = -0,35L$

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты моделирования (рис.Рис. 6 и Рис. 8) свидетельствуют о возможности реализации «отрицательного» эффекта Магнуса, при которой годографы продольной оси КА (образы конуса прецессии) становятся сложными спиральными кривыми с изменяемыми трендами и с этапами роста угла нутации. Подобные случаи необходимо учитывать при проектировании КА и разгонных блоков с РДТТ для избегания проявлений как «отрицательного» эффекта Магнуса, так и итогового накопления ошибок межорбитальных маневров вследствие распыления импульса реактивного двигателя в пространстве в процессе его формирования с учетом углового движения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда («Выявление и устранение хаоса в динамических процессах и движении космических систем сложной структуры», № 19-19-00085).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноусько Ф. Л., Акуленко Л. Д., Лещенко Д. Д. Эволюция движений твердого тела относительно центра масс. М.-Ижевск : Изд-во Ижев. ин-та компьютер. исследований, 2015. 308 с. ISBN 978-5-4344-0294-1.
2. Aslanov V. S. Rigid Body Dynamics for Space Applications. Butterworth-Heinemann, 2017. 410 p. ISBN 0081018746.
3. Маркеев А. П. Об устойчивости регулярной прецессии несимметричного гироскопа в критическом случае резонанса четвертого порядка // Доклады Академии наук. 2018. Т. 481, № 2. С. 151–155. DOI 10.31857/S086956520001193-5.
4. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. Evolution of a heavy rigid body rotation under the action of unsteady restoring and perturbation torques // Nonlinear Dyn. 2021. Vol. 103, № 2. P. 1517–1528. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-06195-0>.
5. Leshchenko D., Ershkov S., Kozachenko T. Rotations of a Rigid Body Close to the Lagrange Case under the Action of Nonstationary Perturbation Torque // Journal of Applied and Computational Mechanics. 2022. Vol. 8, no. 3. P. 1023–1031.
6. Doroshin A. V., Krikunov M. M. The generalized method of phase trajectory curvature synthesis in spacecraft attitude dynamics tasks // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2022. Vol. 147. P. 104246. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104246>.
7. Дорошин А. В. Эволюции прецессионного движения неуравновешенных гироскопов переменного состава // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72, № 3. С. 385–598.
8. Doroshin A. V. Analysis of attitude motion evolutions of variable mass gyrostats and coaxial rigid bodies system // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2010. Vol. 45, no. 2. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2009.11.001>.
9. Магнус К. Гироскоп : Теория и применение / пер. с нем. Г. Д. Блюмина [и др.]. М. : Мир, 1974. 526 с.
10. Елькин А. В., Земерев Е. С., Малинин В. И. [и др.]. Ракетный двигатель на гранулированном твердом топливе // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2021. № 64. С. 16–24. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.64.02.

УДК 629.7.036

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-51-57

**РАЗРАБОТКА СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЯГИ НА ОСНОВЕ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**DEVELOPMENT OF A THRUST MEASUREMENT STAND BASED
ON THE AERODYNAMIC METHOD FOR ELECTRIC THRUSTERS
OF SMALL SPACECRAFT**

П. С. Ячменев, В. В. Федянин, И. С. Вавилов

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

P. S. Yachmenev, V. V. Fedyanin, I. S. Vavilov

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Разработан стенд измерения тяги на основе аэродинамического метода. Для тестирования стенда прототип электроракетного двигателя был применен как двигатель на холодном газе. Рабочим телом являлся газообразный азот. При расходе 1.2 мг/с величина тяги составила от 0.674 до 0.736 мН, при расходе 1.7 мг/с величина тяги составила 0.934-1 мН и при расходе 2.6 мг/с величина тяги составила от 1.59 до 1.634 мН. Экспериментальный удельный импульс тяги составил при расходе 1.2 мг/с от 574 до 613 м/с, при расходе 1.7 мг/с от 549 до 588 м/с и при расходе 2.6 мг/с от 612 до 623 м/с. По замеренным значениям давления в камере прототипа электроракетного двигателя были получены величины идеальной скорости истечения рабочего тела из сопла, которые составили при расходе 1.2 мг/с–661 м/с, при расходе 1.7 мг/с–667 м/с и при расходе 2.6 мг/с–674 м/с. Полученные значения удельного импульса тяги не противоречат ранее полученным экспериментальным данным по реактивным двигателям на холодном газе с использованием в качестве рабочего тела азота, а также не превышают идеальную расчетную скорость истечения.

Ключевые слова: малый космический аппарат, электроракетный двигатель, азот, стенд измерения тяги, мишень

Abstract. A traction measurement stand based on the aerodynamic method has been developed. To test the stand, a prototype electric rocket engine was used as a cold gas engine. The working medium was nitrogen gas. At a flow rate of 1.2 mg/s, the thrust value was from 0.674 to 0.736 mN, at a flow rate of 1.7 mg/s, the thrust value was 0.934-1 mN and at a flow rate of 2.6 mg/s, the thrust value was from 1.59 to 1.634 mN. The experimental specific thrust impulse was at a flow rate of 1.2 mg/s from 574 to 613 m/s, at a flow rate of 1.7 mg/s from 549 to 588 m/s and at a flow rate of 2.6 mg/s from 612 to 623 m/s. According to the measured pressure values in the chamber of the prototype electric rocket engine, the values of the ideal flow rate of the working fluid from the nozzle were obtained, which amounted to 661 m/s at a flow rate of 1.2 mg/s, 667 m/s at a flow rate of 1.7 mg/s and 674 m/s at a flow rate of 2.6 mg/s. The obtained values of the specific thrust impulse do not contradict the previously obtained experimental data on cold gas jet engines using nitrogen as the working fluid, and also do not exceed the ideal design flow rate.

Keywords: small spacecraft, electric thruster, nitrogen, thrust measurement stand, target

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач наземной экспериментальной отработки двигательных установок (ДУ) малых космических аппаратов (МКА) является определение величины силы тяги, которая создается электроракетными двига-

телями (ЭД). Величина силы тяги ЭД определяет время реализации орбитального маневра и возмущающие моменты на МКА. Возмущающие моменты от ДУ обусловлены погрешностью установки единичного ЭД, наличием конструктивного плеча при установке двух и более ЭД и д. р., и в соответствии с логикой работы ДУ в составе МКА определяют время разового включения ЭД [1-3]. Таким образом, определение величины силы тяги ЭД ДУ для МКА является актуальной задачей.

В настоящее время существует два подхода определения величины силы тяги: весовой метод (ЭД установлен подвижно) и аэродинамический метод (ЭД установлен неподвижно) [4-6]. В источнике [7] аэродинамический метод именуется как метод измерения тяги с помощью мишени и является разновидностью маятникового метода.

Стенды измерения тяги на основе весового метода представлены в виде подвесного, перевернутого и торсионного маятника. На одном из концов маятника расположен ЭД, а на другом противовес. Стенды измерения тяги на основе подвесного маятника являются наиболее простыми (в сравнении со стендами на основе перевернутого или торсионного маятника), имеют высокие значения стабильности, но для обеспечения высокой чувствительности необходимо увеличивать длину маятника. Стенды на основе перевернутого маятника, менее стабильны, но обладают большей чувствительностью (в сравнении с подвесным маятником). Стенды на основе торсионного маятника обладают наибольшей чувствительностью, но из-за горизонтального расположения торсионной конструкции он будет не практичен в вакуумных камерах с малым объемом. Существующие стенды измерения тяги на основе весового метода при их достоинствах также имеют недостатки, связанные с высокими габаритно-массовыми характеристиками и требуют балансировки и калибровки [5, 7, 8].

Стенды измерения тяги на основе аэродинамического метода (метод измерения тяги с помощью мишени) основаны на определении силы давления струи на мишень, в результате чего происходит перемещение или деформация мишени [4, 6, 7].

По сравнению с маятниковыми конструкциями стенды на основе аэродинамического метода обладают следующими преимуществами: низкие габаритно-массовые характеристики, инвариантность конструкции ЭД, что позволяет применять их в лабораторных условиях при отработке различных конструктивных исполнениях ЭД.

Согласно работам [6, 9], стенды на основе аэродинамического метода совпадают по точности с маятниковыми конструкциями.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является разработка, проверка работоспособности и исследование функционирования стенда измерения тяги на основе аэродинамического метода.

III. ТЕОРИЯ

При проектировании стенда измерения тяги на основе аэродинамического метода необходимо выбрать размер мишени, так как слишком маленькая мишень пропустит часть струи и не сможет измерить полную величину силы тяги. Для проведения экспериментальных исследований была использована мишень стенда из АБС-пластика прямоугольного сечения с размерами 0,085x0,08 м и массой 0,0068 кг.

В качестве измерительного элемента в стенде измерения тяги использовался датчик VL53L0X, который функционирует по времяпролетной технологии (TOF). Датчик производит замер времени, необходимого световому импульсу для прохождения от датчика к мишени стенда измерения тяги и обратно. Датчик измеряет расстояние от 0.03 до 2 м. Излучатель датчика имеет длину волны 940 нм. Функционирование датчика возможно в быстром режиме с точностью определения расстояния $\pm 5\%$ и медленном режиме с точностью $\pm 3\%$, разрешение датчика ± 0.001 м [10, 11]. В общем виде датчик состоит из излучателя и сканера приближения светового импульса. Угол конуса излучателя составляет 35° , а угол конуса сканера составляет 25° . Для экспериментальных работ по определению величины силы тяги использовался медленный режим измерения тяги. Вычисление расстояния от датчика до мишени стенда производится по выражению:

$$L = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t,$$

где c – скорость света; t – время прохождения светового импульса от датчика к мишени стенда и обратно.

Для создания стенда было выбрано расстояние 0.047 м. Это обусловлено тем, что световое пятно излучателя датчика VL53L0X не выходит за пределы мишени.

Ось стенда представляет собой капиллярную трубку из нержавеющей стали, через которую пропущена леска диаметром 0.00015 м. Леска закреплена на кронштейне клеевым соединением без провисания мишени.

На рис. 1 приведено изображение стенда измерения тяги на основе аэродинамического метода.

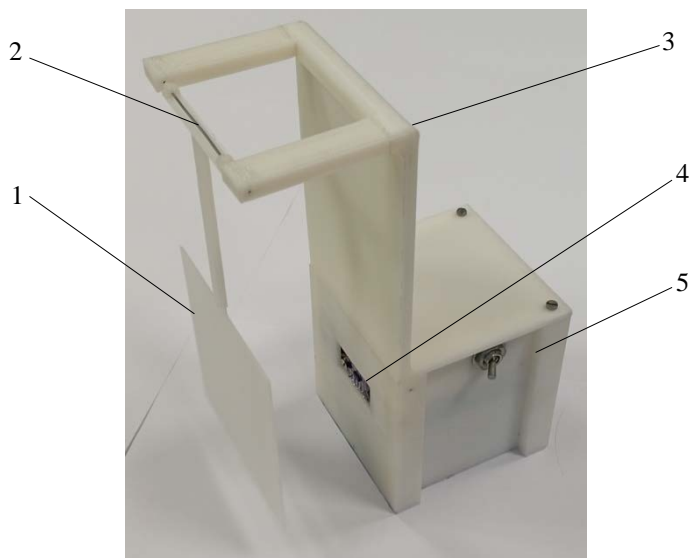


Рис. 1. Изображение стенда измерения тяги:

1 – мишень; 2 – ось; 3 – кронштейн; 4 – датчик; 5 – корпус

На рис. 2 приведена принципиальная схема по определению тяги ЭД. Без подачи рабочего тела мишень занимает вертикальное положение, а датчик вычисляет расстояние L до мишени. После подачи рабочего тела ЭД на мишень оказывает воздействие сила давления струи, под действием которой мишень отклоняется от своего первоначального положения на угол α , а датчик вычисляет новое расстояние до мишени.

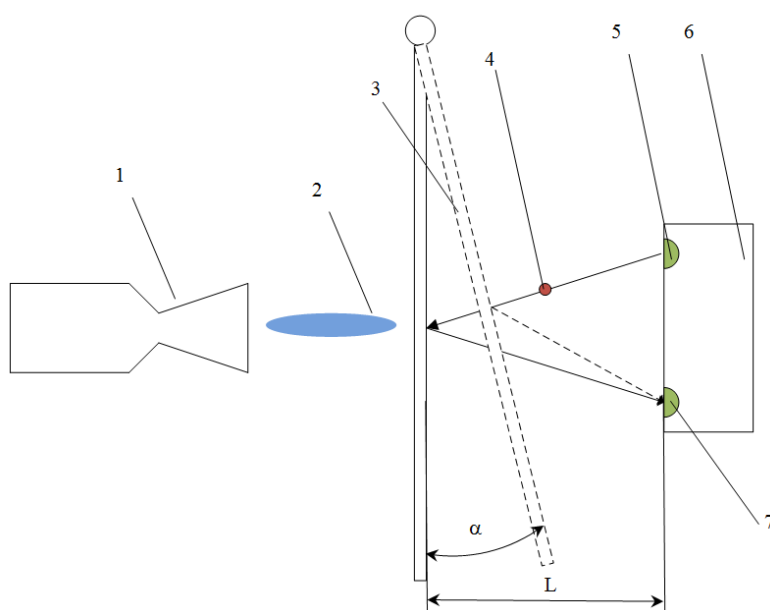


Рис. 2. Принципиальная схема по определению тяги ЭД:

1 – ЭД; 2 – газовая струя ЭД; 3 – мишень; 4 – световой импульс; 5 – излучатель;
6 – корпус датчика VL53L0X; 7 – сканер приближения светового импульса

Сила давления реактивной струи действующей на мишень определяется по выражению:

$$P = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \frac{L_{\text{цт}}}{L_{\text{цд}}},$$

где P – сила давления реактивной струи; m – масса мишени; α – угол отклонения мишени; $L_{\text{цт}}$ – расстояние от оси вращения мишень до центра тяжести мишени; $L_{\text{цд}}$ – расстояние от оси вращения мишени до точки приложения силы давления струи.

Цвет мишени был выбран белый, так как темные цвета имеют малую светоотражательную способность. Данное обстоятельство сильно сказывается на точности измерения расстояния. Например, при действительном расстоянии 0.149 м мишень черного цвета определялась датчиком на расстоянии 0.131 м.

Для уменьшения погрешности измеряемого расстояния от датчика до мишени необходимо, чтобы световой конус излучателя проецировался на мишень нормально. Для обеспечения данного условия производилось выравнивание положения датчика относительно мишени по лазерному уровню. Расстояние между мишенью и срезом сопла составляло 0.025 м.

Определение текущего значения тяги ЭД реализовано с помощью программы «MThrust», написанной на языке Matlab (рис. 3). Передача данных на ПК осуществляется по Bluetooth. В программе имеются окна для задания массы мишени, расстояния от датчика VL53L0X до мишени, расстояния от оси мишени до центра её тяжести, расстояния от оси мишени до точки приложения аэродинамической силы. Датчик VL53L0X замеряет текущее расстояние от датчика VL53L0X до мишени и определяет разницу между текущим и заданным значением расстояния до мишени. По полученной разнице определяется угол α и величина силы давления реактивной струи. Обработка значения силы давления реактивной струи происходило с помощью нахождения среднего арифметического значения.

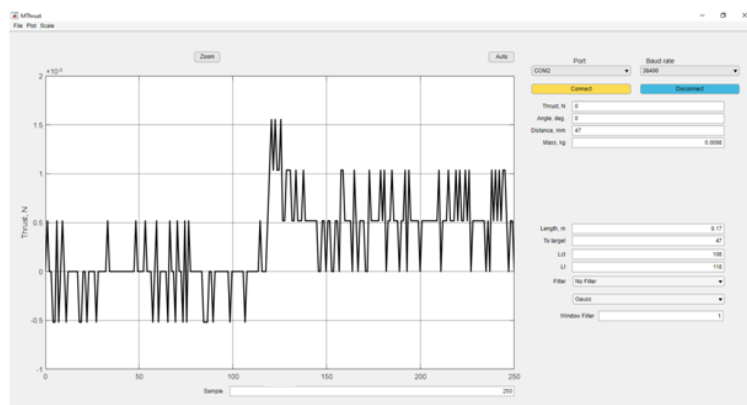


Рис. 3. Окно программы «MThrust»

В качестве ЭД использовался прототип электродугового двигателя с диаметром критического сечения сопла 0.0008 м и диаметром среза сопла 0.004 м (рис. 4). В качестве рабочего тела использовался азот.

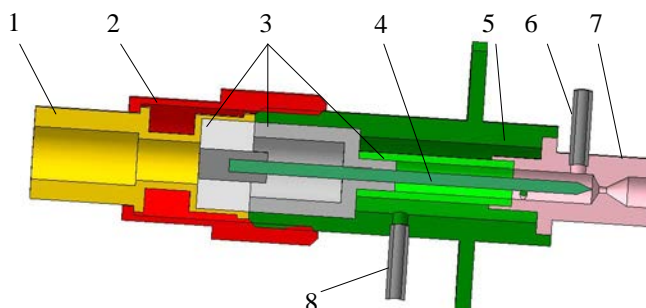


Рис. 4. 3D модель ЭД:

1 – втулка; 2 – гайка; 3 – электроизоляционные втулки; 4 – электрод; 5 – корпус; 6 – трубопровод для замера давления рабочего тела в камере ЭД; 7 – сопло; 8 – трубопровод подачи рабочего тела в ЭД

К трубке 6 был подсоединен тягонапормер ТНМП-52 с диапазоном измерений ± 20 кПа.

Расход рабочего тела определялся с помощью уравнения состояния с использованием замеренных значений температуры и давления в емкости известного объема [12].

На рис. 5 приведено изображение размещения стенда измерения тяги в вакуумной камере. При экспериментальных исследованиях давление в вакуумной камере при подаче рабочего тела составляло от 19 до 25 Па.

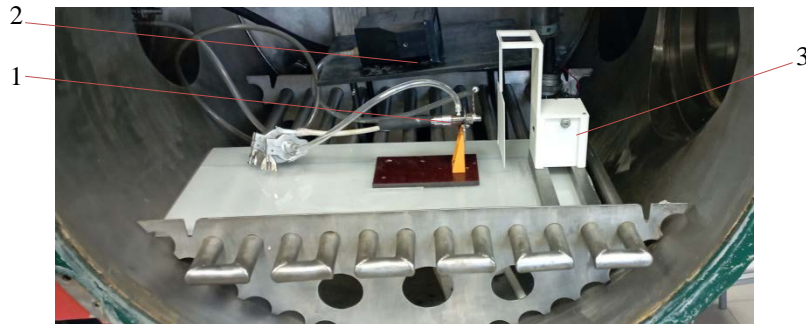


Рис. 5. Изображение размещения стенда измерения тяги:
1 – ЭД; 2 – тягонапормер; 3 – стенд измерения тяги

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 6 представлено изображение изменения величины силы давления реактивной струи, воздействующей на мишень стенда измерения тяги. При отсутствии подачи газа показания стенда измерения тяги находятся в диапазоне ± 0.00037 Н, что обусловлено разрешением оптического датчика, при этом среднее арифметическое значение составило $49 \mu\text{Н}$. При подаче рабочего тела происходит отклонение мишени, а также изменение силы давления реактивной струи (среднее арифметическое значение составило 0.929 мН).

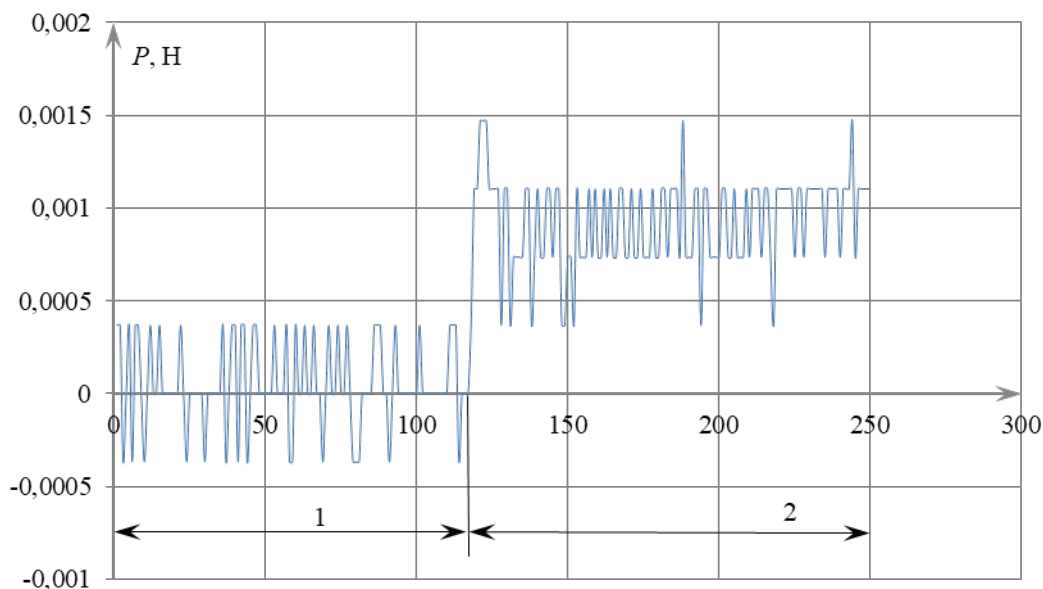


Рис. 6. Измерения силы давления реактивной струи:
1 – без подачи рабочего тела; 2 – с подачей рабочего тела

Было произведено пять измерений силы давления реактивной струи на мишень при одних и тех же настройках регулятора расхода газа (табл. 1). Максимальное расхождение результатов наблюдается при малом расходе рабочего тела и составляет 8.5%.

ТАБЛИЦА 1
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

№	P , мН	m , мг/с	p_k , кПа	$l_{уд}$, м/с	№	P , мН	m , мг/с	p_k , кПа	$l_{уд}$, м/с	№	P , мН	m , мг/с	p_k , кПа	$l_{уд}$, м/с
1	0.689	1.2	2	574	1	0.999	1.7	2.5	588	1	1.59	2.6	3.6	612
2	0.701			584	2	0.934			549	2	1.61			619
3	0.736			613	3	0.949			558	3	1.618			622
4	0.674			562	4	0.968			569	4	1.634			628
5	0.704			587	5	1			588	5	1.62			623

По данным таблицы 1 построена диаграмма замеренных величин силы реактивной струи в зависимости от массового расхода рабочего тела.

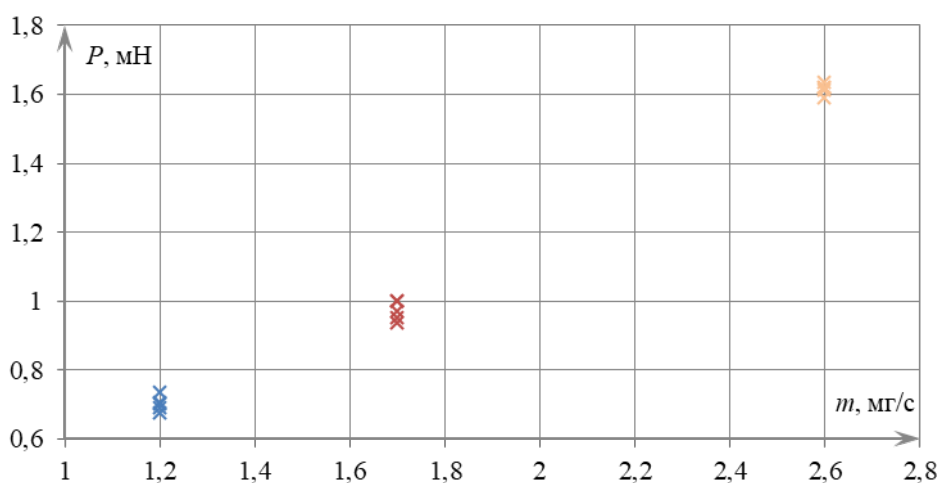


Рис. 7. Диаграмма замеренных величин силы тяги и массового расхода рабочего тела

По замеренным величинам давления в камере ЭД при условии, что известно давление в вакуумной камере, по выражению Сен-Венана-Вентцеля были определены максимальные значения скорости истечения газа из полости ЭД.

$$V = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_k}{\rho_k} \cdot \left(1 - \left(\frac{p}{p_k}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)},$$

где k – показатель адиабаты; p_k – давление рабочего тела в камере ЭД; ρ_k – плотность рабочего тела в камере ЭД; p – давление в вакуумной камере.

По выражению Сен-Венана-Вентцеля максимальная скорость истечения составила:

- при $m = 1.2$ мг/с $V=661$ м/с;
- при $m = 1.7$ мг/с $V=667$ м/с;
- при $m = 2.6$ мг/с $V=674$ м/с.

По замеренным значениям величин силы реактивной струи и массового расхода рабочего тела был определен удельный импульс тяги, который составил 562 до 628 м/с. Согласно работам [13, 14], максимальное значение удельного импульса тяги ЭД на азоте составляет ≈ 750 м/с.

III. Выводы

Был разработан лабораторный стенд измерения реактивной тяги, инвариантный типу и форме двигателя. Стенд также позволяет менять габаритно-массовые характеристики мишени для повышения чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследования электротермических микродвигателей корректирующих двигательных установок маневрирующих малых космических аппаратов : моногр. / В. Н. Блинов, В. В. Шалай, С. И. Зубарев, В. В. Косицын, В. И. Рубан, Е. В. Ходорева. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. 263 с. ISBN 978-5-8149-1710-2.
2. Блинов В. Н., Ячменев П. С. Методика исследования проектных параметров малого космического аппарата с электродуговой корректирующей двигательной установкой // *Космонавтика и ракетостроение*. 2020. № 1(112). С. 121–133.
3. Блинов В. Н., Косицын В. В., Лукьянчик А. И. К вопросу измерения тяги электротермических микродвигателей // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова, Омск, 20–21 окт. 2020 г. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 5–8.*
4. Определение тяги ионного двигателя резонансным аэродинамическим методом (РАМ-метод) / И. С. Вавилов, П. С. Ячменев, В. В. Федянин, П. В. Степень, А. И. Лукьянчик, К. И. Жариков // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2021. Т. 9, № 2. С. 70–77. DOI: 10.25206/2310-9793-9-2-70-77.
5. Polzin K. A., Markusic T. E., Stanojev B. J. [et al.]. Thrust stand for electric propulsion performance evaluation // *Review of Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77, no.10. P. 105108. <https://doi.org/10.1063/1.2357315>.
6. Longmier B. W., Reid, B. M., Gallimore, A. D. [et al.]. Validating a Plasma Momentum Flux Sensor to an Inverted Pendulum Thrust Stand // *Journal of Propulsion and Power*. 2009. Vol. 25, no. 3. P. 746–752. <https://doi.org/10.2514/1.35706>.
7. Yoshikawa T., Tsukizaki R., Kuninaka H. Calibration methods for the simultaneous measurement of the impulse, mass loss, and average thrust of a pulsed plasma thruster // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89, no. 9. P. 095103. <https://doi.org/10.1063/1.5027047>.
8. Polk J. E., Pancotti A., Haag T [et. al.]. Recommended practice for thrust measurement in electric propulsion testing // *Journal of Propulsion and Power*. 2017. Vol. 33, no. 3. P. 539–555. <https://doi.org/10.2514/1.B35564>.
9. Wang B., Yang W., Tang H. [et al.] Target thrust measurement for applied-field magnetoplasmadynamic thruster // *Measurement Science and Technology*. 2018. Vol. 29, no. 7. P. 075302. DOI 10.1088/1361-6501/aac079.
- 10.:World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor. Application Programming Interface. URL: https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-Time_of_Flight_Distance_Sensor-VL53L0X-/res/software-flow.pdf (date accessed: 12.10.2023).
11. Nicolau Vidal R. Omnidirectional scanner using a time of flight sensor : bachelor thesis / Universitat Politècnica de Catalunya. 2018. URL: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/117780> (date accessed: 12.10.2023).
12. Вавилов И. С., Ющенко В. А., Жариков К. И., Ячменев П. С. Определение массового расхода газа низкого давления // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли : материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова, Омск, 20–21 окт. 2020 г. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 10–14.*
13. Kindracki J., Tur K., Paszkiewicz P. [et al.]. Experimental research on low-cost cold gas propulsion for a space robot platform // *Aerospace science and technology*. 2017. Vol. 62. P. 148–157. DOI: [org/10.1016/j.ast.2016.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.001). <https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.001>.
14. Martínez J. M., Lafleur T. On the selection of propellants for cold/warm gas propulsion systems // *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 212. P. 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.031>.

**ИМИТАЦИОННЫЕ (МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ), СЕМИОТИЧЕСКИЕ
И СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ**

УДК 004.83

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-58-66

**ОБ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АЛКОГОЛЬНОЙ ИНТОКСИКАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ
ГОЛОСА В СИСТЕМАХ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ**

**THE STUDY OF AN IMPACT OF ALCOHOL INTOXICATION
ON VOICE PARAMETERS IN BIOMETRIC AUTHENTICATION SYSTEMS**

Д. П. Иниватов, А. Е. Сулавко, А. Е. Самотуга

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. P. Inivatov, A. E. Sulavko, A. E. Samotuga

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Изменение голосовых характеристик человека под воздействием алкогольного опьянения отрицательно влияет на эффективность процедуры распознавания личности по голосу. Поэтому определение уровня алкоголя в крови дистанционно позволяет не только выявить факт нахождения субъекта в измененном психофизиологическом состоянии, но и дает возможность скорректировать настройки алгоритма принятия решений для повышения надежности голосовой аутентификации. Целью работы является анализ существующих научных работ и результатов в области оценки уровня алкогольной интоксикации по голосу, анализ наборов данных, позволяющих обучить модели искусственного интеллекта выявлять факт опьянения, а также анализ факторов влияния психофизиологического состояния диктора на параметры его речи. Исследование включает сравнительный анализ научных работ из таких баз как Scopus, Web of Science, ВАК и учитывает такие факторы, как пол, возраст, стадии алкогольного опьянения, качество записи и уровень окружающего шума. По итогу анализа научных публикаций, исследование определяет метод случайного леса как один из наиболее эффективных методов машинного обучения, демонстрируя точность 95.3% по проприетарным наборам речевых данных и 80% для широко используемого алкогольного языкового корпуса.

Ключевые слова: влияние опьянения на голос, идентификация диктора, биометрия, голосовая аналитика, набор речевых записей, машинное обучение, искажение голоса, алкогольное опьянение, дистанционная оценка психофизиологического состояния.

Abstract. Changing the voice characteristics of a person under the influence of alcohol intoxication affects the effectiveness of the identification procedure. From which it follows that the determination of the level of alcohol in the blood remotely is important for ensuring information security in computer systems. The purpose of the present paper is to analyze the existing voice authentication methods and approaches to improve accuracy, analyze existing data sets, and evaluate the influence of the psychophysiological state of the speaker on the parameters of his speech. The focus of this study is on exploring different approaches to recognizing alcohol intoxication and evaluating their effectiveness. The study includes a comparative analysis of these methods, emphasizing the importance of using a comprehensive and representative data set that takes into account factors such as gender, age, stage of intoxication, recording quality, and ambient noise levels. Based on the analysis of scientific publications, the study identifies the random forest method as one of the most effective machine learning meth-

ods, demonstrating an accuracy of 95.3% for all speech datasets and 80% for the widely used Alcohol Language Corpus.

Keywords: authentication, voice analytics, set of recordings, machine learning, voice distortion, alcohol intoxication.

I. ВВЕДЕНИЕ

Защита конфиденциальных данных является одной из наиболее актуальных проблем в современном мире. Важность данной темы подтверждается статистикой компьютерных преступлений, в которых несанкционированный доступ к конфиденциальным данным является одной из основных причин утечки информации, также данными о росте ущерба от киберпреступлений [1]. Стандартным решением для обеспечения безопасности информации является парольная аутентификация, однако данный метод не всегда гарантирует достаточный уровень защиты, так как нарушитель может получить несанкционированный доступ к паролю и использовать его для своих целей. Для устранения данной угрозы всё чаще используются более надежные методы аутентификации, такие как системы на основе биометрических данных. Сегодня стремительно развивается рынок голосовой биометрии. Аутентификация по голосу является достаточно простым и эффективным методом, не требующим дополнительного оборудования. Поэтому ожидается дальнейший рост объемов этого рынка в ближайшие годы [2]. Недостатком систем идентификации по речевым паролям является изменчивость голоса вследствие таких факторов, как простудные заболевания и алкогольная интоксикация.

Своевременное определение уровня алкогольного опьянения само по себе является актуальной задачей, так как это позволяет ограничить доступ неадекватного человека к оборудованию, информации и объектам управления. Голосовой «алкотестер» имеет явные преимущества, прежде всего, это бесконтактное, скрытое от пользователя и дистанционное определение состояния. Кроме того, данная проблема актуальна с точки зрения информационной безопасности, так как идентификация состояния опьянения позволяет скорректировать алгоритм распознавания личности диктора и снизить вероятность ошибочных решений.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Цель настоящего исследования – провести систематический обзор научной литературы в области определения алкогольной интоксикации по голосу, оценить текущий уровень достигнутых результатов, идентифицировать факторы влияния опьянения диктора на параметры его речи и очертить круг актуальных проблем для повышения надежности оценки опьянения по голосу.

III. ТЕОРИЯ

Установлено, что алкоголь существенно влияет на различные параметры голоса [3, 4, 5]. Данное влияние отражается на уровне содержания произносимой речи, её акустической формы и просодических особенностей [6]. Основные факторы, оказывающие влияние – это пол, возраст, перенесённые болезни, индивидуальные особенности организма, строение голосового тракта, а также текущее психоэмоциональное состояние [7]. В свою очередь, на ПФС способны воздействовать такие обстоятельства как сонливость, эмоциональная напряжённость, употребление алкогольных напитков. Алкогольное опьянение может оказывать заметный эффект на когнитивную и сенсомоторную функции, что существенно отражается и на произносимой речи:

- по мере увеличения концентрации алкоголя в крови происходит замедление мыслительных процессов, что снижает темп речи;
- наличие нехарактерных для человека пауз;
- возможно проявление хриплости, изменение высоты голоса;
- при низких концентрациях алкоголя проявляется увеличение силы голоса, но при дальнейшем употреблении напитков сила голоса уменьшается;
- отрывистая речь с наличием запинок, самоповторов и исправлений;
- более длительное произношение ударных звуков в словах;
- обеднение синтаксических конструкций, использование преимущественно простых предложений [8].

Появление таких признаков алкогольного опьянения как изменение силы и высоты голоса, появления хриплости представлено на рис. 1. В левой части изображения располагается осциллограмма и спектрограмма голосового образа диктора в нормальном состоянии, в правой части – под воздействием спиртных напитков. Уменьшение силы голоса хорошо заметно при обзоре осциллограмм, а увеличение высоты тона можно проследить исходя из анализа спектральной плотности мощности сигнала внизу изображения.

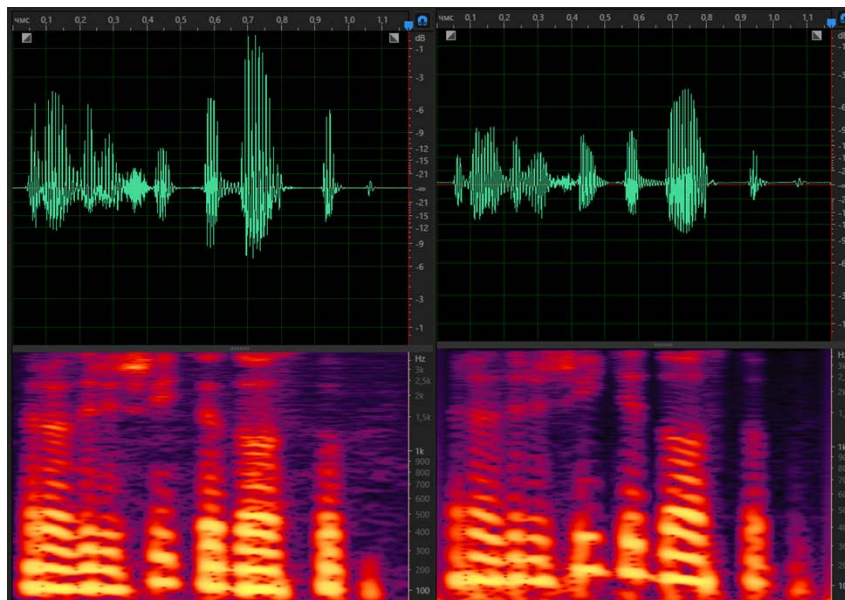


Рис. 1. Иллюстрация изменения голосового образа и его спектрограммы под воздействием алкоголя

Авторы работы [9] доказали в рамках своего эксперимента, что различные фонемы могут оказывать разное влияние на выявление состояния алкогольного опьянения. В ходе изучения пяти отдельно произносимых гласных «а», «е», «і», «о», «и» было установлено, что наиболее эффективными в рамках указанной задачи являются «о» и «е», при использовании которых точность определения состояния составляет 77% и 76.6%. Наименьшее же искажение было зарегистрировано у таких звуков как «а» и «и» – 69.3% и 70.9%. Наличие подобных свойств у некоторых фонем позволяет создавать на их основе специальные тексты, используемые в качестве тестовых при определении алкогольной интоксикации по голосу. Данные фонемы богаты признаками, которые наряду с изменением тона голоса, темпа речи, проявлением хриплости, а также искажением силы голоса и появлением неравномерно и необоснованно расставленных пауз могут быть использованы в системах распознавания опьянения.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЗОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

3. Наборы данных речевых сигналов, произнесенных в состоянии алкогольного опьянения

Проект ALC (алкогольный языковой корпус) посвящён созданию базы голосовых данных дикторов для исследования состояния алкогольного опьянения. База содержит аудиозаписи дикторов обоих полов в равном соотношении в трезвом состоянии и состоянии алкогольного опьянения в возрасте от 21 до 75 лет. Число людей, принявших участие в проекте, достигло 162. Каждым участником была осуществлена запись нескольких речевых фрагментов: скороговорок, спонтанной речи, различных адресов и цифр. Строки цифр представляют из себя номера телефонов, банковских карт и номерных знаков. Число записей в трезвом состоянии и состоянии опьянения составило 60 и 30, соответственно. Полученные в результате аудиофайлы имеют длительность от 0.5 до 60 секунд, частоту дискретизации 44.1 кГц. Для обеспечения одинаковых условий проведения эксперимента все участники находились в автомобиле с выключенным двигателем. Каждый спикер сначала произносил требуемые фразы в трезвом состоянии, затем самостоятельно выбирал концентрацию алкоголя ВАС в рамках от 0.3‰ до 1.75‰, выжидал 20 минут и произносил тот же набор фраз. Концентрация алкоголя измерялась путём анализа крови и с помощью ручного алкотестера ВАС для дыхания. Через 2 недели с каждым диктором была проведена повторная серия опытов, в ходе которой каждый диктор ещё раз произносил требуемый набор фраз, будучи трезвым [10, 11].

В работе [12] автор использовал собственную коллекцию аудиофайлов на чешском языке, содержащую информацию о речевых характеристиках носителей данного языка и состоящую из записей 25 человек (13 мужчин и 12 женщин), в возрасте от 18 до 50 лет. Тексты аудиофайлов содержат слова и словосочетания, подобранные таким образом, чтобы в их составе присутствовали звуки «р» и «л» для того, чтобы они были относительно труднопроизносимы. Участники произносили отобранные фразы по 5 раз до и после приёма алкоголя. Состоянием алкогольного опьянения в рамках сбора данного архива считалось достижение спикером 0.5 ‰ ВАС. Частота дискретизации аудиофайлов в базе составляет 22.05 кГц.

Авторы публикации [9] для своего исследования создали архив записей 12 дикторов мужского пола в возрасте от 20 до 28 лет, которые находились как в трезвом состоянии, так и в состоянии алкогольного опьянения. Испытуемые являлись носителями чешского языка. В ходе работы по сбору базы организаторы собрали информацию о факторах, способных внести воздействие на голосовые параметры: состояние переутомления, стресс, нестабильные психологические состояния, а также употребление наркотических веществ. Каждый диктор принимал участие в двух сеансах записи. Первый сеанс предполагал трезвое состояние испытуемого, второй – с предварительным употреблением алкогольных напитков на двух уровнях опьянения: 0.5-1.0‰ и 1.0-1.5‰. Значения ВАС были измерены с помощью ручного алкотестера перед проведением сеанса записи. Для процесса работы с дикторами был оборудован тихий офис, сохранение файлов регистрировалось в формате pcm 22кГц, 16 бит. Записи в данном архиве включают в себя нижеприведённые подмножества речи.

- 1) Длительное произнесение пяти отдельных гласных /a/, /e/, /i/, /o/, /u/.
- 2) Десять отдельных слов, состоящих из пяти гласных и выбранных согласных. /m/, /n/, /l/, /r/.
- 3) Чтение текста из книги.

Осуществление записи подмножеств 1 и 2 было проведено трижды для каждого участника.

В рамках предыдущего исследования [3] нами сформирован архив голосовых записей. Возраст дикторов, принявших участие в создании базы, варьировался от 18 до 35 лет, а число участников достигло 86 при условии равного соотношения между полами. Голосовые файлы спикеров имеют частоту дискретизации 8 кГц и глубину кодирования 16 бит. В архиве было определено 5 состояний, при которых осуществлялась запись речи испытуемых.

- 1) Нормальное.
- 2) Первая стадия опьянения. Концентрация алкоголя в крови была в пределах 0.2% - 0.3%.
- 3) Вторая стадия. Концентрация алкоголя в пределах 0.3% – 0.5%.
- 4) Третья стадия. Концентрация алкоголя в пределах 0.5% – 1.0%.
- 5) Состояние сонливости.

К формированию базы голосовых образов привлечены добровольцы без неврологических или речевых нарушений. Для более детального сравнения см. табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗ ДАННЫХ, СОДЕРЖАЩИХ АЛКОГОЛИЗИРОВАННУЮ РЕЧЬ

Речевой набор	Объём	Особенности, концентрация
ALC [10, 11]	162 участника, 12360 записей	Длительность 0.5–60 секунд, возраст 21–75 лет, от 0.3‰ до 1.75‰
Проприетарный [12]	25 участников, 250 записей	>= 0.5 ‰
Проприетарный [9]	12 участников	20–28 лет, 2 уровня концентрации: 0.5–1.0‰ и 1.0–1.5‰
Проприетарный [3]	86 участников, 13000 записей	18–35 лет, 3 уровня концентрации
Проприетарный [24]	84 участника, 509 записей	Участники только мужчины

2. Достигнутые результаты по распознаванию алкогольной интоксикации

Машинное обучение является эффективным инструментом в задачах распознавания диктора по речи. Алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать различные типы данных, такие как тембр голоса, темп речи, наличие пауз и другие характеристики. Их использование позволяет определять закономерности в этих данных, выделять сходные характеристики и классифицировать их по соответствующим категориям, что позволяет эффективно решать задачи идентификации и аутентификации по голосу [13].

Для классификации голосовых данных речевой сигнал может быть подвергнут процедуре предобработки, извлечению наиболее значимых признаков и уже затем подан на обработку методами машинного обучения [14]. Модели машинного обучения настраиваются на этих данных. Задача определения опьянения может быть сведена к классификации образов (бинарной, где есть два класса: «трезвый» и «пьяный», или много классов, каждый из которых связан с определенной стадией опьянения) либо регрессии (предсказанию, какой уровень интоксикации соответствует поступившим на вход модели данным).

В распознавании речи широкое применение получили такие алгоритмы как: метод опорных векторов [15], скрытые модели Маркова и модели Гауссовой смеси. Скрытые марковские модели нашли применение во многих областях, связанных с обработкой сигналов и в частности с обработкой речи. Они достаточно успешно были применены к таким задачам, как опознавание частей речи в голосовой последовательности слов, фрагментация фраз, извлечение текстовой информации из речи, а также обнаружение состояния алкогольного опьянения [16]. Метод опорных векторов также получил широкое распространение, его научились эффективно применять для обнаружения интоксикации в голосовых образах дикторов [17]. Модель Гауссовой смеси применяется в задачах распознавания речи, определения эмоций, обнаружения алкогольного опьянения [17, 18].

Модели глубокого обучения продемонстрировали высокую эффективность во многих задачах, связанных с анализом и обработкой речевого сигнала [19, 20]. Глубокое обучение по своей сути является расширенным вариантом машинного обучения, использующим в своей архитектуре многослойные нейронные сети. Модели глубокого обучения могут не только осуществлять классификацию, но и извлекать отдельные признаки объектов. Основные алгоритмы голосовой аналитики включают использование свёрточных и рекуррентных нейронных сетей.

Для оценки эффективности биометрических систем используются различные метрики. Некоторые показатели могут быть критически важными для конкретной задачи голосовой аналитики. В табл. 2 представлены наиболее распространённые из них. Аналогичные метрики могут использоваться для оценки эффективности методов распознавания состояния алкогольного опьянения.

ТАБЛИЦА 2
ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Метрика	Формула	Особенность
Ассурасу (точность)	$\frac{TP + TN}{TP + FP}$	Оценивает общую производительность модели без учета баланса классов.
UAR (невзвешенный средний отзыв)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{TP_i}{TP_i + FN_i}$	Не учитывает дисбаланс между классами. Имеет склонность к предвзятости, если классы имеют различное число примеров.
Recall (полнота)	$\frac{TP}{TP + FN}$	Фокусируется на правильном распознавании положительных примеров.
Precision (точность)	$\frac{TP}{TP + FP}$	Фокусируется на правильном распознавании положительных и отрицательных примеров.
F-мера	$\frac{2 * Precision * Recall}{Precision + Recall}$	Используется в задачах бинарной и многоклассовой классификации для оценки сбалансированности между Precision и Recall.
FRR (коэффициент ложного отказа)	$\frac{FN}{FN + TP}$	Снижение одной метрики приводит к увеличению другой. Оптимальное значение FAR и FRR зависит от конкретной задачи. Являются основными метриками в биометрии.
FAR (коэффициент ложного пропуска)	$\frac{FP}{FP + TN}$	
EER (равный уровень ошибок)	EER = FAR = FRR	Определяется путем выставления порогового значения, при котором FAR и FRR равны.

- TP (True positive): верно идентифицированные положительные решения.
- TN (True Negative): верно определенные отрицательные решения.
- FP (False Positive): ложно положительные решения.
- FN (False Negative): ложно отрицательные решения.

Авторы докладов конференции Interspeech представили множество работ по обнаружению алкогольного опьянения на основе речевого сигнала диктора. Продемонстрированные архитектуры чаще всего включают в себя скрытые Марковские модели или модели Гауссовой смеси. Вслед за анализом речи при помощи указанных методов происходит классификация ПФС диктора с применением машин опорных векторов.

Для проведения одного из исследований 2019 года была использована база ALC. Лучший результат в 59.2% UAR был достигнут с применением модели ResNeXt50. Подход включал в себя использование дополнительных методов увеличения входных данных: масштабирования и горизонтального отражения. ResNeXt50 – архитектура сверточной нейронной сети (CNN), предназначенная для обработки звуковых сигналов и определения, какому классу звука они принадлежат. В указанном исследовании в качестве входных данных использовались мел-спектрограммы (частотная шкала заменяется на шкалу мел, основанную на статистической обработке большого числа данных о субъективном восприятии высоты звуковых тонов).

Один из важных моментов, которые следует выделить – это различие между зависимыми и независимыми от диктора систем. Зависимые системы требуют обучения на голосе конкретного человека, а затем анализируют только его речь. В то время как независимые системы обучаются на данных от разных людей и успешно работают с голосами, которые не участвовали в процессе обучения.

Таким образом, в работе [9] был применён диктор-зависимый подход к распознаванию алкогольного опьянения, в основу которого положен анализ сигналов голосовых импульсов при помощи метода адаптивной обратной фильтрации и математической модели Лильенкранца-Фанта. Данное исследование примечательно, в первую очередь, тем, что в качестве входных данных используются не просто предобработанные записи речи, а отдельно взятые гласные звуки. Указанный метод позволил сделать вывод об эффективности тех или иных фонем. Учёные оценили точность обнаружения состояния опьянения по отдельным гласным звукам /a/, /e/, /i/, /o/, /u/ от 69.3% до 77.0%.

В табл. 3 приведены результаты исследований в области определения опьянения.

ТАБЛИЦА 3
СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ АЛКОГОЛЬНОЙ ИНТОКСИКАЦИИ

Описание архитектуры	Точность, %	UAR, %	База данных
Система супервекторов модели Гауссовой смеси, объединенная с линейной машиной опорных векторов для классификации и дополнительными методами нормализации [17]		70.54	ALC
Метод адаптивной обратной фильтрации и математическая модель Лильенкранца-Фанта [9]	69.3 – 77.0		Собственная
Модели Гауссовой смеси + линейная машина опорных векторов [18]	68.6	68.5	ALC
Двухнаправленная рекуррентная нейронная сеть со стробируемыми рекуррентными единицами [22]	75.9	69.2	ALC
Разработанная авторами базовая система, которая состоит из классификатора на основе машин опорных векторов с линейным ядром, последовательной минимальной оптимизации для обучения с использованием набора инструментов WEKA [23]		64.5	ALC
Архитектура ResNeXt50, которая использует объединение и полносвязные слои. Входные данные – спектрограммы Мел		59.2	ALC
Машина опорных векторов с открытым исходным кодом из набора инструментов WEKA. В качестве алгоритма обучения используется последовательная минимальная оптимизация [24]		66.5	ALC
Метод случайного леса, настроенный на 10 деревьев и воспроизводимый режим обучения [25]	95.3		Собственная
Метод опорных векторов и метод случайного леса [11]	80		ALC
Алгоритм глубокого обучения на основе аудио для выявления алкогольного опьянения (ADLAIA) [26]		75.7	ALC
ResNet-18 + глобальный средний уровень пула + z-нормализация [27]		67.1	ALC

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно рис. 2 можно сделать вывод о заметном научном толчке, начиная с 2011 года в области распознавания опьянения по голосу, которому послужила публикация в открытом доступе проекта ALC. Для оценки эффективности реализуемых подходов исследователи преимущественно применяли такие метрики, как UAR и Accuracy. Текущий 2023 год принёс самые высокие показатели по обоим метрикам.

Так, в работе [25] автор использовал не общедоступный, а проприетарный набор данных, содержащий голоса только мужского пола в ограниченном возрастном промежутке 22-34 лет, что не позволяет сделать однозначный вывод о том, что разобранный метод и полученная оценка точности в 95.3% будет иметь такое же значение и в других случаях. Однако результаты применяемого алгоритма ADLAIA [27] были апробированы на ALC. Полученные результаты по метрике UAR можно признать лучшими среди указанного архива данных и сделать вывод об эффективности разобранных авторами метода.

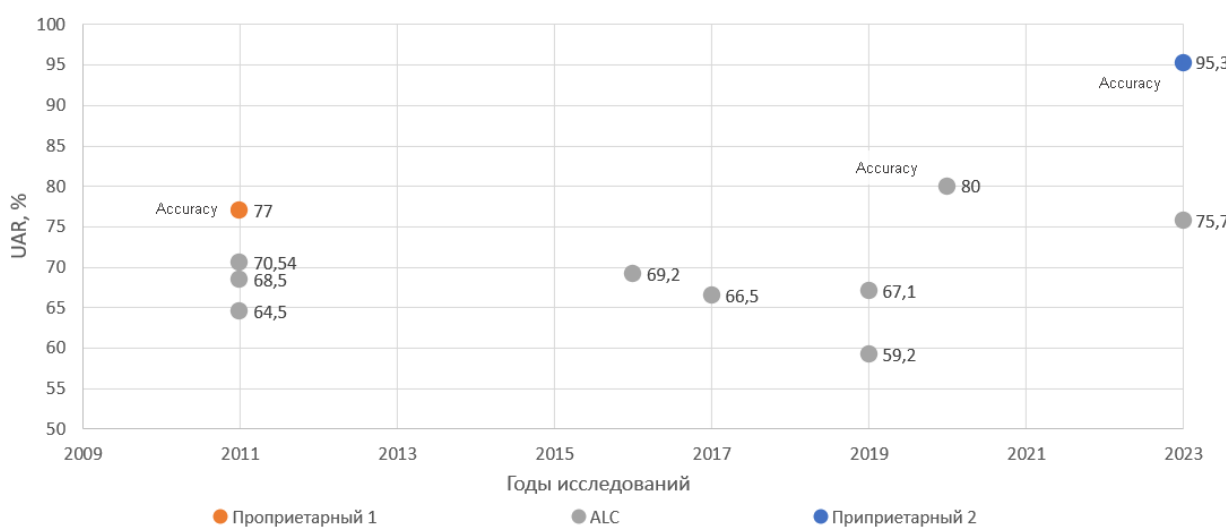


Рис. 2. Достигнутые результаты распознавания опьянения диктора в зависимости от года исследования и используемого набора данных

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведённого обзора, можно заключить, что к наиболее эффективным методам машинного обучения, применяемым в рассматриваемой задаче, можно отнести метод случайного леса [25, 11], продемонстрировавший точность 95.3% среди всех наборов речевых данных, а также 80% на наборе данных ALC, наиболее широко используемым среди ученых. Это можно объяснить тем, что данный архив доступен для общего пользования, в отличие от многих других, и содержит достаточно обширный, разнообразный набор голосовых записей, представленных как мужскими, так и женскими дикторами разных возрастов.

Несмотря на то, что были достигнуты некоторые успехи, стоит отметить, что результаты всё ещё довольно ограничены. Точность распознавания речи остаётся на низком уровне из-за недостаточной апробации, малого объема доступных данных и их низкой репрезентативности. В настоящее время эти методы практически не используются в реальных приложениях, и до широкого внедрения ещё далеко. Анализ эффективности тех или иных подходов упирается в используемый архив речевых данных (число записей, их длительность, количество человек, принявших участие в эксперименте, их возраст, уровень окружающего шума и т. д.). Общей выявленной проблемой является отсутствие общедоступности большинства наборов данных, что делает труднопроизводимым проведение исследований, представленных авторами, и осложняет усовершенствование применённых ими методов.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с формированием нового репрезентативного набора данных, учитывающего не только пол, но и возраст, стадии алкогольного опьянения, качество записи и уровень шумов в помещении и др. факторы. Это позволит ускорить прогресс в области распознавания алкогольной интоксикации и довести данные методы до практического применения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена ОмГТУ в рамках государственного задания Минобрнауки России на 2023-2025 годы № FSGF-2023-0004

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генпрокуратура РФ: число киберпреступлений в 2022 году снизилось на 4,9% // Рамблер. URL: <https://finance.rambler.ru/business/49984464-genprokuratura-rf-chislo-kiberprestupleniy-v-2022-godu-snizilos-na-4-9/> (дата обращения: 12.04.2023).
2. Исследование. Рынок разговорного ИИ в России 2020-2025 // Just AI. URL: <https://just-ai.com/blog/issledovanie-gynok-razgovornogo-ii-v-rossii-2020-2025> (дата обращения: 12.04.2023).
3. Сулавко А. Е., Еременко А. В., Борисов Р. В., Иниватов Д. П. Влияние психофизиологического состояния диктора на параметры его голоса и результаты биометрической аутентификации по речевому паролю // Компьютерные инструменты в образовании. 2017. № 4. С. 29–47.
4. Jones A. W. Alcohol, its analysis in blood and breath for forensic purposes, impairment effects, and acute toxicity // Wiley Interdisciplinary Reviews: Forensic Science. 2019. Vol. 1, no. 6. P. e1353. DOI: 10.1002/wfs2.1353.
5. Kröger J. L., Lutz O. H.-M., Raschke P. Privacy implications of voice and speech analysis–information disclosure by inference // Privacy and Identity Management. Data for Better Living: AI and Privacy: 14th IFIP WG 9.2, 9.6/11.7, 11.6/SIG 9.2. 2 International Summer School (Windisch, 19–23August 2019). Cham : Springer, 2020. P. 242–258. DOI: 10.1007/978-3-030-42504-3_16.
6. Levit M, Huber R., Batliner A. [et al.]. Use of prosodic speech characteristics for automated detection of alcohol intoxication // ISCA Tutorial and Research Workshop (ITRW) on Prosody in Speech Recognition and Understanding. 2001. URL: https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/68893/file/prsr_019.pdf (date accessed: 12.10.2023).
7. Khalil R. A., Jones E., Babar M. I. [et al.]. Speech emotion recognition using deep learning techniques: A review // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 117327–117345. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2936124.
8. Авдеева Ю. В. Экспериментальное исследование речи людей, находящихся в состоянии ситуативного алкогольного опьянения // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 4. С. 49–51.
9. Sigmund M., Zelinka P. Analysis of voiced speech excitation due to alcohol intoxication // Information Technology and Control. 2011. Vol. 40, no. 2. P. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.itc.40.2.429>.
10. Schiel F., Heinrich C., Barfüsser S. Alcohol language corpus: the first public corpus of alcoholized German speech // Language resources and evaluation. 2012. Vol. 46. P. 503–521. DOI: 10.1007/s10579-011-9139-y.
11. Shenoj V. V., Kuchibhotla S., Kotturu P. An efficient state detection of a person by fusion of acoustic and alcoholic features using various classification algorithms // International Journal of Speech Technology. 2020. Vol. 23. P. 625–632. DOI: 10.1007/s10772-020-09726-7.
12. Menšík R. Recognition of alcohol influence on speech // Text, Speech and Dialogue: proceedings of second International Workshop (Plzen, 13–17 September 1999). Berlin ; Heidelberg : Springer, 1999. P. 384–387.
13. Siddiqui N., Pryor L., Dave R. User authentication schemes using machine learning methods—a review // Proceedings of International Conference on Communication and Computational Technologies: ICCCT 2021. Singapore : Springer, 2021. P. 703–723. DOI: 10.1007/978-981-16-3246-4_54.
14. Сулавко А. Е., Иниватов Д. П., Стадников Д. Г., Чобан А. Г. Преобразователь образов голосовых паролей дикторов в криптографический ключ на основе комитета предварительно обученных сверточных нейронных сетей // Вопросы защиты информации. 2021. № 4. С. 23–33.
15. Куликов А. Л., Бездушный Д. И., Шарыгин М. В., Осокин В. Ю. Анализ применения метода опорных векторов в многомерной релейной защите // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2020. № 2. С. 123–132. DOI: 10.31857/S0002331020020065.
16. Gajšek R., Mihelič F., Dobrišek S. Speaker state recognition using an HMM-based feature extraction method // Computer Speech & Language. 2013. Vol. 27, no. 1. P. 135–150. DOI: 10.1016/j.csl.2012.01.007.
17. Bone D., Li M., Black M. P., Narayanana S. S. Intoxicated speech detection by fusion of speaker normalized hierarchical features and GMM supervectors // Comput Speech Lang. 2014. Vol. 28, no. 1. DOI: 10.1016/j.csl.2012.09.004.
18. Bocklet T., Riedhammer K., Nöth E. Drink and Speak: On the automatic classification of alcohol intoxication by acoustic, prosodic and text-based features // Twelfth Annual Conference of the International Speech Communication Association (Italy, 27–31August 2011). DOI:10.21437/Interspeech.2011-804.

19. Hershey S., Chaudhuri S., Ellis D. P. W. [et al.]. CNN architectures for large-scale audio classification // 2017 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). P. 131–135. DOI: 10.1109/ICASSP.2017.7952132.
20. Lee J., Tashev I. High-level feature representation using recurrent neural network for speech emotion recognition. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/high-level-feature-representation-using-recurrent-neural-network-for-speech-emotion-recognition/> (date accessed: 20.10.2023).
21. Шилов Н. М. Алгоритмы и подходы для решения задачи распознавания речи // Наукосфера. 2021. № 2-1. С. 89–95.
22. Berninger K., Hoppe J., Milde B. Classification of speaker intoxication using a bidirectional recurrent neural network // Text, Speech, and Dialogue : proceedings of 19th International Conference, TSD 2016 (Brno, 12–16 September 2016). Cham : Springer, 2016. P. 435–442. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45510-5_50.
23. Montacié C., Caraty M. J. Combining multiple phoneme-based classifiers with audio feature-based classifier for the detection of alcohol intoxication // Twelfth Annual Conference of the International Speech Communication Association. 2011.
24. Zhang Y., Wenginger F., Schuller B. Cross-domain classification of drowsiness in speech: the case of alcohol intoxication and sleep deprivation // Interspeech : proceedings (Stockholm, 20–24 August 2017). DOI: 10.21437/Interspeech.2017-1015.
25. Terlapu P. V. Intelligent Novel Approach for Identification of Alcohol Consumers using Incremental Hidden Layer Neurons ANN (IHLN-ANN)-Based Model on Vowelized Voice Dataset (2023) // Research Square. URL: <https://www.researchsquare.com/article/rs-2662841/v1> (date accessed: 20.11.2023).
26. Bonela A. A., He Z., Nibali A. [et al.]. Audio-based Deep Learning Algorithm to Identify Alcohol Inebriation (ADLAIA) // Alcohol. 2023. Vol. 109. P. 49–54. DOI: 10.1016/j.alcohol.2022.12.002.
27. Wang W., Wu H., Li M. Deep neural networks with batch speaker normalization for intoxicated speech detection // Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC) (Lanzhou, 2019). IEEE, 2019. P. 1323–1327. DOI: 10.1109/APSIPAASC47483.2019.9023074.

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-67-75

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ОМГТУ

INFORMATION SYSTEM FOR MANAGING CONFERENCE ACTIVITIES OF OMSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Д. И. Кальдина, Е. Б. Юдин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

D. I. Kaldina, E. B. Yudin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы в конференционной деятельности ОмГТУ в 2016-2020 гг. в рамках участия в программе «Опорных университетов». Также освещаются новые принципы научной политики, которые были предложены в рамках участия университета в программе «Приоритет-2030». В рамках новой политики была разработана система проведения конференций conferences.omgtu.ru, устанавливается выбранный научный протокол университета, ориентированный на обязательное рецензирование работ, управление данными и знаниями, ориентацию на мировую науку и свободный научный поиск. Приводятся результаты внедрения системы за первый год использования (2022-2023 учебный год), а также планы дальнейшей доработки системы.

Ключевые слова: система научных коммуникаций, система конференций, подбор рецензентов, научная этика.

Abstract. The problems in conference activities of Omsk State Technical University in 2016-2020 are considered. New principles of science policy are highlighted. These principles were proposed as part of the university's participation in the Priority 2030 program. The conference system conferences.omgtu.ru has been developed. This system implements the selected scientific protocol of the university, focused on peer reviews, data and knowledge management, orientation towards world science and free scientific research. The results of implementing the system for the first year of use (2022-2023 academic year) are presented. Plans for improving the system are presented too.

Keywords: system of scientific communications, conference system, selection of reviewers, scientific ethics.

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка информационных систем для управления научной информацией является важной составляющей политик научных организаций в области управления как в России [1], так и за рубежом [2]. При разработке информационных систем возникают такие проблемы, как защита данных и знаний [3], управление компетенциями как отдельных сотрудников [4], так и групп сотрудников [5]. Особый интерес при разработке информационных систем представляет влияние внедрения этих систем на культуру организации [6], правила и принятые этические нормы организации [7]. Например, внедрение информационных систем может сделать процесс исполнения принятого научного протокола прозрачным и обязательным для сотрудников, а наказание за нарушение принятых правил – неотвратимым. Это особенно важно для многих российских университетов, в том числе для Омского государственного технического университета (ОмГТУ), для которых присущи такие проблемы с научным протоколом как:

а) отделение «студенческой» науки от «взрослой», как следствие затруднен свободный выбор исследовательских тем (вырабатывается эффект «кастовости» вместо формирования научных групп на прозрачной и взаимовыгодной основе);

в) низкий уровень входящей и исходящей мобильности сотрудников и обучающихся, а также уровень международного сотрудничества;

г) небольшое число междисциплинарных тем, которые в последние годы становятся драйверами развития науки как в России, так и за рубежом.

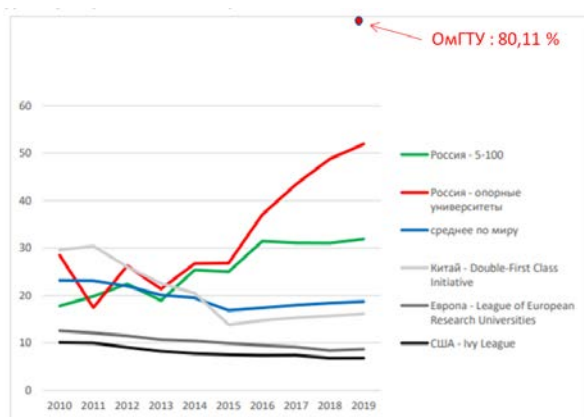
Из данной ситуации возможен выход путем реализации ряда мер, в том числе следующих, ставших частью научной политики ОмГТУ с 2020 года:

- 1) формирование новых инструментов управления научной деятельностью и управления научной информацией в виде автоматизированных систем, часто с поддержкой систем искусственного интеллекта (тем самым увеличения производительности труда в области управления);
- 2) повышение мотивации сотрудников (изменения в области политики управления персоналом и управления компетенциями сотрудников);
- 3) формулирование и решение новых амбициозных задач в управлении научной деятельностью (концентрация на актуальных для промышленности узких направлениях, создание задела наработок, превышающих мировой уровень).

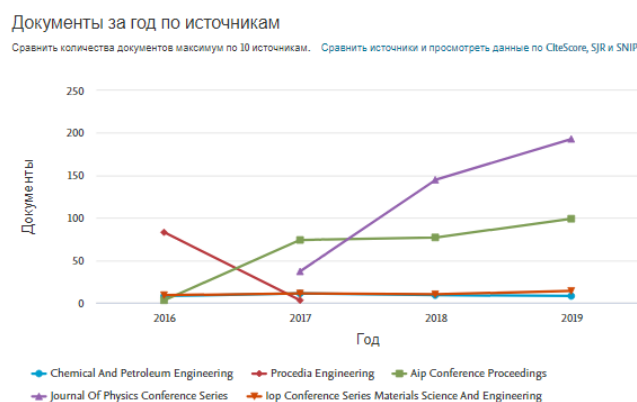
Данная работа фокусируется на реализации одного из перечисленных элементов научной политики: формирование новых инструментов управления научной деятельностью. Она не затрагивает таких аспектов научной политики, как изменение мотивации сотрудников и постановка амбициозных задач в области науки с концентрацией ресурсов на одной задаче. В работе освещаются только проблемы конференционной деятельности и аспекты разработки системы управления конференциями.

II. ПРОБЛЕМЫ В КОНФЕРЕНЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОмГТУ В 2016-2019 гг.

Проблемы с формированием научного протокола в области конференционной деятельности в ОмГТУ можно видеть на основе статистических показателей международных баз научного цитирования. Так, конференционные показатели университета на момент завершения участия в программе «Опорных университетов» свидетельствовали о целом ряде проблем. Так, при анализе публикаций, индексируемых в Web Of Science по данным наукометрической системы InCites за 2019 фиксируется низкий уровень коллабораций с предприятиями региона, низкий уровень экспертной деятельности (из 777 российских организаций по доле международных коллабораций ОмГТУ занимал 385 место, по доле коллабораций в индустрии – 262 место, по публикациям в журналах – 259 место). Доля публикаций в конференциях в системе Web Of Science составляла 81.29 %, что свидетельствовало о накрутке показателей за счет создания «домашних» конференций [8]. Аналогичная ситуация наблюдается при анализе публикаций в системе цитирования Scopus, на рис. 1а приведен график доли публикаций сотрудников ОмГТУ в трудах конференций в сравнении с ведущими американскими университетами «Лиги плюща» («Ivy League»), средними значениями университетов «5-100», другими опорными университетами, а также среднему по миру и по сравнению с отдельными странами. Данные взяты из работы Стерлигова И.А. «Российский конференционный взрыв: масштабы, причины, дальнейшие действия» [8]. Как можно видеть, доля публикаций в трудах конференций ОмГТУ аномально высокая, основными источниками публикаций были Journal of Physics Conference Series и AIP Conference Proceedings (рис. 1б).



а



б

Рис. 1. Конференционная активность сотрудников ОмГТУ а) Доля публикаций ОмГТУ в системе Scopus, рисунок переработан с рисунка из работы [8]; б) Основные источники публикаций за 2016-2019 гг. в Scopus

Другим фактором, указывающим на проблемы в научной деятельности, является небольшое количество научных коллабораций сотрудников ОмГТУ с партнерами из-за рубежа, об этом свидетельствует низкий процент публикаций в трудах конференций с зарубежными соавторами. Так, в системе Web Of Science (использована программа [9] и данные [8]), доля публикаций с иностранными соавторами ниже среднего по миру (синяя линия см. рис 2) более чем в 6 раз и ниже, чем в среднем по России почти в 2 раза (красная линия, рис 2). Представленные факты свидетельствуют о существенных нарушениях в проведении научных исследований университета, «накрутке» показателей, нарушениях в области продвижения научных результатов на более высокий уровень.

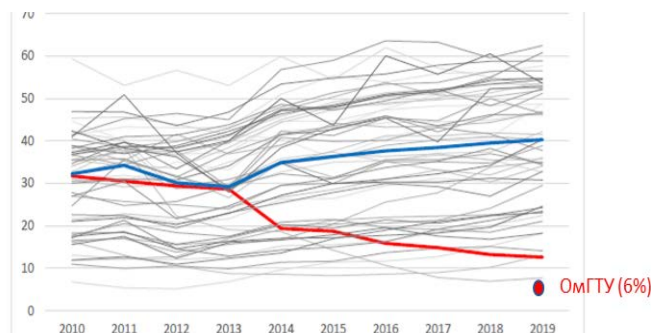


Рис. 2. Процент трудов с иностранными соавторами в ОмГТУ в 2019 году в сравнении со средними по России (красная линия) и средним по миру (синяя линия), рисунок переработан из [8]

III. НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ И РЕШЕНИЯ

Для решения имеющихся проблем в 2020 году проректором по науке и научной деятельности ОмГТУ были сформулированы следующие принципы.

- 1) Каждому научно-педагогическому работнику (НПР) и обучающемуся обеспечивается возможность заниматься наукой.
- 2) Связка «НПР + обучающийся» рассматривается как подлинное партнерство, независимо от того, насколько велика асимметрия в академической силе и репутации.
- 3) Научная и инновационная деятельности рассматриваются как проектные.
- 4) Результаты научной и инновационной деятельности должны проходить независимую экспертизу.
- 5) Минимизация бюрократических издержек.
- 6) Обеспечение максимальной прозрачности распределения ресурсов и доступа к их использованию.
- 7) Соблюдение принципов защиты персональных данных и норм законодательства.

Для трансформирования конференционной деятельности в форме разработки платформы для конференций это означало постановку следующих задач.

– Учет и контроль обязательного рецензирования работ, предоставление всех рецензий авторам публикаций (соответствует принципу 6 научной политики).

– Учет и контроль процесса проверки на антиплагиат и соблюдение принципов научной этики (принцип 1).

– Система обязательного подтверждения авторства для всех соавторов работы (принцип 2, принцип 6).

– Внедрение элементов защиты персональных данных (принцип 7).

– Создание модуля справочной системы: базы знаний с описанием всех основных процессов на языке описания процессов BPMN, с указанием ссылок на нормативные документы, ответственных лиц и их контактов, используемой терминологии и решений (принцип 3, принцип 7).

– Разработка широкого набора функций статистического анализа конференций: по участникам, рецензентам, городам, организациям и т. д. (принцип 5, принцип 6).

– Предоставление возможностей использования различных форматов загружаемых докладов (принцип 1).

IV. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИЙ

Скриншот главной страницы разработанной веб-системы (<https://conferences.omgtu.ru/>) представлен на рис. 3. Ниже приведем краткое описание этой системы.

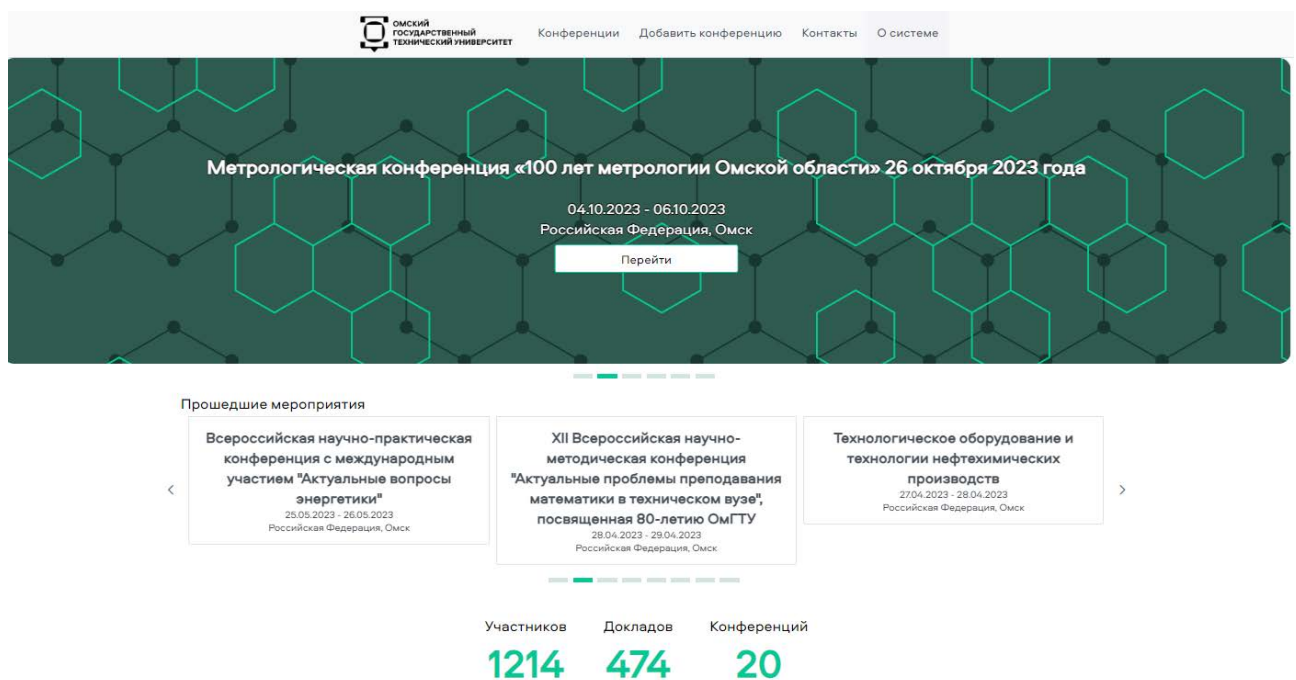


Рис. 3. Главная страница системы конференций

В разработанной системе спроектирован и принят рабочий поток приема докладов, состоящий из четырех основных стадий. Все этапы являются обязательными, переход, минуя одну из стадий невозможен, см. рис. 4.

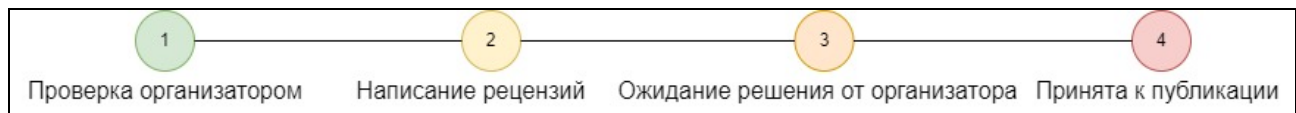


Рис. 4. Стадии принятия доклада

Основной рабочий поток допускал две дополнительные, необязательные стадии (рис. 5.)

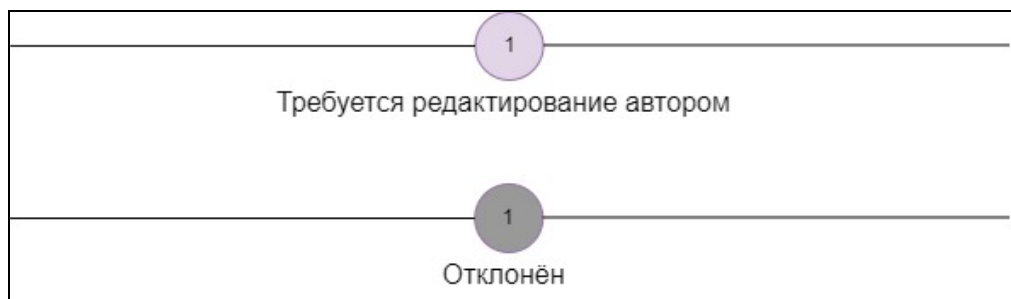


Рис. 5. Дополнительные стадии

Процесс работы с докладом представлен на рис. 6. Цветом обозначены процессы, соответствующие определенной стадии. В процессе участвуют три роли: рецензент, организатор, докладчик. Все эти роли работают внутри системы.

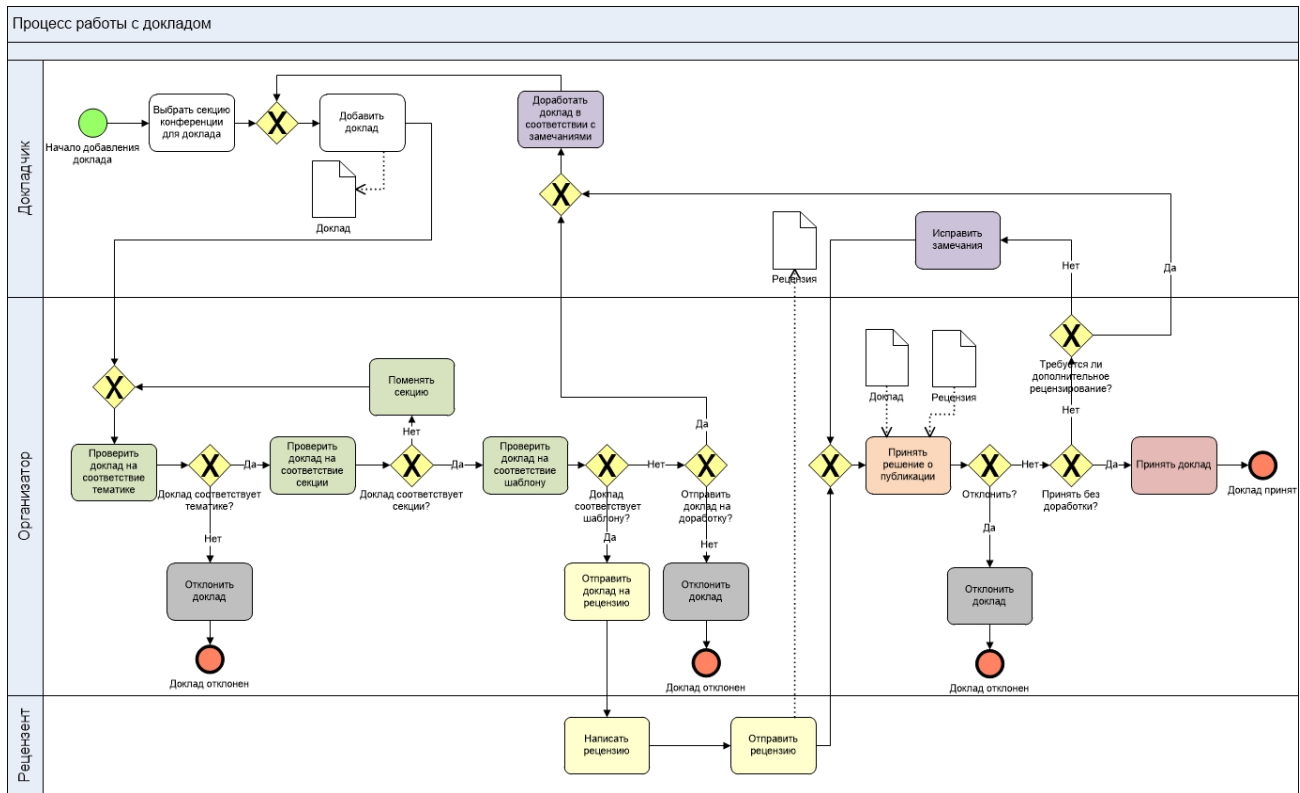


Рис. 6. BPMN диаграмма «Процесс работы с докладом»

В системе конференций представлена база знаний с часто задаваемыми вопросами о рабочем процессе проведения конференций: <https://conferences.omgtu.ru/web?folder=system>.

База знаний о системе разделена на два блока: «Часто задаваемые вопросы» и «Руководство пользователя». В часто задаваемых вопросах представлены следующие пункты.

1. «О системе Конференции ОмГТУ» – информация о системе.
2. «Что такое «Руководство пользователя» – приведено описание подсистем, цели системы и её структура.
3. «Расскажите о процессе работы с докладом» – здесь приведен процесс работы с докладом, разработанный для системы конференций. Представлена BPMN диаграмма с описанием каждого процесса. Выделены роли, которые участвуют в каждом из процессов.
4. «Расскажите о процессе публикации сборника» – здесь приведена BPMN диаграмма с процессом публикации сборника. Приведены примеры оформления сопроводительных документов. Также указаны контактные телефоны сотрудников.
5. «Какие бывают уровни конференций» – здесь приведена классификация конференций, принятая в ОмГТУ. Конференции разделяются в зависимости от количества участников конференции с разных регионов/стран.
6. «Как планируются мероприятия» – здесь указано, какие документы необходимы для подачи заявки на создание собственной конференции, приведены примеры оформления сопроводительных документов.
7. «Какие сроки проведения мероприятий» – здесь указаны рекомендуемые временные интервалы для рецензирования работ, проведения мероприятий в ОмГТУ. Этапы: оформление приказа, утверждение сметы, создание сайта конференции, окончание процесса приема публикаций, окончание процесса рецензирования, сдача отчета о проведенном мероприятии.

Создание справки помогло упростить получение информации для организаторов мероприятий. Все необходимые документы хранятся в одном месте. А также весь процесс работы с мероприятием представлен наглядно в виде BPMN диаграммы.

В табл. 1 представлены задачи с пояснением, в каком виде они реализованы или планируются к реализации в системе конференций.

ТАБЛИЦА 1
 ЗАДАЧИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОНФЕРЕНЦИЙ
 И СТЕПЕНЬ ИХ РЕШЕНИЯ В ИМЕЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ

Задачи	Реализовано/Не реализовано	Пояснение
Учет и контроль обязательного рецензирования работ	Реализовано	В системе предусмотрено обязательное рецензирование. Доклад нельзя перевести на следующую стадию, пока не будет написана рецензия.
Учет и контроль процесса проверки на антиплагиат и соблюдение принципов научной этики	Не реализовано	Организаторы самостоятельно проверяют работы на антиплагиат, в системе они могут только вводить полученные результаты проверки.
Система обязательного подтверждения авторства для всех соавторов работы	Реализовано	В системе предусмотрено обязательное подтверждение соавторства. Пока все указанные авторы не зарегистрируются и не подтвердят свое участие, доклад нельзя будет перевести на следующую стадию.
Внедрение элементов защиты персональных данных	Реализовано	Все пользователи системы при регистрации соглашаются с условиями обработки персональных данных, персональные данные хранятся в системе в зашифрованном виде.
Создание модуля справочной системы	Реализовано	Разработана база знаний, в которой делается описание всех критических процессов и проведения конференции в нотации BPMN.
Разработка широкого набора функций статистического анализа конференций	Реализовано	Данные обо всех конференциях доступны администраторам сайта – сотрудникам научно-аналитического отдела. Сотрудники отдела могут просматривать аналитику о конференции, доклады и рецензии.
Возможности использования различных форматов загружаемых докладов	Не реализовано	На данный момент используются только форматы docx, pdf.

В результате проведения промежуточного анализа возможностей, угроз, сильных и слабых сторон разработки поставлен ряд задач для дальнейшего развития системы конференции, список новых задач и краткое описание необходимых изменений, см. табл. 2. Разработкой системы конференций занимается один человек (студент-магистрант ОмГТУ), поэтому время разработки указано с учетом работы одного человека, работающего на условиях неполной занятости.

ТАБЛИЦА 2
НОВЫЕ ФУНКЦИИ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Функция	Требования
Двойное слепое рецензирование	Необходимо получать от авторов текст доклада без указания авторства. Добавить поле для ввода имен авторов и их организаций для дальнейшего оформления доклада. Оценочное время разработки – 4-5 недель.
Машинное обучение для автоматического подбора рецензентов	Необходимо разработать модуль для машинного обучения сравнения процесса, сравнения аннотаций докладов с тематиками потенциальных рецензентов – сотрудниками ОмГТУ, метаинформация о публикациях которых хранится на сайте science.omgtu.ru. Оценочное время разработки – 6 месяцев.
Формат принимаемых файлов Latex	Необходимо реализовать интеграцию с Latex. Оценочное время разработки – 5 месяцев.
Поле для ввода информации об организационном взносе	Необходимо создать новое поле в заявке на подачу конференции с указанием, будет ли организационный взнос и в каком размере. При этом в настройках конференции необходимо добавить поле для редактирования информации об организационном взносе, а на странице доклада добавить поле для загрузки чеков об оплате. При загрузке чека доклад получает статус «Оплачен». Также необходимо будет реализовать фильтр по оплаченным и неоплаченным докладом. Оценочное время разработки – 3-4 недели.
Предпросмотра текстовых файлов	Переводить все файлы в формат pdf при загрузке для отображения. Сделать кнопку отображения на странице доклада. Оценочное время разработки – 2-3 недели.
Автоматический антиплагиат	Подключение к сайту антиплагиата по API. Необходимо сотрудничество с отделом информатизации для получения личного аккаунта для системы конференций в системе Антиплагиат. Также необходимо ограничить количество проверок для каждой конференции. Администратор системы будет настраивать количество проверок для каждой конференции. Оценочное время разработки – 4 недели.
Возможность приглашать к участию незарегистрированных пользователей внутри системы	Необходимо добавить поле для ввода информации о приглашенном пользователе. Необходимо указывать ФИО, почту. При отправке приглашения создается неподтвержденный пользователь с указанными данными. На почту приходит письмо со ссылкой на регистрацию. При переходе поля будут заполнены указанными данными. Оценочное время разработки – 5-6 недель.
Английская версия	Сделать словарь всех используемых статических слов. Сделать кнопку для переключения. На конференциях добавить возможность добавления вкладок для разных языковых версий конференции. Оценочное время разработки 5-6 недель.
Версия для слабовидящих	Необходимо разработать функционал кнопки для переключения. Увеличить размер текста на всех страницах. Оценочное время разработки – 5-6 недель.

Функция	Требования
Возможность выхода участника из конференции самостоятельно	<p>Добавить у участника в личном кабинете кнопку «Выйти из конференции». Он приобретает статус «Отклонен».</p> <p>В списке участников не отображать участников со статусом «Отклонен».</p> <p>Продумать, можно ли выходить из конференции, если уже есть добавленный доклад.</p> <p>Оценочное время разработки – 5-6 недель.</p>

V. ОБСУЖДЕНИЯ

На данный момент в системе conferences.omgту.ru проведено/проводятся 20 конференций, зарегистрировано 1214 пользователей, 474 принятых доклада, написано 595 рецензий. Наибольшие нарушения выявлены на конференции «Техника и технологии нефтегазового производства», наилучшие результаты по числу принятых докладов и написанных рецензий получены на конференции «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника». Наибольшее число рецензий на одну публикацию и наибольшее число разных городов участников – на конференции «Транспорт и хранение углеводородов». Отсутствие на платформе значимых международных конференций связано с имеющимися долгое время ограничениями на доступ к доменам ОмГТУ из-за рубежа. На осень 2023 года эта проблема решена.

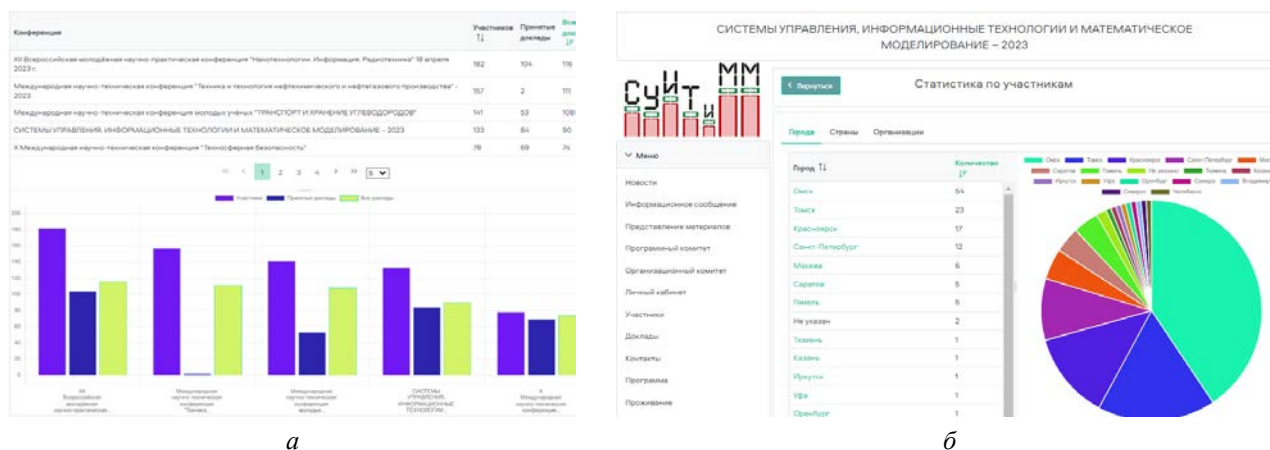


Рис. 7. Элементы аналитики по конференциям:

а) панели администратора университета б) панели организатора конференции

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе демонстрируется, как устанавливаемые элементы научного протокола реализуются в функционале программной веб-системы управления конференциями университета. Также в работе представлены функции, которые планируются для дальнейшего развития системы конференций. Эти функции позволяют увеличить производительность труда в области администрирования конференций, формирования аналитических отчетов по результатам конференции, делая процесс работы с докладами прозрачнее как для участников конференции, так и для организаторов, рецензентов, представителей библиотеки, представителей научных журналов. Среди новых функций особый интерес представляет функция подбора рецензентов на основе машинного обучения, автоматической проверки на плагиат, поддержки многоязычности, версии для слабовидящих, увеличение числа поддерживаемых форматов для докладов и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуськов А. Е. Концептуальная модель системы наукометрического мониторинга результативности научной деятельности // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информационные процессы и системы. 2022. № 12. С. 14–22. DOI: 10.36535/0548-0027-2022-12-4.
2. Taherdoost H. An Overview of Trends in Information Systems: Emerging Technologies that Transform the Information Technology Industry // Cloud Computing and Data Science. 2023. Vol. 4, no. 1. P. 1–16. DOI: 10.37256/ccds.4120231653.
3. Hurmelinna-Laukkanen P. Enabling collaborative innovation – knowledge protection for knowledge sharing // European Journal of Innovation Management. 2011. Vol. 14, no. 3. P. 303–321. DOI: 10.1108/14601061111148816.
4. Chen C. J., Huang J. W. Strategic human resource practices and innovation performance – the mediating role of knowledge management capacity // Journal of Business Research. 2009. Vol. 62, no. 1. P. 104–114. DOI: 10.1016/j.jbusres.2007.11.016.
5. Camelo-Ordaz C., García-Cruz J., Sousa-Ginel E., Valle-Cabrera R. The influence of human resource management on knowledge sharing and innovation in Spain: the mediating role of affective commitment // The International Journal of Human Resource Management. 2011. Vol. 22, no. 7. P. 1442–1463. DOI: 10.1080/09585192.2011.561960.
6. Kamhawi E. M. Knowledge management fishbone: a standard framework of organizational enablers // Journal of Knowledge Management. 2012. Vol. 16, no. 5. P. 808–828. DOI: 10.1108/13673271211262826.
7. Weibel S., Popp M., Reis S. [et al.]. Identifying and managing problematic trials: A research integrity assessment tool for randomized controlled trials in evidence synthesis // Research Synthesis Methods. 2022. Vol. 14, no. 3. P. 357–369. DOI: <https://doi.org/10.1002/jrsm.1599>.
8. Стерлигов И. А. Российский конференционный взрыв: масштабы, причины, дальнейшие действия // Управление наукой: теория и практика. 2021. № 2. С. 222–251.
9. Программа расчета доли участия по конференциям ОмГТУ по годам / разработ. Rudolf Shenfeld. Омск, 2021. URL: https://github.com/nerudxlf/getting_share (дата обращения: 20.09.2023).

УДК 378:004

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-76-82

ОЦЕНКА НАУЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ В ОМГТУ

RESEARCH IN THE FIELD OF MECHANICAL ENGINEERING AT OMSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

В. П. Королев, Е. Б. Юдин

Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

V. P. Korolev, E. B. Yudin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. В работе приведена карта науки в области машиностроения для омского государственного технического университета. Приводятся фронтиры в науке и инновациях как в России, так и за рубежом. На основе формального анализа делаются выводы для реализации устойчивого развития в этом направлении. Предлагается используемый подход применять не только для направлений науки, но и для анализа университета в целом, отдельных групп и проектов.

Ключевые слова: наукометрический анализ, топики тем, регистрация в ЕГИСУ, определение фронта в науке, оценка развития науки.

Abstract. A map of science in the field of mechanical engineering for the Omsk State Technical University is given in the work. Frontiers in the science and the innovation both in Russia and abroad are shown. Conclusions for the implementation of sustainable development in this science are made on the basis of formal analysis. The approach used is proposed for a formal assessment of the level of technology development not only for fields of science, but also for the analysis of the university as a whole, scientific groups and projects.

Keywords: scientific communications, conference system, selection of reviewers, scientific ethics.

I. ВВЕДЕНИЕ

Выявление сильных и слабых сторон университета является сложной задачей, решить которую только наукометрическими методами невозможно. Тем не менее, нами выполнялись попытки провести наукометрический анализ в таких сильных и приоритетных направлениях науки Омского государственного технического университета (ОмГТУ), как «Электротехника и электроника» [1], а также «Материаловедение» [2]. Целью исследований являлось определение научных фронтиров и выявление ведущих университетов и исследователей в сильных для ОмГТУ направлениях, а также определение уровня исследований ОмГТУ и выявление потенциальных коллабораций.

В данной работе мы рассматриваем ещё одно сильное направление университета – «Машиностроение», в исследованиях будем опираться на классификатор наук Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). Публикационный анализ выполнен с использованием наукометрической системы SciVal. Анализ результатов интеллектуальной деятельности, диссертаций и научно-исследовательских работ выполнен путем сбора и обработки данных из Единой государственной информационной системы учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (ЕГИСУ). Использовался массив данных из почти 240 тыс. объектов ЕГИСУ за 2018-2023 гг.

II. АНАЛИЗ КОЛЛАБОРАЦИЙ В SCOPUS

В области инженерных наук наибольшее число совместных публикаций ОмГТУ имеется с институтами РАН (в особенности Сибирского Отделения наук РАН), имеется много публикаций с авторами из Ташкентского института текстильной и легкой промышленности и т. д. На **рис. 1** представлен список организаций, отсортиро-

ванный по числу совместных публикаций. Следует отметить, что значение средневзвешенного цитирования по заданной предметной области и году исследования (FWCI) рассмотренных публикаций ниже 1, что означает цитирование ниже общемирового уровня. В то же время средневзвешенное число просмотров (FWVI) у этих публикаций выше общемирового. Показатель FWCI показывает интерес не только «пишущего» научного сообщества, но и администрации, а также той трети научного сообщества, которая не склонна публиковаться, включает большое количество студентов и аспирантов, а также исследователей, работающих в корпоративном секторе.

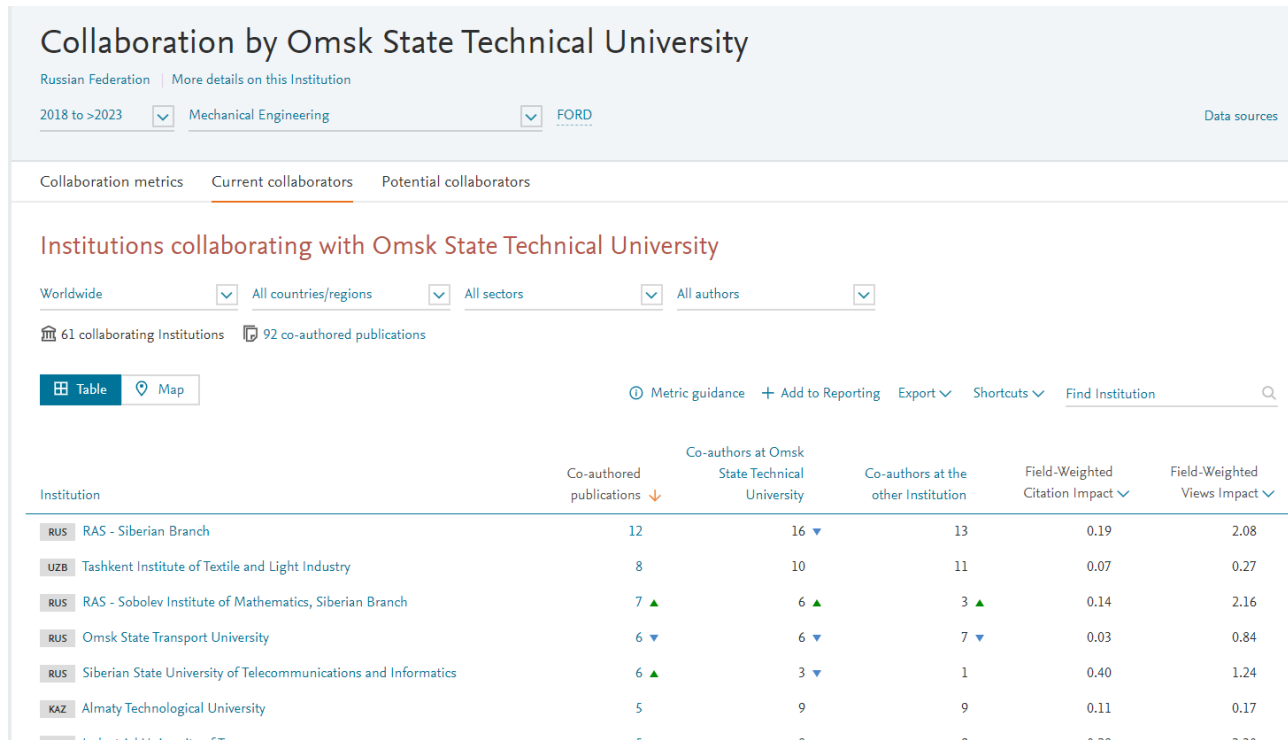


Рис. 1. Коллаборации ОмГТУ с организациями за 2018-2022 гг. по данным Scopus (использована аналитическая система SciVal)

III. АНАЛИЗ КЛАСТЕРОВ НАУЧНЫХ ТЕМАТИК ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ ЗА 2018-2022

В Scopus каждая публикация на основе списка литературы относится к той или иной тематике, а эти тематики объединяются в кластеры тематик. Среди порядка 2500 кластеров тематик по направлению Машиностроение (Mechanical Engineering) в Scopus в ОмГТУ за пять предыдущих лет находится 131 кластер. Наиболее значимые по числу публикаций от ОмГТУ из них являются.

1) Кластер **Exergy; Heat Pump Systems; Rankine Cycle**. Авторы ОмГТУ: Щерба В.Е., Юша В.Л., Павлюченко Е.А., Райковский Н.А. и др. Количество публикаций – 56. Качество публикаций FWCI = 0.2.

2) Кластер **Machining; Cutting; Milling (Machining)**. Авторы ОмГТУ: Федоров А.А., Кисель А.Г., Панчук К.Л. и др. Количество публикаций – 25. Качество публикаций FWCI = 0.51, т. е. статьи авторов ОмГТУ цитируются на 49% меньше среднего по миру в данном направлении.

3) Кластер **Vibration Control; Magnetorheological Fluids; Automobile Suspensions**. Авторы ОмГТУ: Бурьян Ю.А., Силков М.В., Титенко В.В. и др. Качество публикаций – 17, средний FWCI = 1.1.

4) Кластер **Microstructure; Steel; Austenite** Авторы ОмГТУ: Количество публикаций – 25. Авторы ОмГТУ: Перегудов О.А., Еремин Е.Н., Лосев А.С. и др.). Качество публикаций, средний FWCI = 0.12.

5) Кластер **Graphene; Carbon Nanotubes; Nanotubes**. Количество публикаций – 16. Авторы ОмГТУ: Несов С.Н. Поворожнюк С.Н. и др., средний FWCI= 0.34.

6) Кластер **Reliability; Maintenance; Reliability Analysis** Количество публикаций – 13. Авторы ОмГТУ: Щерба В.Е., Копытов Е.В., Майстренко В.А., Цыганенко В.Н. и др.), качество публикаций, средний FWCI = 0.83, т. е. статьи авторов ОмГТУ цитируются на 17% меньше среднего по миру в данном направлении.

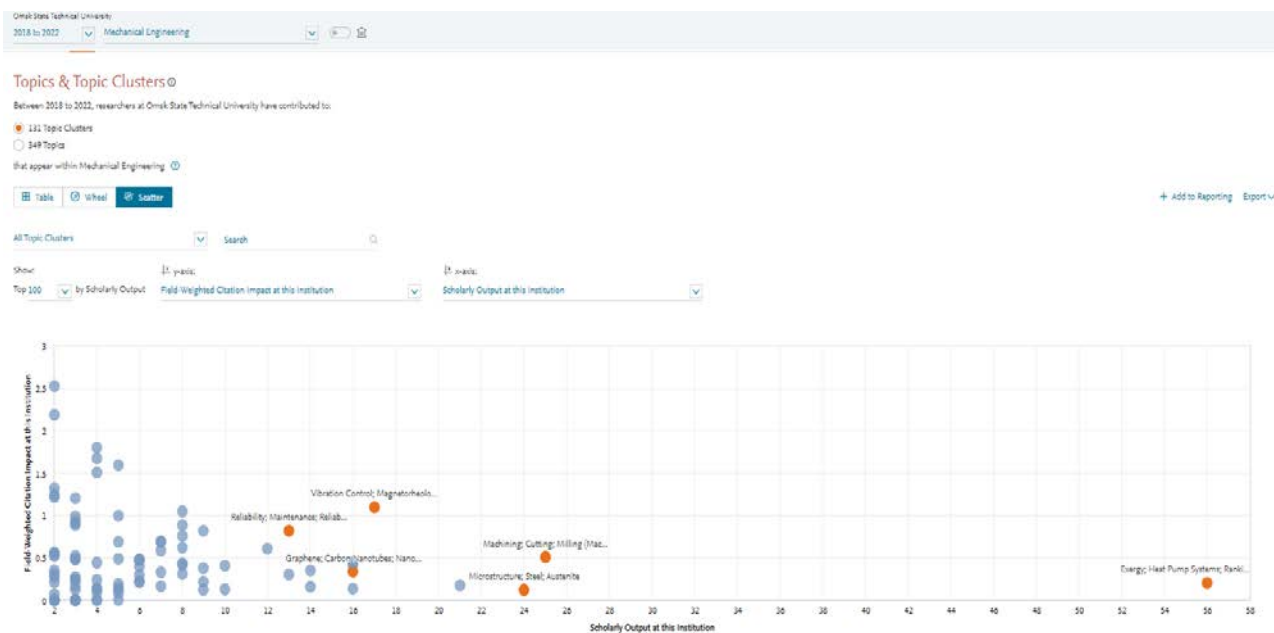


Рис. 2. Кластеры тем в направлении «Машиностроение».
По оси абсцисс – число публикаций, по оси ординат – FWCI

Более подробное описание кластеров в области машиностроения с выделением лидеров по числу и качеству (FWCI выше мирового) публикаций по России представлено ниже.

1. Кластер **Exergy; Heat Pump Systems; Rankine Cycle**. Ведущие в России ученые: Аристов Ю.И. (ИК.им Борескова РАН) 47 публ. ср. FWCI = 1.22; Гордеева Л. Г. (ИК. им Борескова РАН) 27 публ. ср. FWCI = 1.55; Моренцов Н.А. (ВолгТУ) 25 публ., в которых ср. FWCI = 5.17. Среди университетов ведущими, с учетом качества работ, являются: КГЭУ (64 публикации, ср. FWCI = 1.935), ИК им Борескова РАН (53 публикации, ср. FWCI = 1.2), НГУ (31 публикация, FWCI 1.14) КНИТУ (30 публикаций, ср. FWCI = 2.6), ВолгТУ (29 публикаций, ср. FWCI = 4.48). В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 11000 публикаций с 2018 года), среди университетов из Сианьского университета Цзяо Тун (более 1000 публикаций). Ведущие журналы: Energy, Applied Thermal Engineering, Energy Conversion and Management, Energies и др. Ведущими публикациями являются публикация [3] с FWCI = 44.33, в которой представлен обзор водородной энергетики, оценка различных невозобновляемых и возобновляемых систем производства водорода на основе конструкции системы, стоимости, потенциала глобального потепления, а также публикация [4] с FWCI = 85.27, в которой рассматривается задача разработки новых транскритических систем высокотемпературных тепловых насосов на CO₂ путем внедрения метода двухтемпературного испарения, реализуемого с помощью эжектора для каскадное поглощение тепла от источника тепла.

2. Кластер **Machining; Cutting; Milling (Machining)**. Ведущие в России ученые: Пименов Д.Ю. (ЮФУ) 102 публ., ср. FWCI = 3.43; Абляз Т.Р.(ПНИПУ): 50 публ., ср. FWCI = 1.55; Пивкин П.В. (СТАНКИН) 22 публ., ср. FWCI = 2.5; Григорьев С.Н. (СТАНКИН) 29 публ., ср. FWCI = 1.9; Среди университетов ведущими являются: ЮФУ (218 публикаций, ср. FWCI = 1.82), СПбПУ (95 публикаций, ср. FWCI = 1.36), СТАНКИН (86 публикации, ср. FWCI = 1.08), Горный университет (17 публикаций, ср. FWCI = 1.79), ИТМО (17 публикаций, ср. FWCI = 1.17). В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 13 тыс. публикаций), среди университетов в индийском Университете Анны (более 1000 публикаций). Ведущие журналы: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Materials Today: Proceedings, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Ведущими публикациями являются публикация [5] с FWCI = 229, в которой исследуется образование волнистости на рабочих поверхностях колец роликовых подшипников, вызывающее появление шума и вибрации в подшипниковых узлах машин и механизмов и публикация [6] с FWCI = 152, в которой изучается кремний-алюминиевый композит (Si/Al) с уникальными свойствами: высокой удельной прочностью, низким коэффициентом теплового расширения, отличной износостойкостью и свариваемостью.

3. Кластер **Vibration Control; Magnetorheological Fluids; Automobile Suspensions**. Ведущие в России ученые: Степанов Г.В. (ГНИИХТЭОС РАН) 43 публ., ср. FWCI = 0.91; Райхер Ю.Л. (ИМСС УрО РАН) 25 публ., ср. FWCI = 1.05; Храменко Е.Ю. (МГУ им. Ломоносова) 21 публ., FWCI = 1.6; Среди университетов ведущими являются: Институты РАН (104 публикаций, ср. FWCI = 0.65), УрФУ (47 публикаций, ср. FWCI = 0.68), МГУ им. Ломоносова (104 публикаций, ср. FWCI = 0.65). К «формальным» лидерам можно было бы отнести и ОмГТУ (17 публикаций, ср. FWCI = 1.1). Тем не менее завышенное качество публикаций объясняется большим числом самоцитирований и большим числом публикаций в сборниках конференций, а не журналах. В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 5 тыс. публикаций), среди университетов в китайском Университете Тунци (более 200 публикаций). Ведущие журналы: Smart Materials and Structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock, Mechanical Systems and Signal Processing. Ведущей публикаций по FWCI (FWCI = 31.46) является работ [7], в которой исследуется нелинейная передача энергии гибкой пластины с произвольной границей при соединении изолятора с высокой статической и низкой динамической жесткостью.

4. Кластер **Microstructure; Steel; Austenite**. Ведущие в России ученые: Валиев Р.З. (УУНиТ) 105 публ., ср. FWCI = 1.72; Михайловская (МИМиС) 43 публ., ср. FWCI = 1.27; Страумал Б.Б. (МИСиС) 43 публ., ср. FWCI = 1.44; Мурашкин М.Ю. (СПбГУ) 42 публ., ср. FWCI = 1.37; Среди университетов ведущими являются: МИСиС (399 публикаций, ср. FWCI = 0.5), УрФУ (390 публикаций, ср. FWCI = 0.46), СПбПУ (224 публикаций, ср. FWCI = 0.78), БелГУ (207 публикаций, ср. FWCI = 0.78). Выше мирового уровня цитируются только публикации СПбГУ (152 публикаций, ср. FWCI = 1.38). В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 26 тыс. публикаций), среди университетов – китайский Университет науки и технологий Пекина (более 5 тыс. публикаций). Ведущие журналы: Materials Science & Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, а также журналы Metals, Materials, Journal of Alloys and Compounds. Ведущей публикаций по FWCI является публикация [8] с FWCI = 65, в которой методом кручения под высоким давлением при комнатной и повышенных температурах была изготовлена наноструктурная сталь с высокой плотностью дефектов на основе механизма многократного упрочнения, а также публикация [9] с FWCI = 63, в которой исследуется новый класс материалов – Гетероструктурированные материалы, которые состоят из гетерогенных зон с резко отличающимися механическими или физическими свойствами.

5. Кластер **Graphene; Carbon Nanotubes; Nanotubes** Ведущие в России ученые: Назибулин (Институт науки и технологий Сколково) 76 публикаций, ср. FWCI = 1.06, Волков В.С. (МИФИ) 50 публикаций, ср. FWCI = 1.44, Сорокин П.Б. (МИСиС) 47 публикаций, ср. FWCI = 1.03; Арсенин А.В. (МФТИ) 39 публикаций, ср. FWCI = 1.59; Среди университетов ведущими являются: МФТИ (301 публикаций, ср. FWCI = 0.93), ИТМО (274 публикаций, ср. FWCI = 1.06), Институт науки и технологий Сколково (219 публикаций, ср. FWCI = 1.53), МИСиС (205 публикаций, ср. FWCI = 0.96), ТГУ (183 публикаций, ср. FWCI = 0.81). В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 66 тыс. публикаций), среди организаций – в китайский академии наук (более 8 тыс. публикаций). Ведущие журналы: ACS applied materials & interfaces, Physical Review B, Carbon, Applied Surface Science. Ведущей публикаций по FWCI является публикация [10] с FWCI = 139, в которой исследуется материал для изучения сильно коррелированных явлений, которые могут привести к пониманию физики высокочритических сверхпроводников и квантовых спиновых жидкостей, а также публикация [11] с FWCI = 167, в которой исследуются гибкие многофункциональные композитные пленки на основе полимеров, экранирующие электромагнитные помехи, эти материалы имеют важное применение в области коммуникационных технологий 5G, носимых электронных устройств и искусственного интеллекта.

6. Кластер **Reliability; Maintenance; Reliability Analysis**. Ведущие в России ученые: Рыков В.В. (Губкинский университет) 10 публ. ср. FWCI = 1.35, Козырев Д.В. (РУДН) 9 публ., ср. FWCI = 1.14, Иванова Н. М. (ИПУ), 8 публ., ср. FWCI = 1.14. Среди университетов ведущими являются – СФУ (19 публикаций, ср. FWCI = 1.14), МАИ (19 публикаций, ср. FWCI = 1.85) и МГСУ (19 публикаций, ср. FWCI = 1.61), Университет Решетнева (14 публикаций, ср. FWCI = 1.27). В мире больше всего по этому направлению публикаций из Китая (более 8 тыс. публикаций), среди организаций – в Байханском университете (более 720 публикаций). Ведущим журналом является журнал Reliability Engineering and System Safety. Ведущей публикацией (FWCI = 27) является публикация [12], в которой дается обзор задачи прогнозирования оставшегося срока службы оборудования на основе информации о его состоянии.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ РИД, НИР'ОВ И ДИССЕРТАЦИЙ

Был проведен анализ результатов интеллектуальной деятельности (РИД) и научно-исследовательских работ (НИР) на основе анализа ЕГИСУ за 2018-2023 год (на 18.09.2023). Был проанализирован массив из 70710 РИД, 51429 диссертации и 117709 НИОКР за 2018-2023 гг. и выделены направления ОмГТУ в области инженерных наук, в которых больше всего НИОКР. В табл. 1. представлен анализ направлений OECD, по которым выполнено больше всего НИР от ОмГТУ. Также представлены авторы этих НИР. Названия соответствующих направлений представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1
НАПРАВЛЕНИЯ OECD (КОД OECD), ПО КОТОРЫМ ВЫПОЛНЕНО БОЛЕЕ 10 НИОКР ЗА 2018-2023 ГГ., ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЕГИСУ, ТАКЖЕ В ТАБЛИЦЕ ПРЕДСТАВЛЕННЫ ЧИСЛО РИД, ДИССЕРТАЦИЙ (ДИС) И НИОКР ПО НАПРАВЛЕНИЮ OECD «MECHANICAL ENGINEERING»

OECD	РИД	Дис	НИОКР	Руководители НИОКР
ENGINEERING, AEROSPACE	30	4	31	Трушляков В.И.: 11; Иордан Ю.В.: 3; Блинов В.Н.: 2; Васильев Е.В.: 2; Жариков К.И.: 2; Чуранкин В.Г.: 1; Штеле В.Г.: 1; Кривонос Е.В.: 1; Черных И.К.: 1; Каменов Р.У.: 1; Погарский П.М.: 1; Лесняк И.Ю.: 1; Вавилов И.С.: 1; Русских Г.С.: 1; Ячменев П.С.: 1; Мясягин В.Б.: 1
ENGINEERING, MECHANICAL	66	15	30	Штеле В.Г.: 6; Васильев Е.В.: 5; Попов А.Ю.: 3; Щерба В.Е.: 2; Павлюченко Е.А.: 1; Тегжанов А.С.: 1; Юша В.Л.: 1; Черных И.К.: 1; Чуранкин В.Г.: 1; Захаренко В.А.: 1; Бусаров С.С.: 1; Кайгородов С.Ю.: 1; Иордан Ю.В.: 1; Русских Г.С.: 1; Косых А. В.: 1; Овсянников А.Ю.: 1; Шалай В.В.: 1; Глухов В.И.: 1
MECHANICAL ENGINEERING	9	3	23	Реченко Д.С.: 2; Слободина Е.Н.: 2; Вавилов И.С.: 2; Федоров А.А.: 2; Литвинов П.В.: 1; Медкова Э.Ю.: 1; Дронь М.М.: 1; Жариков К.И.: 1; Кайгородов С.Ю.: 1; Свищев А.В.: 1; Титов Ю.В.: 1; Балова Д.Г.: 1; Захаренков Н.В.: 1; Григорьев А.В.: 1; Иордан Ю.В.: 1; Бобков Н.В.: 1; Калашников А.М.: 1; Линовский А.В.: 1; Бубенчиков А.А.: 1

В сравнении с другими организациями России ОмГТУ входит по числу выполненных НИОКР в области машиностроения в число ведущих, что свидетельствует о существенном потенциале и значении ОмГТУ как в этих областях Машиностроения, так и в целом в области Инженерных наук.

ТАБЛИЦА 2
НАПРАВЛЕНИЯ OECD И 10 ОРГАНИЗАЦИЙ, ВЫПОЛНИВШИХ НАИБОЛЬШЕЕ КОЛИЧЕСТВО НИОКР, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЕГИСУ ЗА 2018-2023 ГГ.

Код	Название на англ. языке	Организация: число выполненных НИОКР
02.03.AI	ENGINEERING, AEROSPACE	МАИ: 85; Самарский университет: 78; ФГУП "ЦАГИ": 61; ОмГТУ: 31; ИТПМ СО РАН: 19; НГТУ: 17; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова: 17; МГУ: 16; АО «ЦЭНКИ»: 15; АО "ЦНИИМАШ": 15;
02.03.IU	ENGINEERING, MECHANICAL	ФГАОУ ВО "СПбПУ": 103; АО "НИКИЭТ": 62; МГУ: 60; ФГБНУ ФНАЦ ВИМ: 45; ИТ СО РАН: 45; ТулГУ: 42; ДГТУ: 34; ОмГТУ: 30; БГТУ им. В.Г. Шухова: 30; ТИУ: 27;
02.03.00	MECHANICAL ENGINEERING	МГУ: 74; ННГУ им. Н.И. Лобачевского: 34; ИПМех РАН: 23; ОмГТУ: 23; Тольяттинский государственный университет: 20; ИМАШ РАН: 14; АО "НЦВ Миль и Камов": 14; Томский государственный университет: 13; ИФПМ СО РАН: 12; ДГТУ: 11;

При анализе числа зарегистрированных РИД (табл. 3) ОмГТУ также входит в числу лидеров по таким направлениям машиностроения: ENGINEERING, MECHANICAL, однако по другим направлениям машиностроения ОмГТУ в 10 ведущих университетов не входит, что свидетельствует о прикладном направлении исследований в этом направлении в университете.

ТАБЛИЦА 3
НАПРАВЛЕНИЯ OECD И 10 ОРГАНИЗАЦИЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАВШИХ
НАИБОЛЬШЕЕ КОЛИЧЕСТВО РИД, ПО ДАННЫМ ЕГИСУ ЗА 2018-2023 ГГ.

Код	Название на англ. языке	Общее кол-во РИД	Организации выполнивших РИД
02.03.IU	ENGINEERING, MECHANICAL	3696	ФГБНУ ФНАЦ ВИМ: 753; ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ: 573; ТулГУ: 141; ФГБОУ ВО "КубГТУ": 119; ФГАОУ ВО "СПбПУ": 97; ОмГТУ: 66; РУДН: 49; БГТУ им. В.Г. Шухова: 48; НГТУ: 43; Московский Политех: 42
02.03.AI	ENGINEERING, AEROSPACE	1517	ФГУП "ВИАМ": 220; ФГУП "ЦАГИ": 160; МАИ: 81; Самарский университет: 79; АО "ОДК": 54; АО "ЦНИИМАШ": 43; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова: 40; ПАО "Корпорация "Иркут": 39; АО "ЛИИ им. М.М. Громова": 38; НИИ КС имени А.А. Максимова - филиал АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева": 35
02.03.RY	NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY	1089	ИБРАЭ РАН: 178; АО "ВНИИНМ": 158; НИЦ "Курчатовский институт": 124; АО "НИКИЭТ": 103; АО "ГНЦ РФ – ФЭИ": 95; АО "ГНЦ НИИАР": 52; АО "ПРОРЫВ": 47; ФГУП "ГХК": 46; АО "Диаконт": 41; АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ": 38

На рис. 3 представлена сводная диаграмма. При наличии таких достижений, как значимый публикационный поток со средним цитированием выше мирового или при наличии вхождения университета в топ-10 по общему количеству РИД или НИОКР в направлении OECD, либо лидерская позиция по числу защит организации присваивался балл.



Рис. 3. Анализ научного и инновационного потенциала в области «Машиностроение» ОмГТУ

Анализ рис. 3 позволяет сделать вывод о преобладании прикладной и поисковой науки в данной области. Целесообразно выравнивание показателей для устойчивого развития. Так, для научной составляющей необходимо усиливать взаимодействие с ведущими научными организациями, в том числе организациями РАН. Для увеличения развития инновационной составляющей необходимо развивать формы поощрения изобретательства и стимулирования коммерциализации результатов научной деятельности. Для увеличения средств привлеченных в рамках направления необходимо увеличить интенсивность работы с заказчиками.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводится концепция оценки направления науки университета на основе открытых данных по публикациям, результатам интеллектуальной деятельности, по числу защищенных в организации диссертаций, а также по числу выполненных НИР.

Исходя из концепции сбалансированного развития направлений, делаются формальные выводы о мерах стимулирования в университете науки и инноваций в данной предметной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Е. Б., Королев В. П. Карта науки в области Технологии материалов // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 2. С. 40–47. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-2-40-47.
2. Юдин Е. Б., Королев В. П. Карта науки в области электротехники, электроники и информационных технологий // Динамика систем, механизмов и машин. 2022. Т. 10, № 2. С. 78–87. DOI: 10.25206/2310-9793-2022-10-2-78-87.
3. Ishaq H., Dincer I., Crawford C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47, no. 62. P. 26238–26264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149.
4. Dai B., Liu C., Liu S. [et al.]. Life cycle techno-enviro-economic assessment of dual-temperature evaporation transcritical CO₂ high-temperature heat pump systems for industrial waste heat recovery // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 219. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119570.
5. Chalyj V., Moroz, S., Ptachenchuk V. [et al.]. Investigation of Waveforms of Roller Bearing's Working Surfaces on Centerless Grinding Operations // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III : proceedings of the 3rd International Conference The Innovation Exchange (Kharkiv, 9–12 June 2020). Cham : Springer, 2020. P. 249–360. DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_34.
6. Zhao G., Xin L., Li L. [et al.]. Cutting force model and damage formation mechanism in milling of 70wt% Si/Al composite // Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36, no. 7. P. 114–128. DOI: 10.1016/j.cja.2022.07.018.
7. Hao R.-B., Lu Z.-Q., Ding H., Chen, L. A nonlinear vibration isolator supported on a flexible plate: analysis and experiment // Nonlinear Dynamics. 2022. Vol. 108. P. 941–958. DOI: 10.1007/s11071-022-07243-7.
8. Kim J.G., Enikeev N.A., Seol J.B. [et al.]. Superior Strength and Multiple Strengthening Mechanisms in Nanocrystalline TWIP Steel // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. P. 11200. DOI: 10.1038/s41598-018-29632-y.
9. Zhu Y., Wu X. Heterostructured materials // Progress in Materials Science. 2023. Vol. 131. P. 101019. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2022.101019.
10. Cao Y., Fatemi V., Fang S. [et al.]. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices // Nature. 2018. Vol. 556. P. 43–50. DOI: 10.1038/nature26160.
11. Zhang Y., Ruan K., Zhou K., Gu J. Controlled Distributed Ti₃C₂T_x Hollow Microspheres on Thermally Conductive Polyimide Composite Films for Excellent Electromagnetic Interference Shielding // Advanced Materials. 2023. Vol. 35, no. 16. DOI: 10.1002/adma.202211642.
12. Lei Y., Li N., Guo L. [et al.]. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. 2018. Vol. 104. P. 799–834.

УДК 004.81+ 316.276+16.276

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-83-86

КОГНИТИВНЫЕ НАУКИ НА СОВРЕМЕННОМ УРОВНЕ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

COGNITIVE SCIENCES AT THE INTELLIGENCE DEVELOPMENT CURRENT LEVEL

В. И. Разумов

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, г. Омск, Россия

V. I. Razumov

Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

Аннотация. Появление когнитивных наук вызвано стремлением преодолеть кризис познания. Когнитивные подходы предусматривают новые онтологические и гносеологические представления о реальности, разработку и освоение инновационных методологий. Реальность описывается составленной физическим, психическим, знаниевым компонентами, причем знание выражает, в первую очередь, антропный аспект реальности. Кардинальные успехи в развитии искусственного интеллекта возможны на основе перехода естественного интеллекта на качественно новый уровень. Это предусматривает решение задач: совершенствования технологий автоматизации рассуждений, сочетание в исследованиях смысло-содержательных и формально-математических когнитивных конструкций.

Ключевые слова: естественный и искусственный интеллект, категориальные методы, когнитивные науки, междисциплинарные исследования, методология.

Abstract. The cognitive sciences emergence is caused by the desire to overcome the crisis of cognition. Cognitive approaches provide for new ontological and epistemological representations of reality, the development and development of innovative methodologies. Reality is described as composed of physical, mental, and knowledge components, and knowledge expresses, first of all, the anthropic aspect of reality. Cardinal successes in the development of artificial intelligence are possible on the basis of the transition of natural intelligence to a qualitatively new level. This provides for solving the following tasks: improving the technologies of reasoning automation, combining semantic-content and formal-mathematical cognitive constructions in research.

Keywords: natural and artificial intelligence, categorical methods, cognitive sciences, interdisciplinary research, methodology.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кант ставит вопрос об основаниях, на которых возможно познание. К этому вопросу возвращаются неопозитивисты. Если встать в исследовательскую позицию в отношении к типичному акту познания, то окажется, что организован он ненаучно! Исследователя за редкими исключениями интересуют специфики получения информации и знаний об объекте. К примеру, ученого мало интересует состояние среды, а также его собственное. В результате надежность исследований мала, объединять полученные таким образом материалы сложно. Выделим две проблемы. Узко-аспектные работы существенно преобладают над междисциплинарными работами. Развитие искусственного интеллекта сдерживается малыми результатами, достигнутыми в согласовании смысло-содержательных и формально-математических аспектов моделирования. В итоге, в развитии ис-

кусственного интеллекта, IT отрасли в целом обнаруживается явное отставание автоматизации рассуждений от автоматизации вычислений. Когнитивный подход предполагает установку на возможности усиления привычного познавательного процесса, когда известны предмет, метод, результат, на вопросы оценки (самооценки), в частности, таких характеристик: стремление в исследованиях учитывать ресурс от баланса межполушарной на одном объекте асимметрии головного мозга; длительность концентрации внимания без соскальзывания.

Остановимся здесь на осмыслении трех следующих формулировок: 1) о месте и роли когнитивных наук и моделирования в кризисе науки и образования XXI в., 2) о совершающейся сейчас радикальной смене научной картины мира, тесно связанной с развитием когнитивного подхода, изменении представлений о познании в целом, 3) о доступности и перспективах использования новых методов моделирования, начиная от конструкций интеллектуальных систем и интеллектики [1] до Категориальных методов, подразделяемых на категориально-системную методологию (КСМ) и теорию динамических информационных систем (ТДИС) [2].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Конкретные задачи, обсуждаемые в данной работе, формулируются относительно следующих положений. Интерес к когнитивистике в значительной мере вызван кризисными явлениями в науке, образовании, проектировании. Со 2-й половины XX в. и по мере роста ресурсов, выделяемых на интеллектуальную деятельность, возникают вопросы оценки эффективности этой деятельности. Появляется наукометрия, но результаты от ее применения неубедительны, за исключением применения библиометрических показателей к оценке деятельности всякого субъекта познания. Они позволяют точно оценивать конкретные показатели деятельности по количеству и качеству продуктов, производимых познающим субъектом (патенты, публикации, выступления, работа по договорам). А теперь посмотрим, чем чреваты оценка и управление учебным, научным, проектным процессами, основанные на библиографических показателях, в аспекте когнитологического подхода. Данный подход предполагает расширение представлений о познании, обучении, проектировании, когда в область интересов специалиста попадают, к примеру, нейрофизиологические процессы, эмоции. Когнитивные исследования представляют собой одну из попыток вывести науку и образование в область контроля со стороны общества (государства) над их эффективностью. Ограничимся пока выражением – в масштабах культуры и цивилизации человечества растет диспропорция между выделяемыми обществом ресурсами на науку и образование, и полезной продукцией, производимой учеными и преподавателями. Познавательный акт не менее сложен, чем осваиваемый с его помощью объект. Это касается таких показателей любого исследования, как его продолжительность, относительная/абсолютная ограниченность, критерии достоверности и др. В таком случае библиометрические показатели, которые должен демонстрировать сотрудник вуза, НИИ, в силу своего внешнего по отношению к индивидуальным особенностям творческих лабораторий отдельных исследователей и коллективов, вступают в противоречие с существом организации творческой деятельности. Фактически в деятельности научных издательств прослеживается все более ужесточающаяся цензура: столько-то ссылок сделать на публикации WoS, не ссылаться на учебники, диссертации.

Требования соответствия результатов работы субъектов не ориентировались на особенности протекания у них индивидуальных когнитивных процессов. Как это не парадоксально, но тема охраны, защиты, гигиены интеллектуального труда фактически не обсуждаются. Напротив, показатели эффективности деятельности ученых и преподавателей оказываются факторами, нарушающими когнитивные механизмы, а в целом тормозящими познание, и в первую очередь, предусматривающее внедрение его результатов в обучение, проектирование. Кроме задачи освобождения ученых и преподавателей от разрушающих их креативные, и не только, способности показателей оценки их деятельности, сформулируем две конструктивные задачи. Первое. Требуется сформировать новую картину мира, где большая роль отводится процессам синтеза, а расширение любого исследования следует разворачивать до применения в нем элементов когнитологического подхода. Имеется ввиду то, что всякий специальный познавательный процесс встроен в более общие. Вторая задача сводится к такой организации познания, где знания делятся на те, что передают смыслы и содержание (понятия, термины), и те, что организуют сам процесс рассуждения (категории), к примеру, это категориальная структура простого категорического силлогизма.

III. ТЕОРИЯ

Когнитивный поворот, развернувшийся в интеллектуальной культуре XXI в., предполагает серьезное осмысление того, в русле каких онтологических конструкций происходят существенные изменения познавательной деятельности. При понимании субстанции причиной себя (*causa sui* – лат.), человек не оставляет попытки установить, что есть субстанция как первооснова сущего. Из самопричинности субстанции не следует требования к ней – быть однородной. В этом ключе представляется удачной идея К.Р. Поппера мыслить реальность сочетанием трех миров: физического, психического, знания, с указанием на рост роли знания в реальности [3]. Распространенные положения о знании основываются на философской модели познания, где само познание есть процесс отражения реальности, а знание есть результат такого отражения.

Нам представляется, что знание есть аспект реальности наряду с физическими и психическими ее проявлениями. Отличие знания в том, что это продукт, получаемый в известной нам реальности человеческим обществом.

Важным для развития когнитивных наук является разграничение знания на понятия и категории. Категории, организованные в категориальные схемы, которые можно конструировать на морфологическом, функциональном, имитационном аспектах. В излагаемом здесь подходе, широкое применение находят триады категорий, в частности: что, как, зачем; потенциал, актуализация, воплощение; интерес, удивление переживание, и др.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Существо педагогического эксперимента заключается в использовании категориальных методов КСМ и ТДИС в обработке информации и знаний, относящихся к научной, учебной, проектной деятельности. Важнейшим критерием целесообразности категориальных методов является повышение эффективности познания за счет методологического потенциала, заложенного в каждую инструментальную конструкцию КСМ, ТДИС. С 1980 г. и по настоящее время автор ведет специальные курсы, мастер-классы, нацеленные на повышение когнитивной культуры исследователя. С 1999 г. автором в тесном сотрудничестве с В.П. Сизиковым по тематике категориальных методов были опубликованы 7 монографий, более 50 статей в изданиях, поддержанных ВАК РФ.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве результатов распространения когнитивной категориальной методологии несколькими специалистами были опубликованы монографии). К примеру, это [4-5]. По данным eLABRARY.RU, на публикации автора в системе зарегистрированы более 3000 ссылок [6]. Статус «когнитивные» обосновано распространять на категориальные методы, поскольку их используют специалисты разных направлений. Можно сделать вывод, что категориальные методы попали в поле зрения специалистов разного профиля, и они стали предметом обсуждения.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Феномен когнитивности выражает глубокие перемены, переживаемые интеллектуальной культурой. Строго говоря, когнитивными науками являются математика и логика, а в остальных науках имеется в виду, во-первых, насколько представители одной науки могут участвовать в изучении предметов других наук; во-вторых, в какой степени предметом осмысления выступает сам этот познавательный акт; в-третьих, насколько привлекаются такие дополнительные ресурсы как психофизиология исследователя, искусственный интеллект. В работе представлены разработки категориальных методов в форматах КСМ, ТДИС.

Когнитивный подход демонстрирует свою конструктивность, перспективность, эффективность, если принять онтологическое представление о том, что реальность имеет три аспекта: физический, психический, знаниевый, причем последний связывает и доступным человеку способом все три аспекта так, что единый Мир оказывается составленным множеством отдельных, но связанных объектов. Гносеологическим продолжением этого положения служит определение категорий как единиц знания, организующих процессы мышления. Теория и практика того, как это делается, даны в категориальных методах КСМ и ТДИС. Есть смысл задуматься о логистике интеллекта.

Успешность развития когнитивных наук определяется от их вклада в развитие искусственного интеллекта. В отношении к данной теме следует сказать, что мы придерживаемся гибридной версии искусственного интеллекта, где система искусственного интеллекта встроена в комплекс, к примеру, описанный И.С. Ладенко как интеллектуальная система, включающая компоненты: коллектив, предмет, задачи, техника, вычислительные средства, а ведущим процессом здесь выступает перераспределение функций между перечисленными пятью компонентами [7]. В нашем случае для перехода к участию в сильной версии искусственного интеллекта требуется повышение возможностей естественного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладенко И. С., Разумов В. И., Теслинов А. Г. Концептуальные основы теории интеллектуальных систем (систематизация методологических основ интеллектики) / отв. ред. И. С. Ладенко. Новосибирск, 1994. 270 с.
2. Разумов В. И. Эффективная методология и ее место в интеллектуальной культуре // Идеи и идеалы. 2023. Т. 15, № 2-1. С. 147–159. DOI: 10.17212/2075-0862-2023-15.2.1-147-159.
3. Поппер К. Логика и рост научного знания: избранные работы. М. : Прогресс, 1983. 605 с.
4. Боуш Г. Д. Бизнес-кластеры: категориально-системное представление : моногр. / под ред. В. М. Разумовского. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. 244 с. ISBN 978-5-7779-1252-7.
5. Аксютина З. А. Категориальная система социального воспитания: концептуальные основы. Омск : Изд-во ОмГПУ, 2022. 248 с. ISBN 978-5-8268-2321-7.
6. Поиск авторов // eLIBRARY.RU : науч. электр. б-ка : сайт. М., 2000. URL: <https://www.elibrary.ru/authors.asp> (дата обращения: 31.08.2023).
7. Ладенко И. С. Интеллектуальные системы и логика : моногр. Новосибирск: Наука, 1973. 172 с.

УДК 338.1

DOI: 10.25206/2310-9793-2023-11-2-87-92

ПРИМЕНЕНИЕ ИНСЕЙФИНГА ДЛЯ АНАЛИЗА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ В ОРГАНИЗАЦИИ

THE USE OF INSAFING FOR THE ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES IN AN ORGANIZATION

А. В. Шастин

ООО «Рэдиум Инвестиции», г. Омск, Россия

A.V. Shastin

Radium Investments LLC, Omsk, Russia

Аннотация. Инсейфинг позволяет формировать, обсуждать задачи из сферы науки, образования, проектирования. Под инсейфингом понимается интеллектуально-коммуникативная технология, которая начинает формироваться на базе теории динамических информационных систем. Таким образом, инсейфинг, как приложение ТДИС, обладает большим потенциалом для визуализации мыследеятельности, обобщающего традиционные схемотехники благодаря наличию специальных правил, структур и собственного языка для реинжиниринга и оптимизации бизнес-процессов. В статье рассмотрено применение инсейфинга для анализа бизнес-процессов, выделения процессов, которые должен контролировать и оптимизировать непосредственно собственник. В результате применения инсейфинга для анализа и оптимизации бизнес-процессов организации были получены триады, которые позволяют определить факторы успеха хозяйствующего субъекта в современной экономике. Это квалифицированный персонал, достойное вознаграждение, деление управления на тактический и стратегический уровни, развитые каналы обмена информацией и нематериальная мотивация.

Ключевые слова: инсейфинг, теория динамических информационных систем, реинжиниринг бизнес-процессов, материальная и нематериальная мотивация, информационный канал, тактическое и стратегическое управление.

Abstract. Insafing allows you to form and discuss tasks from the field of science, education, design. Insafing is understood as an intelligent interactive communication technology that begins to form on the basis of the theory of dynamic information systems. Thus, insafing, as a TDIS application, has a great potential for visualizing our activity, generalizing traditional circuit techniques due to the presence of special rules, structures and its own language for reengineering and optimizing business processes. The article discusses the use of insafing for the analysis of business processes, highlighting the processes that the owner should control and optimize directly. As a result of the use of insafing for the analysis and optimization of business processes of the organization, triads were obtained that allow determining the success factors of an economic entity in the modern economy. These are qualified personnel, decent remuneration, division of management into tactical and strategic levels, developed channels of information exchange and intangible motivation.

Keywords: insafing, theory of dynamic information systems, business process reengineering, material and non-material motivation, information channel, tactical and strategic management.

I. ВВЕДЕНИЕ

Язык схем формируется в реинжиниринге бизнес-процессов, где создается нотация для всех изображений, используемых в схемах. [1] Для описания бизнес-процессов применяются специальные программные про-

дукты, универсальный язык, которые могут интерпретировать профессионалы в процессе автоматизации деятельности. Однако испытанные инструменты описания бизнес-процессов эффективны для фиксации действующих или существующих бизнес-процессов (описания их в формате «as is»). Для оптимизации работы организации необходим реинжиниринг бизнес-процессов, их совершенствование. При решении этой задачи рекомендуется создавать проектные команды, в которых организовывать коммуникацию и вырабатывать новые идеи, совершенствовать процессы.

Хорошим примером является ОДИ (организационно-деятельностная игра), моделирующая процессы в фирме. В ходе ОДИ вырабатываются новые идеи, осуществляется коммуникация. Все идеи визуализируются в схемах, что повышает креативность взаимодействия. Однако эффективность коммуникации, полнота проработки нарушается из-за отсутствия единых правил толкования схем, что требует время на дополнительное согласование идей и понятий.

Продолжением ОДИ является инсейфинг. Он позволяет формировать, обсуждать задачи из сферы науки, образования, проектирования. Под инсейфингом понимается интеллектуальноемкая интерактивная коммуникативная технология, которая начинает формироваться на базе теории динамических информационных систем. [2] Таким образом, инсейфинг, как приложение ТДИС, обладает большим потенциалом для визуализации мыслительности, обобщающего традиционные схематехники благодаря наличию специальных правил, структур и собственного языка для реинжиниринга и оптимизации бизнес-процессов.

В статье будет рассмотрено применение инсейфинга для анализа бизнес-процессов, выделения жизненно-важных процессов, которые должен контролировать и оптимизировать непосредственно собственник.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Инсейфинг начал формироваться с 2012 г. Он находит применение и распространяется как новая технология коммуникации в областях проектирования бизнеса, управления, в научных исследованиях, в учебной практике. Развитие инсейфинга стало ответом на вызов по усложнению бизнеса, повышению ускорения изменения внешней среды. Рост актуальности инсейфинга, как гибридной технологии повлекло развитие COVID-19. Из-за него появились гибридные офисы (делают возможным дистанционную работу сотрудников), фрилансеров. Данное явление требует изменения бизнес-процессов, организационной структуры и системы управления хозяйствующего субъекта.

Предпосылками для этого являются гибкий график работы сотрудников, отсутствие необходимости постоянного присутствия в офисе, наличие постоянного доступа в помещение офиса. В результате скорректировались форматы офисов, появились коворкинги, где можно периодически организовывать встречи, коллективную работу, рабочее пространство легко адаптируется под задачи.

Все это ведет к тому, что перспектива сохранить бизнес и развивать его имеется только у тех, кто способен генерировать новые идеи, формировать новые способы для их реализации. Данные предпосылки определяют задачу настоящей статьи: привлечь инсейфинг, как опыт синтеза организационно-деятельностной игры и реинжиниринга бизнес-процессов, изучить сущность бизнес-процессов на фокус-группе, применяющей инсейфинг. В статье будет проанализирована существующая модель бизнес-процессов, совершенная модель, к которой необходимо стремиться, процедура коррекционных мероприятий.

III. ТЕОРИЯ

Методологической основой инсейфинга является теория динамических информационных систем (ТДИС). Данную теорию можно применять как инструмент организации знания. Динамическая информационная система – граф с вершинами (категориями) и ведущими и контролирующими ребрами. Для такой информационной системы разработаны операции дешифровки, мутации, свертки, которые позволяют решать указанные в соответствующем разделе настоящей статьи задачи. ТДИС позволяет согласовать в моделировании содержательно-смысловую и формально-математический аспекты.

ТДИС можно применять не только в моделировании, но и в анализе. Применение данной теории в аспекте анализа бизнес-процессов позволяет увидеть их (бизнес-процессов) характеристики, и в дальнейшем с ис-

пользованием гомеостатических моделей [3], интеллектуальных систем [4] в категориально-системной методологии [5] смоделировать оптимальную систему бизнес-процессов в хозяйствующем субъекте.

ТДИС создавался в конце 1990-х годов для поиска когнитивных инструментов анализа процессов и выражения их в схемах, описывающих их смысло-содержательные характеристики. Опыт визуализации данных инструментов позволил создать набор универсальных схем в интеллектуальной схемотехнике. Это убедило в необходимости создания класса информационных объектов под названием ДИС, которые по своей сути являлись аналитическим объектом, выступающим универсальной когнитивной оболочкой для моделей объектов любого типа. [6]

Инсейфинг представляет собой следующую технологию. Сначала определяется центральное понятие – тема для обсуждения. Далее следует процедура дешифровки на 3 категории. Это первый уровень дешифровки, на котором каждой категории присваивается индекс – 0, 1 и 2. Категория с индексом 0 описывает сущностные характеристики центрального понятия, определяются составляющие центрального понятия, элементы из которых оно состоит. Категория с индексом 1 – технологические аспекты центрального понятия. Основными вопросами являются: какие технологии применяются при осуществлении деятельности с центральным понятием, какие операции используются, какие инструменты применяются для работы с центральным понятием. Наиболее сложным является категория или вершина графа с индексом 2. Она описывает мегасистему, куда включено центральное понятие инсейфинга. При описании категории необходимо ответить на вопросы: зачем, какие правила для гармоничного взаимодействия между элементами центрального понятия и инструментами работы с ним, в какую систему большего порядка входит центральное понятие инсейфинга и т. д. Таким образом, категория с индексом 2 является собирающей категории с индексом 0 и 1. Она может служить определенной проверкой на правильность дешифровки центрального понятия.

При необходимости, дешифровка может проводиться более подробно. Тогда каждой категории (вершине графа) присваивается дополнительный индекс. При втором уровне дешифровки каждая вершина треугольника первой дешифровки разбивается еще также на треугольник с категориями: составляющие, инструменты и технологии, система большего порядка. Такой принцип и порядок дешифровки может осуществляться до бесконечности.

Принцип дешифровки с помощью треугольников или триады понятий в ТДИС является оптимальным и позволяет представлять процессы на структурном, функциональном и имитационном уровнях.

После дешифровки можно применить мутации, которые представляют собой перестановку вершин треугольников (триад) по определенным правилам. В результате при дешифровке 2 уровня появляются 6 новых триад, у которых нет названия. Для формирования названия необходимо проводить операцию свертки – из набора дешифровок сформировать центральное понятие у каждой триады, возникшей в результате мутации. Использование дешифровки, мутации и свертки создает эвристический эффект, когда появляются новые направления мыследеятельности, появляются новые идеи и аспекты центрального понятия, на которые раньше не обращалось внимание. В деятельности по реинжинирингу бизнес-процессов применение указанных операций позволяет увидеть хозяйствующий субъект как целое, определить «узкие места», выявить направления оптимизации бизнес-процессов, сформировать оптимальную процессную модель компании, позволяющую достичь поставленные цели.

Таким образом, инсейфинг представляет собой технологию коммуникации по заданным правилам, за счет чего могут получиться новые интеллектуально емкие результаты. Это позволяет использовать инсейфинг, как интеллектуально емкую технологию коммуникации в проектировании бизнеса, управлении, реинжиниринге бизнес-процессов, научных исследованиях и обучении.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Технология инсейфинга для анализа и проектирования сложных систем и процессов. Для целей настоящей статьи в качестве центрального понятия был использован «бизнес-процесс». На камеральной стадии автором была проведена дешифровка с использованием триады вопросов «Что? Как? Зачем?». Результаты представлены в таблице 1. Итоги этапа были получены в результате интерактивного этапа и обозначены в соответствующей колонке таблицы.

ТАБЛИЦА 1
ВОПРОСЫ К ИНСЕЙФИНГУ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕРАКТИВНОЙ СТАДИИ
ПО ТЕМЕ «БИЗНЕС-ПРОЦЕСС»

Вопрос	Итог этапа
Что является составляющими бизнес-процесса: <ul style="list-style-type: none"> • 00 – исполнители; • 01 – менеджмент, руководители; • 02 – собственник или собственники. 	Люди или персонал организации, которые есть в организации.
Какие технологии используются при осуществлении бизнес-процессов: <ul style="list-style-type: none"> • 10 – операционный менеджмент; • 11 – управленческие технологии; • 12 – технологии собственника. 	Технологии, используемые в бизнес-процессах, отличаются в зависимости от уровня сотрудника, применяющего их. Также в зависимости от уровня технологии регламентируются определенными документами.
Результаты бизнес-процесса: <ul style="list-style-type: none"> • 20 – Оплата труда исполнителей; • 21 – Баланс карьерных достижений и оплаты труда; • 22 – Миссия, прибыль. 	Для исполнителей важна материальная мотивация, для менеджмента или управленцев важным является еще и возможность самовыражения, и только собственника волнует мировоззренческий аспект организации (зачем построена организация, в чем смысла ее существования).

Итогом дешифровки явились:

- персонал организации должен обладать определенной квалификацией для осуществления бизнес-процессов;
- при наличии нужного уровня квалификации сотрудников и выполнения бизнес-процессов на необходимом уровне, персонал получит требуемую оплату труда;
- действует и обратная зависимость: если персоналу платить меньше, он будет выполнять свои обязанности хуже.

Данная триада получила свое название, как триада материальной мотивации. Далее были проведены мутации по заданным правилам инсейфинга. Результаты отражены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2
ПЕРВАЯ МУТАЦИЯ ПО ТЕМЕ «БИЗНЕС-ПРОЦЕСС»

Элементы	Наименование триады
00 – Исполнители 10 – Операционный менеджмент 20 – Оплата труда исполнителей	Материальная мотивация исполнителей
01 – Менеджмент, руководители 11 – Управленческие технологии 21 – Баланс карьерных достижений и оплаты труда	Материальная мотивация менеджмента
02 – Собственник или собственники 12 – Технологии собственника 22 – Миссия, прибыль	Материальная мотивация собственника

В результате обсуждения на интерактивной фазе, данная триада получила свое название, как триада тактического управления. Для получения нужного результата на тактическом управлении (в краткосрочной перспективе), персонал и собственник становятся подчиненными к менеджменту. Управленческий слой становится главным при достижении тактических целей.

ТАБЛИЦА 3
ВТОРАЯ МУТАЦИЯ ПО ТЕМЕ «БИЗНЕС-ПРОЦЕСС»

Элементы	Наименование триады
00 – Исполнители 11 – Управленческие технологии 22 – Миссия, прибыль	Понимание исполнителями желаний и требований собственника
01 – Менеджмент, руководители 12 – Технологии собственника 20 – Оплата труда исполнителей	Понимание менеджментов желаний и требований собственника
02 – Собственник или собственники 12 – Операционный менеджмент 22 – Баланс карьерных достижений и оплаты труда	Собственник должен уметь управлять исполнителями и руководителями, доносить до них свои желания и требования

В таблице 3 представлена триада понимания или потока информации. С одной стороны, желания и требования собственника одинаково понимаются менеджментом и исполнителями. Умением транслировать свои цели и потребности должен обладать собственник и применять для этого соответствующие технологии и инструменты. Аналогично движется информационный поток в обратном направлении – от исполнителей и управленцев к собственнику. Если движение информации в организации происходит в двух направлениях без помех, желания собственника и требования исполнителей и руководителей доносятся до каждого уровня корректно, то такая организации достигает успеха и является конкурентоспособной на рынке.

ТАБЛИЦА 4
ТРЕТЬЯ МУТАЦИЯ ПО ТЕМЕ «БИЗНЕС-ПРОЦЕСС»

Элементы	Наименование триады
00 – Исполнители 22 – Миссия, прибыль 11 – Управленческие технологии	Управление на основе миссии, придание значимости работы в организации для исполнителей, причастность к миссии
20 – Оплата труда исполнителей 01 – Менеджмент, руководители 12 – Технологии собственника	Привлекательность результатов, мотивация, престижность, возможность участия в собственности у менеджмента
02 – Собственник или собственники 22 – Баланс карьерных достижений и оплаты труда 12 – Операционный менеджмент	Достойные условия для работы с высоким уровнем производительности, добросовестный труд

В таблице 4 представлена триада внутренней нематериальной мотивации для каждого управленцев и исполнителей. Для достижения высокого уровня эффективности на каждом уровне собственник должен применять корректные инструменты, использовать управленческие и операционные технологии. Также важным является формирование и транслирование миссии организации, важности работы в ней, причастности. Это доносит-ся через корпоративную культуру.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее важными результатами, которые требуют обсуждения и дальнейшей проработки, являются.

- Собственник должен отделять себя от предприятия. Следовательно, он должен выполнять определенные функции, иметь свою должностную инструкцию. Как правило, это вопросы стратегии, настройка системы управления, информационных потоков в организации.

- Выполнению собственником своих функций в ВУЗах, на МВА не учат. Образование предусмотрено для освоения управленческих технологий, операционного менеджмента. Следовательно, собственнику придется самостоятельно получать необходимые навыки.

- У собственника, как у любого сотрудника в организации, должен быть начальник, который будет контролировать соблюдение им правил, выполнение им необходимых функций. Это может быть совет директоров.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате применения инсейфинга для анализа и оптимизации бизнес-процессов организации были получены триады, которые позволяют определить факторы успеха хозяйствующего субъекта в современной экономике. Во-первых, это необходимость квалифицированного персонала и предъявление к нему соответствующих требований. За свой труд исполнители и управленцы должны получать достаточное вознаграждение.

Во-вторых, деление на тактический и стратегический уровень управления. Тактические результаты достигаются с помощью управленческих технологий и операционного менеджмента. Соответственно, данные технологии должны быть настроены, внедрены необходимые стандарты. Стратегический уровень управления осуществляет собственник. Ему необходимо научиться навыкам целеполагания, настройки системы управления и т. д.

Важным аспектом успешности и конкурентоспособности хозяйствующего субъекта является канал коммуникации. Донесение требований собственника до управленцев и в обратном направлении без искажений – основа своевременной реакции на изменения внешней среды и быстрой адаптации организационной структуры.

Завершающим элементом успеха хозяйствующего субъекта является нематериальная мотивация. Собственник должен обладать миссией, стратегическим видением будущего организации, формировать смыслы и системы мотивации для исполнителей и управленцев. Для этого ему требуется понимать, что важно для различных категорий персонала, как облечь эти потребности в корректную (мотивирующую) форму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фирсова Н. В. Инструментальные средства моделирования бизнес-процессов и оценка их применения для целей реинжиниринга // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. Менеджмент. 2005. Вып. 4. С. 100–119.
2. Рыженко Л. И. Когнитивный инжиниринг : моногр. Омск : Изд-во СибАДИ, 2012. 171 с.
3. Горский Ю. М. Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония живых, природных, социальных и искусственных систем. Иркутск : Изд-во ИГЭА, 1998. 337 с. ISBN 5-7253-0217-2.
4. Ладенко И. С., Разумов В. И., Теслинов А. Г. Концептуальные основы теории интеллектуальных систем (систематизация методологических основ интеллектики) / Ин-т философии и права СО РАН ; отв. ред. И. С. Ладенко. Новосибирск, 1994. 270 с.
5. Разумов В. И. Категориально-системные методы в подготовке ученых : учеб. пособие. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2004. 277 с. ISBN 5-777-9-0447-5.
6. Разумов В. И., Рыженко Л. И., Сизиков В. П. Инсейфинг – технология интерактивной интеллектуальной коммуникации // Вестник Омского университета. 2015. № 4. С. 94–100.