

ИЗВЕСТИЯ САМАРСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

IZVESTIYA OF SAMARA SCIENTIFIC CENTER
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

www.ssc.smr.ru



Издательство
Самарского федерального исследовательского центра
Российской академии наук

Известия Самарского научного центра Российской академии наук

Том 25, № 1(111), 2023

Основан в 1999 г. Выходит 6 раз в год. ISSN: 1990-5378

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре, свидетельство ПИ № ФС77-61347 от 07.04.2015

Главный редактор

Ф.В. Гречников

Заместители главного редактора

Я.А. Ерисов, А.В. Васильев

Ответственный секретарь

В.О. Соколов

Редакционный совет

С.Н. Шевченко, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук (председатель совета);

Ф.В. Гречников, академик РАН, доктор технических наук;

А.И. Рудской, академик РАН, доктор технических наук;

О.М. Буранок, доктор педагогических наук, доктор филологических наук;

А.Н. Пашкуров, доктор филологических наук;

Г.А. Баталова, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук;

Г.С. Розенберг, член-корреспондент РАН, доктор биологических наук;

Ю.П. Аншаков, доктор исторических наук;

Г.П. Аншаков, член-корреспондент РАН, доктор технических наук;

К.В. Никифоров, доктор исторических наук;

В.П. Шорин, академик РАН, доктор технических наук

Редакционная коллегия

Машиностроение, информационные технологии и телекоммуникации:

Н.Ф. Аверкиев, Д.В. Антипов, Г.П. Аншаков, Р.Н. Ахметов, В.И. Батищев, А.С. Бугаев,

Ю.Н. Горелов, А.Ф. Денисенко, А.М. Дмитриев, Ю.С. Клочков, Н.В. Носов, Г.В. Смирнов,

С.В. Смирнов, В.А. Соболев, Б.В. Соколов, В.А. Сойфер, А.Х. Султанов, А.И. Хаймович,

В.Г. Халин, В.И. Хищенко, Е.В. Шахматов, В.Г. Шуваев, Е.А. Щепаккина, А.В. Юрков, С.И. Ярьсько

Экология – технические науки:

Д.Е. Быков, А.В. Васильев, В.Д. Кальнер

Выпускающий редактор

С.С. Мещеряков

Адрес редакции: 443001, г. Самара, Студенческий пер., 3а
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Тел. +7(846) 340-06-20. И.о. зав. редакцией: Н.Ю. Кузнецова

электронная версия – www.ssc.smr.ru/izvestiya.shtml

Самара

Издательство Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Самарский федеральный
исследовательский центр
Российской академии наук, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2023

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Исследование остаточных напряжений, возникающих при инкрементальном формообразовании <i>В.А. Разживин</i>	5
Модель цифровой трансформации организации производства для предприятий фармацевтической отрасли <i>Л.Р. Мухаматгалеева</i>	10
Потенциал технологического развития нефтехимического комплекса <i>Д.Б. Флак</i>	17
Некоторые аспекты обеспечения технологического суверенитета научно-производственного предприятия <i>А.И. Шинкевич, В.А. Шогенов</i>	23
Создание цифрового двойника процесса сборки рабочего колеса компрессора <i>Е. Ю. Печенина</i>	28
Математические модели объектов контроля и диагностики для определения технического состояния систем электроснабжения летательных аппаратов <i>М.Х. Дуббесса</i>	36
Разработка методики построения и исследования технологических систем в условиях автоматизации производства летательных аппаратов <i>А.Н. Коптев, С.Ф. Тлустенко</i>	43
Разработка и исследование методов построения инновационного производства в самолетостроении <i>С.Ф. Тлустенко</i>	48
Межструктурное взаимодействие в современных организациях <i>Е.С. Окуневич, В.Ю. Смелов, С.А. Шереметьева, В.Л. Шпер, Е.И. Хунузиди</i>	55

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

О некоторых методах расчёта состояния посевов в сервисе цифрового двойника растений <i>П.О. Скобелев, А.С. Табачинский, Е.В. Симонова, Ю.Н. Журавель, Г.Н. Мятова</i>	67
Организация передачи сигнальных сообщений в вычислительных сетях летательного аппарата <i>А.В. Жаринов</i>	76
Инновационное развитие вузовской учебно-лабораторной базы для работы с современными информационно-телекоммуникационными системами в условиях цифровой экономики <i>С.А. Сарычева, В.А. Надежкин, А.Л. Золкин</i>	83
К вопросу подготовки специалистов в сфере телекоммуникационных технологий на железнодорожном транспорте <i>А.О. Кочетова, В.А. Надежкин, А.Л. Золкин</i>	92
Диагностическая модель вертолетного турбовального двигателя <i>В.П. Кажяев, Д.Ю. Киселев, Ю.В. Киселев</i>	99

ЭКОЛОГИЯ – ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Конфигурация ресурсосберегающей системы обращения электронной техники в целях создания безопасной среды жизнедеятельности <i>Э.С. Цховребов, Ф.Х. Ниязгулов</i>	107
Получение жидкого топлива из кородревесных отходов длительного срока хранения методом гидротермального охижения <i>Ю.В. Куликова, Н.И. Орлов, С.А. Сухих, О.О. Бабич, В.Н. Кортаев</i>	117
Исследование влияния тяжелых металлов на микробиоценозы залива Петра Великого японского моря на примере микроводорослей и бактерий в условиях лабораторного эксперимента <i>А.В. Огнистая, Т.И. Дункай, И.Г. Тананаев, Ж.В. Маркина</i>	128

CONTENTS

Number 1, 2023

MECHANICAL ENGINEERING, MACHINE SCIENCE

Investigation of Residual Stresses Arising during Incremental Shaping <i>V.A. Razzhivin</i>	5
Model of Digital Transformation of the Organization of Production for Enterprises in the Pharmaceutical Industry <i>L.R. Muchamatgaleeva</i>	10
Technological Development Potential of the Petrochemical Complex <i>D.B. Flaks</i>	17
Some Aspects of Ensuring the Technological Sovereignty of a Scientific and Production Enterprise <i>A.I. Shinkevich, V.A. Shogenov</i>	23
Create a Digital Twin of the Compressor Impeller Assembly Process <i>E.Yu. Pechenina</i>	28
Mathematical Models of Object Monitoring and Diagnosing for Aircraft Onboard Electrical Systems to Determine their Technical Conditions <i>M.H. Dubbessa</i>	36
Development of a Methodology for Constructing and Researching Technological Systems in the Context of Automation of the Production of Aircraft <i>A.N. Koptev, S.F. Tlustenko</i>	43
Development and Study of Methods for Building Innovative Production in Aircraft Construction <i>S.F. Tlustenko</i>	48
Cross-Structural Interaction in Modern Organizations <i>E.S. Okunevich, V.Yu. Smelov, S.A. Sheremetyeva, V.L. Shper, E.I. Khunuzidi</i>	55

INFORMATICS, COMPUTER SCIENCE AND CONTROL

Regarding Some of the Methods for Crop State Calculation in Digital Twin of Plant <i>P.O. Skobelev, A.S. Tabachinskiy, E.V. Simonova, Yu.N. Zhuravel, G.N. Miatov</i>	67
Organization of the Transmission of Signaling Messages in the Computer Networks of the Aircraft <i>A.V. Zharinov</i>	76
Innovative Development of University Educational and Laboratory Facilities for Working with Modern Information and Telecommunication Systems in the Conditions of Digital Economy <i>S.A. Sarycheva, V.A. Nadezhkin, A.L. Zolkin</i>	83
To the Issue of Training of Specialists in the Field of Telecommunication Technologies in the Railway Transport <i>A. O. Kochetova, V.A. Nadezhkin, A.L. Zolkin</i>	92
Diagnostic Model of Helicopter Turboshaft Engine <i>V.P. Kazhaev, D.Y. Kiselev, Y.V. Kiselev</i>	99

ECOLOGY – TECHNICAL SCIENCES

Configuration of a Resource-Saving Electronic Equipment Circulation System in Order to Create a Safe Living Environment

E.S. Tskhovrebov, F.H. Niyazgulov

107

Production of Liquid Fuel from Long-Term Storage

Wood Waste by Hydrothermal Liquidation

Yu.V. Kulikova, N.I. Orlov, S.A. Sukhikh, O.O. Babich, V.N. Korotaev

117

Study of the Influence of Heavy Metals on the Microbiocenosis of Peter the Great Bay of the Sea of Japan on the Example of Microalgae and Bacteria under the Conditions of a Laboratory Experiment

A.V. Ognistaya, T.I. Dunkai, I.G. Tananaev, Zh.V. Markina

128

УДК 621.7.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ
ПРИ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОМ ФОРМООБРАЗОВАНИИ**

© 2023 В.А. Разживин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
Самара, Россия
Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2023

В статье выполнены исследования по определению величины остаточных напряжений, возникающих при инкрементальном формообразовании усеченного конуса, в зависимости от угла наклона его образующей. Для оценки остаточных напряжений использовался метод разрезки колец, по результатам которого выявлено, что кольца, вырезанные по высоте изготовленных конических деталей, при разрезке смыкаются. Это свидетельствует о формировании при инкрементальном формообразовании сжимающих окружных напряжений. Также после разрезных колец наблюдается незначительное осевое смещение концов кольца, что говорит о наличии осевых остаточных напряжений, величина которых пренебрежительно мала по сравнению с величиной окружных. С увеличением степени деформации при инкрементальном формообразовании (увеличении угла конусности) величина остаточных напряжений уменьшается.

Ключевые слова: инкрементальное формообразование, остаточные напряжения, угол конусности, метод разрезных колец.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-5-9

Работа выполнена в рамках гранта МД-936.2022.4

Инкрементальное формообразование – одна из наиболее перспективных и быстро развивающихся технологий обработки листового материала давлением. Ее суть заключается в локальном поэтапном деформировании отдельных частей листовой заготовки сферическим пуансоном, размеры которого намного меньше размеров изделия, путем его перемещения по заданной траектории. Листовая заготовка при этом жестко закреплена по периметру [1-2]. Пуансон при инкрементальном формообразовании может управляться роботизированным манипулятором или станком с числовым программным управлением.

В виду локального очага пластической деформации, а также многократного чередования нагружения и упругой разгрузки большой интерес представляет возникновение остаточных напряжений при инкрементальном формообразовании. Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на усталостную прочность, коррозионную стойкость и точность формы изготавливаемых изделий. В некоторых случаях усталостная прочность и устойчивость детали к коррозии могут быть улучшены за счет

правильного распределения остаточных напряжений, что продлевает срок службы и долговечность изделия [3].

Сравнительно небольшое количество исследований направлено на изучение остаточных напряжений и особенности их возникновения при инкрементальном формообразовании.

Такака и др. [4] при моделировании процесса инкрементального формообразования установили, что с противоположных сторон листовой заготовки возникают различные по знаку остаточные напряжения. Это различие приводит к пружинению и неточности геометрических размеров при отрезании части изделия. Radu и др. [5] установили, что искажение формы происходит из-за растягивающих остаточных напряжений, которые формируются при инкрементальном формообразовании на внешней поверхности изделия, противоположной приложенной нагрузке. При этом уменьшение геометрических отклонений происходит как при уменьшении, так и при увеличении остаточных напряжений. Обычно считается, что уменьшение остаточных напряжений минимизирует неточности изготовления деталей при обработке металлов давлением [6].

В большинстве работ, посвященных исследованиям распределения остаточных напряже-

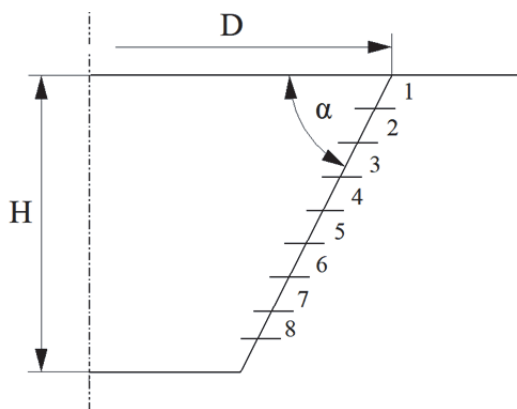
Разживин Василий Андреевич, аспирант Самарского университета, инженер отдела металлофизики и авиационных материалов СамНЦ РАН.

ний при инкрементальном формообразовании, используется рентгенографический метод [7]. Однако при помощи данного метода можно исследовать только остаточные напряжения второго и третьего рода. Более того во время подготовки образца к измерению часть остаточных напряжений снимается при его отрезке [8].

В связи с этим, целью данного исследования является определения остаточных напряжений первого рода (в объеме тела) в изделиях с различным углом конусности, полученных при инкрементальном формообразовании.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе для оценки величины остаточных напряжений при инкрементальном формообразовании, было изготовлено три детали в форме усеченного конуса из алюминиевого сплава Д16АМ толщиной 1 мм с углом наклона образующей $\alpha = 50^\circ, 55^\circ$ и 60° (рисунок 1). Большой диаметр конусов D составлял 90 мм, высота конусов H отличалась для каждого конуса и со-



а



б

Рисунок 1 – Схема (а) и общий вид деталей (б) после инкрементального формообразования

ставляла 35, 45 и 40 мм соответственно.

В качестве деформирующего оборудования использовался промышленный робот-манипулятор KUKA KR 160 nano с установленным сферическим пуансоном диаметром 12 мм. Заготовка при этом ставилась на специальный горизонтальный стол и жестко фиксировалась при помощи механических зажимов (рисунок 2).

Деформирование осуществлялось послойно с шагом перемещения пуансона 0,5 мм. В процессе формообразования использовалась жидкая смазка на основе минеральных масел.

После формообразования конусы были разрезаны по высоте на кольца шириной 5 мм. Для избежания возникновения остаточных напряжений в процессе резки использовался электроэрозионный проволочно-вырезной станок DK7745.

Для измерения остаточных напряжений использовался метод разрезных колец, суть

которого заключается в разрезе кольца по образующей, что приводит к его смыканию или раскрытию, по величине которого определяется величина и знак остаточных напряжений [9].

Для расчета величины остаточных напряжений использовалась следующая формула:

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{E \cdot t}{1 - \mu^2} \cdot \frac{D_1 - D_0}{D_1 \cdot D_0},$$

где E – модуль упругости; t – толщина стенки кольца; μ – коэффициент Пуассона; D_0 – среднее значение внешнего диаметра кольца до разрезки; D_1 – среднее значение внешнего диаметра кольца после разрезки, (в сечении, перпендикулярном линии реза).

В расчетах использовался средний диаметр конического кольца, равноудаленный от большего и меньшего диаметров. Упругие константы для сплава Д16АМ принимались равными $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,36$ [10].

Замеры диаметров до и после разрезки кольцевых образцов проводились с помощью штангенциркуля (ШЦ-1-150, точность $\pm 0,05$

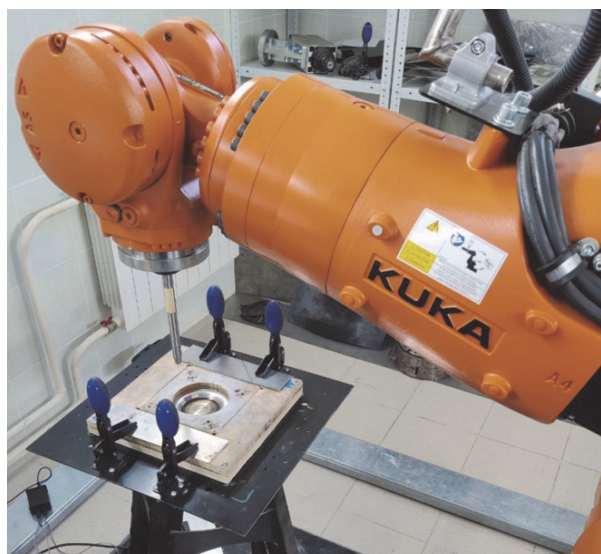
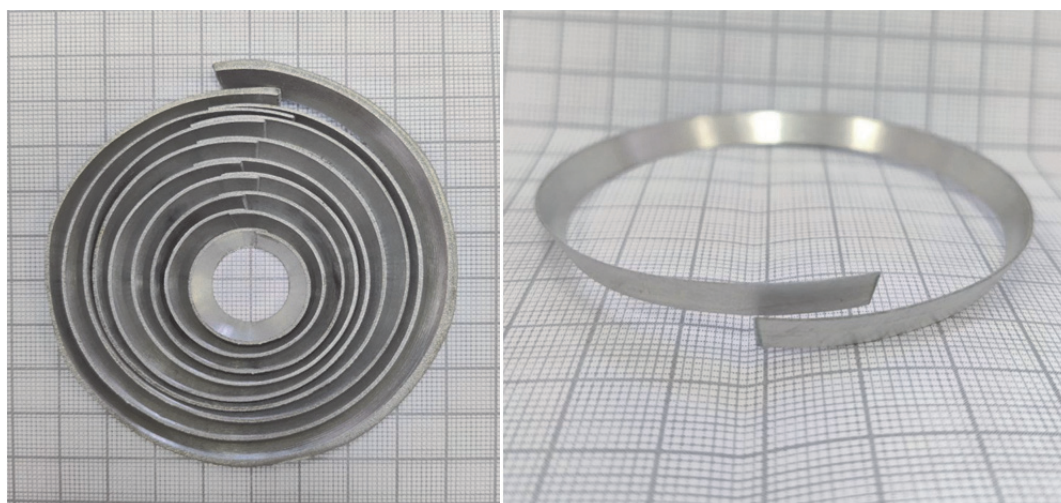


Рисунок 2 – Установка инкрементального формообразования с горизонтальным столом



а

б

Рисунок 3 – Внешний вид колец с углом конусности 55° после разрезки:
а – вид сверху, б – вид сбоку

Таблица 1 – Результаты замеров толщин и диаметров до и после разрезки колец

Угол конусности	№ кольца	Толщина, мм	Средний диаметр	
			D_0 , мм	D_1 , мм
50°	1	0,709	80,35	73,25
	2	0,612	73,25	67,25
	3	0,648	63,25	59,60
	4	0,672	54,92	51,25
	5	0,686	45,50	43,55
	6	0,67	36,55	35,15
	7	0,656	27,40	26,70
55°	1	0,771	80,85	76,20
	2	0,568	73,80	69,05
	3	0,536	66,40	62,30
	4	0,591	59,25	55,95
	5	0,584	51,95	49,55
	6	0,596	44,52	42,50
	7	0,565	37,22	35,75
	8	0,619	29,75	28,90
	9	0,585	21,75	21,20
60°	1	0,539	82,42	76,45
	2	0,435	78,32	73,40
	3	0,434	71,25	67,00
	4	0,536	64,25	60,65
	5	0,502	58,15	55,55
	6	0,525	51,87	49,50
	7	0,516	45,75	43,95
	8	0,538	38,60	37,40

мм), также измерялась толщина посередине высоты кольца с помощью стойки с электронным индикатором (ИЦ 0-12,7, точность $\pm 0,001$ мм). Разрезка колец по образующей производилась кусачками.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После разрезки кольца смыкаются, что свидетельствует о наличии в образцах сжимающих окружных напряжений (рисунок 3а). Также не-

сколько колец вблизи фланца имеют небольшое изменение формы в виде смещения концов колец, что свидетельствует о наличии осевых остаточных напряжений (рисунок 3б). Однако, смещение концов кольца намного меньше их смыкания, что говорит о малой величине осевых остаточных напряжений по сравнению с окружными.

Результаты замеров толщин, диаметров до и после разрезки колец представлены в таблице 1.

После расчета величины остаточных напряжений для трех конических образцов с углом

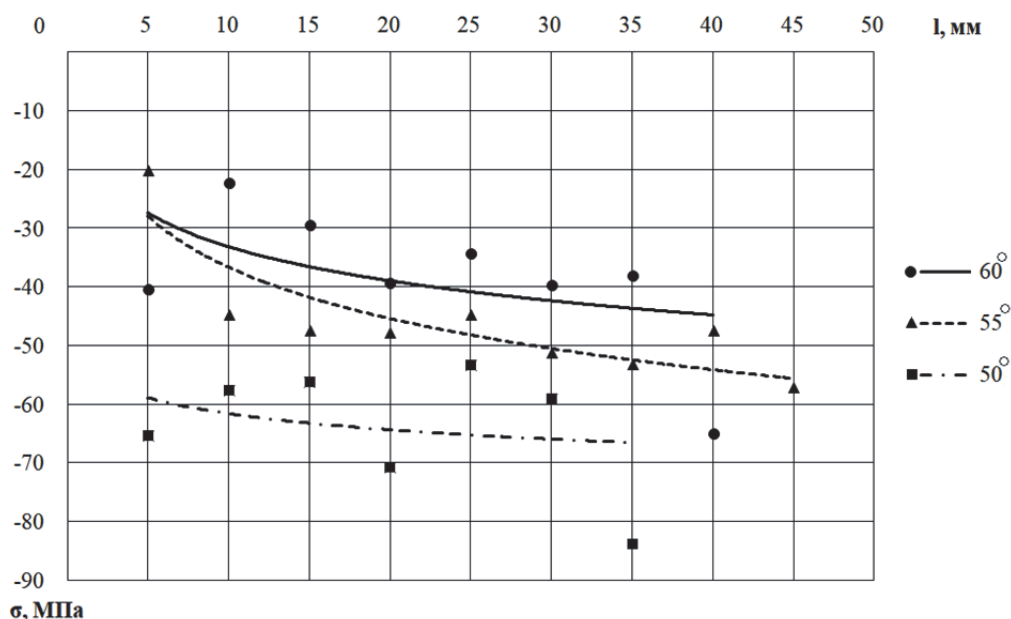


Рисунок 4 – Распределение остаточных напряжений по длине образующей конических образцов от фланца ко дну

конусности 50°, 55° и 60° были получены зависимости распределения величины остаточных напряжений по длине образующей конического образца от фланца ко дну (рисунок 4).

Из рисунка 4 видно, что при всех рассматриваемых углах наклона образующей конусов величина сжимающих остаточных напряжений увеличивается от фланца к донной части конуса. При этом с увеличением угла, сжимающие остаточные напряжения уменьшаются. Это можно объяснить увеличением степени пластических деформаций при сохранении величины упругой деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнены исследования величины остаточных напряжений в зависимости от угла конусности изделия, полученного в процессе инкрементального формообразования. Для оценки остаточных напряжений использовался метод разрезных колец, по результатам которого выявлено, что кольца, нарезанные по высоте конических образцов, смыкаются. Также после разрезки колец наблюдается незначительное осевое смещение концов кольца, что говорит о наличии осевых остаточных напряжений, величина которых пренебрежительно мала по сравнению с величиной окружных.

Также в исследовании выполнен расчет величины сжимающих остаточных напряжений, возникающих в процессе инкрементального формообразования. Для объяснения выявленных закономерностей требуется проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gupta P., Jeswiet J. Manufacture of an aerospace component by single point incremental forming. *Procedia Manufacturing*. Volume 29. 2019, pp. 112–119.
2. Jeswiet J., Micari F., Hirt G., Bramley A., Duflou J., Allwood J. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Volume 54. 2005. pp. 88–114.
3. James M.N., Hattingh D.G., Asquith D., Newby M., Doubell P. Applications of residual stress in combatting fatigue and fracture. *Procedia Structural Integrity*. Volume 2. 2016. pp. 11–25.
4. Tanaka S., Nakamura T., Hayakawa K., Nakamura H., Motomura K. Residual stress in sheet metal parts made by incremental forming process. *AIP Conference Proceedings*. 2007, pp. 775–780.
5. Radu C., Tampu C., Cristea I., Chirita B. The effect of residual stresses on the accuracy of parts processed by SPIF. *Materials and Manufacturing Processes*. Volume 28. 2013. pp. 572–576.
6. Zolotukhin P.I., Volodin I.M., Karpaitis E.P., Volodin A.I., Schmidt A.A. Study of the spring back of calibres in material forming processes of roll forging mills. *Ironmaking and Steelmaking*. Volume 45. 2017. pp. 1–5.
7. López C., Elías-Zúñiga A., Jiménez I., Martínez-Romero O., Siller H.R., Diabb J.M. Experimental Determination of Residual Stresses Generated by Single Point Incremental Forming of AlSi10Mg Sheets Produced Using SLM Additive Manufacturing Process. *Materials (Basel)*. Volume 11(12). 2018. 2542.
8. Noyan I.C., Cohen J.B. Determination of Strain and Stress Fields by Diffraction Methods. *Residual Stress*. 1987. pp. 117–163.
9. Walton H.W. Deflection Methods to Estimate Residual Stress. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International. 2002. pp. 89–98.
10. Шеметев, Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение [Электронный ресурс]:

учебное пособие по курсу «Производство отливок из сплавов цветных металлов». Ч.1 / Г.Ф. Шеметев; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – Электрон. тексто-

вые дан. (1 файл : 2,6 Мб). — СПб., 2012. – Загл. с титул. экрана. – Свободный доступ из сети Интернет (чтение, печать, копирование). – Текстовый документ. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2747.pdf>.

INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES ARISING DURING INCREMENTAL SHAPING

© 2023 V.A. Razzhivin

Samara National Research University, Samara, Russia
Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Abstract. In this article, studies have been carried out to determine the magnitude of residual stresses arising during incremental shaping of a truncated cone, depending on the angle of inclination of its formative. To assess the residual stresses the method of cutting rings was used, according to the results of which it was found that the rings, cut out along the height, manufactured conical parts, when cutting are closed. This indicates the formation of compressive circumferential stresses during incremental shaping. There is also an insignificant axial displacement of the ring ends after cutting rings, which indicates the presence of axial residual stresses, the value of which is negligibly small compared to the value of circumferential stresses. As the degree of deformation increases during incremental shaping (increasing the taper angle), the magnitude of residual stresses decreases.

Keywords: incremental forming, residual stresses, taper angle, ring cutting method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-5-9

УДК 658.5.011

МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

© 2023 Л. Р. Мухаматгалеева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 1.02.2023

В статье рассмотрена концепция цифровой трансформации фармацевтических производств, которая базируется на обобщении существующих теоретических моделей цифровой трансформации, таких как Модель цифровой зрелости (Digital Maturity Assured Framework (DMF)), а также Модель структурирования элементов цифровой трансформации бизнеса Джорджа Вестермана, Дидье Бонне и Эндрю Макафи. Цифровая трансформация в настоящее время является необходимым условием развития производственных систем и повышения конкурентоспособности продукции. Глобальная конкуренция и влияние внешнеэкономических факторов приводит к переходу от массового производства к гибким производственным системам, функционирующим на основе концепции персонифицированной медицины, ответом на этот вызов могут стать только цифровые технологии Индустрии 4.0, способные осуществлять поддержку производства лекарственного средства на всех этапах жизненного цикла. На основе теоретического анализа была сформирована трехфазная модель цифровой трансформации, которая далее была обоснована практическими аналитическими данными фармацевтических предприятий РФ. Данная модель включает в себя три фазы: инжиниринговое проектирование (Фаза I), связанное с разработкой и внедрением инжиниринговых проектов, технико-технологическая трансформация (фаза II), которая предполагает накопление технологического потенциала за счет инвестиций в интеллектуальные факторы производства, после которой наступает заключительная стадия цифровой трансформации (фаза III), связанная с активным развитием цифровых инструментов и повышением роли информационных технологий в производстве.

Ключевые слова: организация производства, цифровизация, информационные технологии, цифровая трансформация, модель, цифровая эволюция, фармацевтическое производство.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-10-16

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание и развитие человеческого капитала является основой любой хозяйственной системы. В этой связи первостепенной задачей становится обеспечение и поддержание здоровья населения, поэтому особый приоритет получает система здравоохранения, а с ней и фармацевтическое производство. Активная научная разработка в сфере биотехнологий, персонифицированной медицины позволила открыть новые технологические перспективы в области диагностики, применения и разработки средств и протоколов лечения. Применение цифровых технологий в фармацевтике позволило выйти на новый уровень производству лекарственных препаратов, сместившись в сторону персонифицированной медицины, учитывающей уникальные характеристики организма, специфику дозировок, точность результатов диагностики и т.п.

В то же время применение современных технологий невозможно на базе устаревших концепций управления производством, требуется

Мухаматгалеева Луиза Равкатовна, аспирант кафедры логистики и управления.

E-mail: luizamukhamatgaleeva@gmail.com

глобальная трансформация производственных процессов. Цифровые технологии применяются на этапах жизненного цикла лекарственного средства: разработка, испытания, производство, сбыт. Гармоничный симбиоз цифровых технологий и новых концепций управления производством лежит в основе глобальной цифровой трансформации фармацевтической отрасли и определяет рост ее результативности.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках исследования применялись общенаучные методы исследования: анализ, синтез, обобщение, описательный, графический методы.

В основе аналитического исследования лежат статистические данные Росстата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В фармацевтической промышленности внедрение цифровых технологий позволяет получить целый комплекс преимуществ. За счет эксплуатации высокотехнологичного оборудования повышается гибкость производства, что особенно актуально в условиях персонифицированной медицины, ориентированной на производство

малых партий препаратов, так как достигается за счет быстрой его перенастройки и преобразования параметров производства. Вместе с этим повышается точность и эффективность управления производственными системами, а также увеличивается конкурентоспособность продукции. Здесь, также следует отметить, что становится возможной информационная интеграция всех этапов жизненного цикла продуктов. Все стадии производства того или иного препарата, становятся легко отслеживаемыми и в случае возникновения внештатных ситуаций, руководство предприятия может эффективно и быстро решить данную проблему [1]. Также решаются задачи не только оптимизации производства, но и, к примеру, экологической безопасности.

Исследование практики цифрового развития предприятий позволило сформировать ряд моделей, реализующих данную задачу. Одной из наиболее известных является Модель цифровой зрелости (Digital Maturity Assured Framework (DMF)) (рисунок 1) [2].

Данная модель включает четыре уровня цифровой зрелости:

- фрагментарная цифровизация, которая предполагает начальное внедрение цифровых технологий, фактически представляет собой этап тестирования целесообразности и эффективности внедрения информационных технологий в производственную систему;
- активная цифровизация, предполагающая массовое внедрение и использование существующих цифровых технологий во всех сферах;
- цифровая зрелость – данный этап предполагает встраивание цифровых технологий в стратегию деятельности;

– цифровая оптимизация – предприятие становится фактически цифровым, цифровые технологии становятся неотъемлемой частью формируемой добавленной стоимости предприятия.

Для оценки уровня цифровой зрелости согласно данной модели используются следующие категории оценки [3]:

- 1) цифровая стратегия и согласование;
- 2) организационная готовность к цифровым технологиям;
- 3) цифровое обеспечение (технологии, возможности и процессы);
- 4) цифровые тенденции и конкурентная разведка;
- 5) цифровые каналы взаимодействия;
- 6) влияние и ценность цифровой зрелости.

Однако данная модель ориентирована на оценку общей философии цифровизации предприятия, в то время как для целей нашего исследования необходимо использование подходов, позволяющих оценить практику внедрения цифровых технологий в производственную систему.

Другая модель, представленная Центром для цифрового бизнеса Массачусетского технологического института [4] предполагает практико-ориентированный подход, который отличается от рассмотренного выше большей детализацией направлений цифровизации. В отличие от модели DMF данный подход представляет собой комплексную систему элементов цифровизации, которые, несмотря на некоторую функциональную изолированность, представляют собой взаимосвязанные «строительные блоки» цифровой трансформации. Процесс цифровой трансформации предприятия, согласно данной модели представляет собой последовательное



Рисунок 1 – Модель цифровой зрелости (Digital Maturity Assured Framework (DMF)) [3]

Таблица 1 – Модель структурирования элементов цифровой трансформации бизнеса Джорджа Вестермана, Дидье Боннэ и Эндрю Макафи [5]

Работа с клиентами		
1. Более глубокое понимание клиентов	2. Увеличение выручки от существующих клиентов	3. Поиск новых точек взаимодействия с клиентами
Операционный процесс		
4. Автоматизация производственных процессов	5. Реализация творческого потенциала сотрудников	6. Управление производительностью на основе анализа «больших данных»
Бизнес-модель		
7. Точечное внедрение новых технологий	8. Внедрение новых, ранее не существовавших, цифровых бизнес-моделей	9. Цифровая глобализация

преобразование указанных блоков посредством внедрения цифровых технологий (таблица 1).

Уровни данной модели предполагают некоторую закономерность: «сначала располагаются элементы внешней среды (элементы 1, 2, 3), затем внутренней среды (элементы 4, 5, 6) и в последнюю очередь элементы бизнес-модели (элементы 7, 8, 9), которые связывают внешнюю среду с внутренней. В российских условиях наиболее важным является первый блок элементов (1, 2, 3), поскольку цифровизация бизнеса должна вести к росту клиентоориентированности компании» [5, с.1352]. Однако, по нашему мнению, в данной модели приоритет также отдается видам деятельности в наибольшей степени связанным с решением управленческих задач, в то время, как значительная часть добавленной ценности связана с ее формированием в рамках производственного процесса.

В этой связи актуальной представляется задача формализации технологической эволюции производственного процесса и процесса формирования добавленной стоимости. На рисунке 2 сформирована модель цифрового развития предприятия по уровню внедряемых технологий. Концептуально можно выделить несколько технологических стадий цифровизации фармацевтических предприятий.

Базисный уровень связан с использованием традиционных учетных корпоративных информационных систем, не обладающих специфическими функциями в области управления фармацевтическим производством. По мере расширения использования цифровых технологий актуализируются задачи применения специализированных цифровых решений для решения уникальных отраслевых задач – предприятие переход на новый уровень цифровизации. Дальнейшая цифровая трансформация предполагает глобальное изменение бизнес-процессов на основе применения технологий Индустрии 4.0.

Одной из ключевых задач цифровой трансформации предприятий фармацевтической отрасли в настоящее время является поиск направлений перехода к уровню II, откуда целесообразен последовательный переход к стадии III, на которой доступно продуктивное соперничество с производителями мирового уровня.

Уровень II цифрового развития предполагает внедрение специализированных информационных систем управления цифровыми данными фармацевтического производства.

Объединив указанные модели можно сформировать многоуровневую модель цифровой трансформации (рисунок 3), которая представляет собой комплексную систему интеграции управленческих и технологических решений в области цифровизации.

Данная модель отражает связь изменения управленческих подходов к цифровой трансформации и технической составляющей данного процесса. По мере развития роли цифровых технологий в системе формирования ценности предприятия растет технологический уровень применяемых цифровых решений. Данная модель отражает эволюционный характер цифрового развития предприятия, который предполагает последовательный рост и накопление добавленной ценности, формируемой за счет цифровых технологий и использование данного потенциала для последующего цифрового развития.

Для поддержания конкурентного уровня отечественные производители реализуют меры по повышению технико-технологического уровня, в том числе за счет развития инструментов информатизации производства, удельный вес предприятий осуществляющих производство лекарственных предприятий, внедряющих средства информатизации производства представлено на рисунке 4.

Динамика изменения данной величины отражает отраслевые тенденции и последовательность цифровой трансформации предприятий:

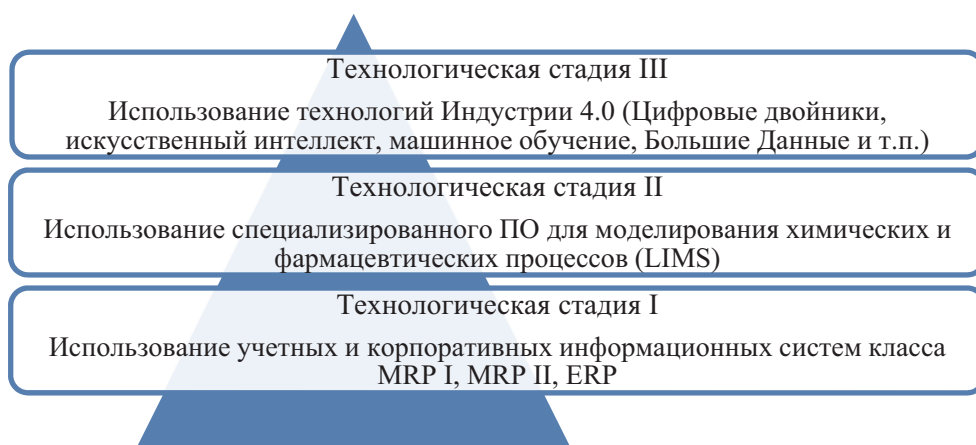


Рисунок 2 – Стадии цифрового развития фармацевтических предприятий (систематизировано автором)

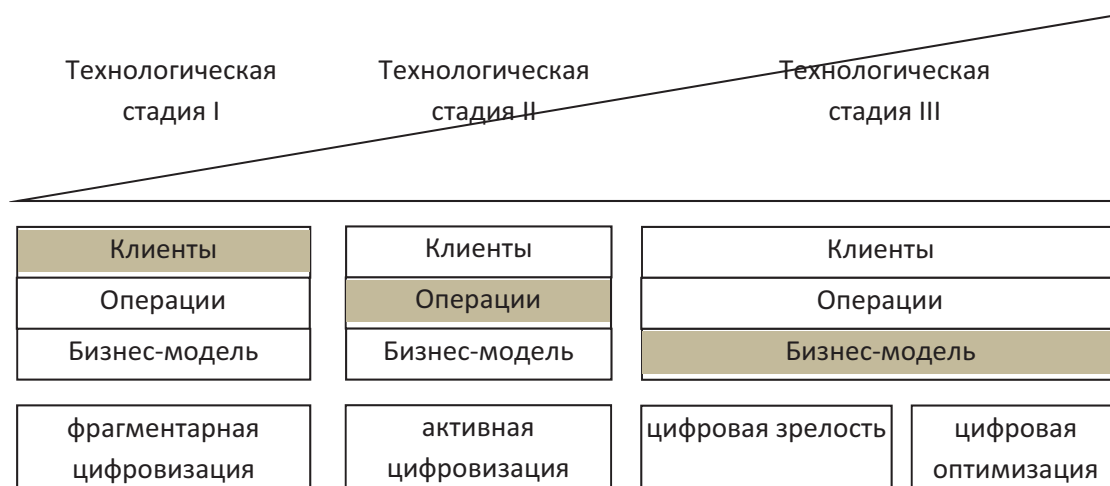


Рисунок 3 – Обобщенная модель цифровой трансформации фармацевтического предприятия (разработано автором)

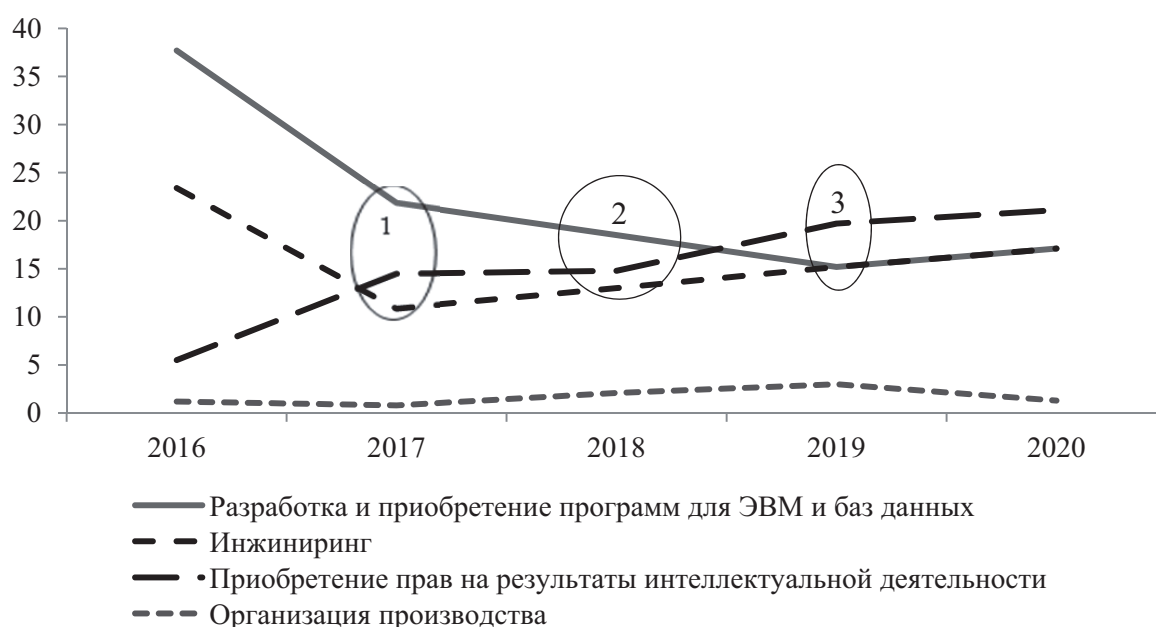


Рисунок 4 – Динамика изменения удельного веса предприятий осуществляющих производство лекарственных средств, внедряющих средства информатизации производства [разработано автором на основе 5, 7, 9, 0, 10]

– первый этап (2017 г.) наблюдается рост доли предприятий, внедряющих инновации в области организации производства и инжиниринга (фактически происходит процессное реформирование производства);

– второй этап – положительную динамику демонстрирует удельный вес предприятий, приобретающих интеллектуальные права (реализация инжиниринговых проектов, приобретение технологий);

– третий этап – рост разработки и приобретения программ ЭВМ (происходит цифровая трансформация предприятия, подразумевающая формирование нового информационного контура предприятия на базе обновленной технико-технологической базы).

Указанная динамика позволяет сформировать модель цифровой трансформации фармацевтической отрасли (рисунок 5). Данная модель отражает характер цифровой трансформации на отраслевом уровне, отражая общие тенденции, обусловленные рыночными факторами (как факторами рынка потребителей, так и факторами рынка технологий).

В то же время следует отметить, что отмеченный ранее первый этап цифровой трансформации производства (2017 г., рисунок 5) порождает рост эффективности затрат на цифровизацию: если до 2017г. динамика удельного веса затрат на цифровизацию соответствовала динамике роста объема производства и удельного веса инновационной продукции, то после



Рисунок 5 – Модель цифровой трансформации фармацевтической отрасли на мезоуровне (разработано автором)

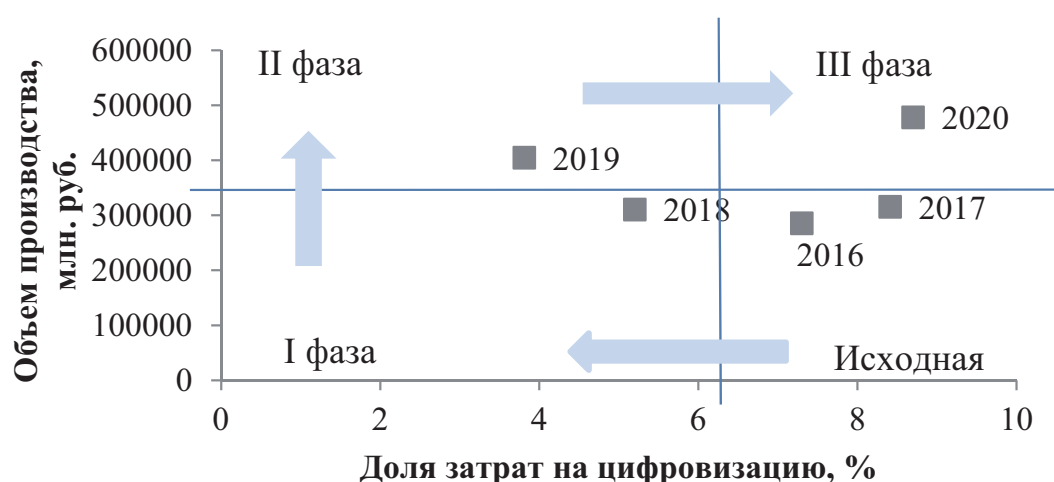


Рисунок 6 – Цифровая эволюция фармацевтической отрасли РФ (разработано автором)

реализации первого этапа трансформации – удельный вес затрат такого рода стал снижаться, но опережающие темпы роста удельного веса инновационной продукции и объема производства сохранились. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод об эффективности модели цифровой трансформации (рисунок 6).

В первой фазе наблюдается значительный прирост доли затрат на цифровизацию при незначительном приросте объема производства, что отражает этап инжиниринговых проектов, в результате которого отрасль перешла в фазу I. После этого инвестиционная активность снижается – формируется технико-технологический задел: удельный вес затрат на цифровизацию снижается, что сопровождается слабым снижением объема производства. Фаза II предполагает технико-технологическую модернизацию производственной базы в результате чего наблюдается относительное снижение доли затрат на цифровизацию при значительном росте объема производства. Итогом этой фазы становится скачкообразный рост эффективности производства за счет цифровых средств: Значительно растет доля затрат на цифровизацию, которая сопровождается также значительным приростом объема производства. Фактически фаза III определяет заключительный этап цифровой трансформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно однозначно выявить модель цифровой трансформации, наблюдаемой в фармацевтической отрасли РФ, которая включает в себя три фазы: инжиниринговое проектирование (Фаза I), связанное с разработкой и внедрением инжиниринговых проектов, технико-технологическая трансформация (фаза II), которая предполагает накопление технологического потенциала за счет инвестиций в интеллектуальные факторы производства, после которой наступает заключительная стадия цифровой трансформации (фаза III), связанная с активным развитием цифровых инструментов и повышением роли информационных технологий в производстве. Данная эволюционная модель была обоснована динамикой затрат на отдельные элементы цифровизации производства во взаимосвязи с объемом произведенной продукции в фармацевтической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макарова, Н.В. Перспективы внедрения цифровизации в фармацевтическую промышленность (на примере Калужской области) / Н.В. Макарова, Т.И. Кондратенкова // Отходы и ресурсы. – 2019. – Т. 6. – № 4. – С. 7.
2. ГОСТ Р 52249-2009. Национальный стандарт Рос-

- сийской Федерации. Правила производства и контроля качества лекарственных средств (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 20.05.2009 N 159-ст). - URL: consultant.ru / (дата обращения 27.07.2022).
3. *Ochoa-Urrego R.L., Pena, J.I.* Digital Maturity Models: a systematic literature review. // ISPIM Innovation Conference - Innovating in Times of Crisis, 7-10 June 2020, Event Proceedings: LUT Scientific and Expertise Publication.
 4. Отчет Массачусетского технологического института: Digital Transformation: A Roadmap For Billion-Dollar Organizations. 2011.
 5. *Гарифуллин, Б.М.* Цифровая трансформация бизнеса: модели и алгоритмы / Б.М. Гарифуллин, В.В. Зябриков // Креативная экономика. 2018. № 9. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-biznesa-modeli-i-algoritmy> (дата обращения 27.07.2022).
 6. *Городникова, Н.В.* Индикаторы инновационной деятельности: 2018: статистический сборник / Н. В. Городникова, Л.М. Гохберг, К. А. Дитковский и др., Нац. исслед. ун-т И60 «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2018. – 344 с.
 7. *Гохберг, Л.М.* Индикаторы инновационной деятельности: 2019: статистический сборник / Л.М. Гохберг, К.А. Дитковский, И.А. Кузнецова и др., Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2019. – 376 с.
 8. *Гохберг, Л.М.* Индикаторы инновационной деятельности: 2020: статистический сборник / Л.М. Гохберг, К.А. Дитковский, Е.И. Евневич и др., Нац. исслед. ун-т И60 «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2020. – 336 с.
 9. *Гохберг, Л.М.* Индикаторы инновационной деятельности: 2021: статистический сборник / Л.М. Гохберг, Г.А. Грачева, К.А. Дитковский и др., Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2021. – 280 с.
 10. *Власова, В.В.* Индикаторы инновационной деятельности: 2022: статистический сборник / В.В. Власова, Л.М. Гохберг, Г.А. Грачева и др., Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2022. – 292 с.

MODEL OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE ORGANIZATION OF PRODUCTION FOR ENTERPRISES IN THE PHARMACEUTICAL INDUSTRY

© 2023 L.R. Muchamatgaleeva

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

The article discusses the concept of digital transformation of pharmaceutical industries, which is based on a generalization of existing theoretical models of digital transformation, such as the Digital Maturity Assured Framework (DMF), as well as the Model of structuring elements of digital business transformation by George Westerman, Didier Bonnet and Andrew McAfee. Digital transformation is currently a necessary condition for the development of production systems and increasing the competitiveness of products. Global competition and the influence of external economic factors lead to a transition from mass production to flexible production systems operating on the basis of the concept of personalized medicine, only Industry 4.0 digital technologies capable of supporting the production of a drug at all stages of the life cycle can be the answer to this challenge. Based on the theoretical analysis, a three-phase model of digital transformation was formed, which was further substantiated by practical analytical data from pharmaceutical enterprises in the Russian Federation. This model includes three phases: engineering design (Phase I), associated with the development and implementation of engineering projects, technical and technological transformation (phase II), which involves the accumulation of technological potential through investment in intellectual production factors, after which the final stage begins digital transformation (phase III), associated with the active development of digital tools and the increasing role of information technology in production.

Keywords: organization of production, digitalization, information technology, digital transformation, model, digital evolution, pharmaceutical production.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-10-16

REFERENCES

1. *Makarova, N.V.* Perspektivy vnedreniya cifrovizatsii v farmacevticheskuyu promyshlennost' (na primere Kaluzhskoy oblasti) / N.V. Makarova, T.I. Kondratenkova // Othody i resursy. – 2019. – Т. 6. – № 4. – С. 7.
2. GOST R 52249-2009. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Pravila proizvodstva i kontrolya kachestva lekarstvennyh sredstv (utv. i vveden v dejstvie Priказом Rostekhregulirovaniya ot 20.05.2009 N 159-st). - URL: consultant.ru / (data obrashcheniya 27.07.2022).
3. *Ochoa-Urrego R.L., Pena, J.I.* Digital Maturity Models: a systematic literature review. // ISPIM Innovation Conference -Innovating in Times of Crisis, 7-10 June 2020, Event Proceedings: LUT Scientific and Expertise Publication.
4. Otchet Massachusetskogo tekhnologicheskogo instituta: Digital Transformation: A Roadmap For Billion-Dollar Organizations. 2011.
5. *Garifullin, B.M.* Cifrovaya transformatsiya biznesa: N 159-st). - URL: consultant.ru / (data obrashcheniya 27.07.2022).

- modeli i algoritmy / B.M. Garifullin, V.V. Zyabrikov // Kreativnaya ekonomika. 2018. № 9. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovaya-transformatsiya-biznesa-modeli-i-algoritmy> (data obrashcheniya 27.07.2022).
6. Gorodnikova, N.V. Indikatory innovacionnoj deyatel'nosti: 2018: statisticheskij sbornik / N. V. Gorodnikova, L.M. Gohberg, K. A. Ditkovskij i dr., Nac. issled. un-t I60 «Vysshaya shkola ekonomiki». – M.: NIU VSHE, 2018. – 344 s.
 7. Gohberg, L.M. Indikatory innovacionnoj deyatel'nosti: 2019: statisticheskij sbornik / L.M. Gohberg, K.A. Ditkovskij, I.A. Kuznecova i dr., Nac. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». – M.: NIU VSHE, 2019. – 376 s.
 8. Gohberg, L.M. Indikatory innovacionnoj deyatel'nosti: 2020: statisticheskij sbornik / L.M. Gohberg, K.A. Ditkovskij, E.I. Evnevich i dr., Nac. issled. un-t I60 «Vysshaya shkola ekonomiki». – M.: NIU VSHE, 2020. – 336 s.
 9. Gohberg, L.M. Indikatory innovacionnoj deyatel'nosti: 2021: statisticheskij sbornik / L.M. Gohberg, G.A. Gracheva, K.A. Ditkovskij i dr., Nac. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». – M.: NIU VSHE, 2021. – 280 s.
 10. Vlasova, V.V. Indikatory innovacionnoj deyatel'nosti: 2022: statisticheskij sbornik / V.V. Vlasova, L.M. Gohberg, G.A. Gracheva i dr., Nac. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». – M.: NIU VSHE, 2022. – 292 s.

ПОТЕНЦИАЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2023 Д.Б. Флакс

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 01.02.2023

В данном исследовании рассмотрен потенциал технологического развития предприятий нефтехимического комплекса. В качестве основного объекта рассматривались основные производственные фонды предприятий нефтехимического комплекса. Целью настоящей статьи является установление взаимосвязи, что основные производственные фонды являются основой технологического развития нефтехимического комплекса. Представлены основные проблемы использования основных производственных фондов. Исходя из рассмотренных проблем представлены ключевые направления роста эффективности использования основных производственных фондов нефтехимических предприятий. Проанализирована динамика наличия основных фондов по полной учетной стоимости и по балансовой стоимости коммерческих предприятий за три года – 2019-2021 гг. Проанализирована степень износа основных фондов коммерческих организаций также за период с 2019 по 2021 года. Отмечено в связи с чем наблюдался износ основных фондов и почему он снижался. Был рассмотрен коэффициент обновления основных фондов как по Российской Федерации в целом, так и по обрабатывающей промышленности в сопоставимых ценах. В результате был сделан вывод, что основные производственные фонды предприятий являются их неотъемлемой частью, главным источником дохода, а также от основных производственных фондов зависит конкурентоспособность предприятий в нефтехимическом комплексе.

Ключевые слова: основные производственные фонды, нефтехимический комплекс, технологическое развитие, нефтехимические предприятия, промышленное производство.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-17-22

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования настоящей статьи заключается в том, что потенциал и эффективное функционирование предприятий нефтехимического комплекса обеспечивает у него наличие основных производственных фондов. Основные производственные фонды можно считать потенциалом технологического развития предприятий нефтехимического комплекса. Именно основные производственные фонды, являясь элементом производственного потенциала нефтехимических предприятий, оказывают значительное влияние в процессе их использования на рыночную стоимость предприятия, на его конкурентоспособность и деловую активность, финансовые показатели, кредитоспособность и другие финансово-экономические показатели деятельности предприятия.

В целом переход к цифровой экономике и более современные требования к производству и созданию конкурентоспособного продукта предполагает обновление и реконструкцию основных производственных фондов предприятий в частности нефтехимического комплекса.

Целью настоящей статьи является установление взаимосвязи, что основные производ-

Флакс Дмитрий Борисович, старший преподаватель кафедры систем автоматизации и управления технологическими процессами. E-mail: flax.dmitry@yandex.ru

ственные фонды являются основой технологического развития нефтехимического комплекса. Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

- определение проблемы использования основных фондов в нефтехимии;
- выявление направлений роста эффективности использования основных фондов;
- определение путей и тенденций развития использования основных производственных фондов в нефтехимическом комплексе.

Актуальность темы исследования также выражена и подтверждается программами и стратегиями федерального и регионального назначения: Стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года [1], государственная программа РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» [2], на региональном уровне это Программа развития нефтегазохимического комплекса РТ на 2020-2024 годы и перспективу до 2034 года [3], Стратегия развития отраслей промышленности Республики Татарстан на период 2016 – 2021 годы с перспективой до 2030 года [4].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методической базой исследования послужили труды отечественных исследователей: Федосеевой Л.А., Дубровина Н.А., Ермолаевой

Е.Л., Воронцова А.М., Барсуковой А.Е. – авторы в своей работе акцентировали внимание на проблеме повышения эффективности и использования основных производственных фондов [5]; проблемы обновления основных производственных фондов раскрыты в трудах Царевой Н.Е., Неоклеус К.А. [6]; Колесникова Ю.С., Мухаметшин Д.Ф. в своей работе анализируют нефтехимический комплекс как потенциал и драйвер развития нематериальной собственности [7]; а также эффективность использования основных производственных фондов раскрывается в трудах таких авторов как Исичко А.П., Стародубцева О.А. [8], Соколов Ю.С. [9] и другие.

Также в качестве методической базы исследования применены документы регионального и федерального назначения – стратегии и госпрограммы. Использованы материалы и статистические данные Федеральной службы государственной статистики. Применены методы системного, сравнительного и структурного анализа, методы дедукции и индукции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные производственные фонды являются важнейшей и неотъемлемой частью любого предприятия нефтехимического комплекса.

Основные производственные фонды, согласно Е. Д. Черенцову, – это «комплекс вещественно – материальных ценностей, функционирующих в естественной форме на протяжении длительного периода в области вещественного производства и утрачивающих собственную цену по частям, по мере изнашивания» [10].

Так, к основным производственным фондам предприятия следует относить: здания и сооружения, помещения, постройки, оборудования, устройства и приборы, транспортные средства, производственный, административно-хозяйственный инвентарь и др. В целом можно выделить 2 категории основных фондов [10, с. 164]:

- производственные основные фонды, которые мы перечислили выше;

- непроизводственные основные фонды, к которым относятся основные фонды, неучаствующие в процессе изготовления, а напрямую предназначены для непосредственного использования, жилищного и социально – коммунального сервиса рабочих.

Основными проблемами использования основных фондов на предприятиях нефтехимического комплекса следует считать то, что собственники предприятий не обновляют своевременно принадлежащие им основные средства, допускают чрезмерное старение основных производственных фондов, а именно активной части, от которой зависят как раз основные результаты деятельности и показатели предприятия.

Также следует отметить, что наименее развитым звеном среди основных средств предприятия являются именно оборудования, машины и приборы. Кроме этого, пандемия коронавируса внесла свои коррективы, так как в связи с ней предприятия столкнулись с проблемой обновления основных производственных фондов [6].

Состав и структура основных фондов предприятия в современных условиях постоянно меняются: приобретаются новые, выбывают из-

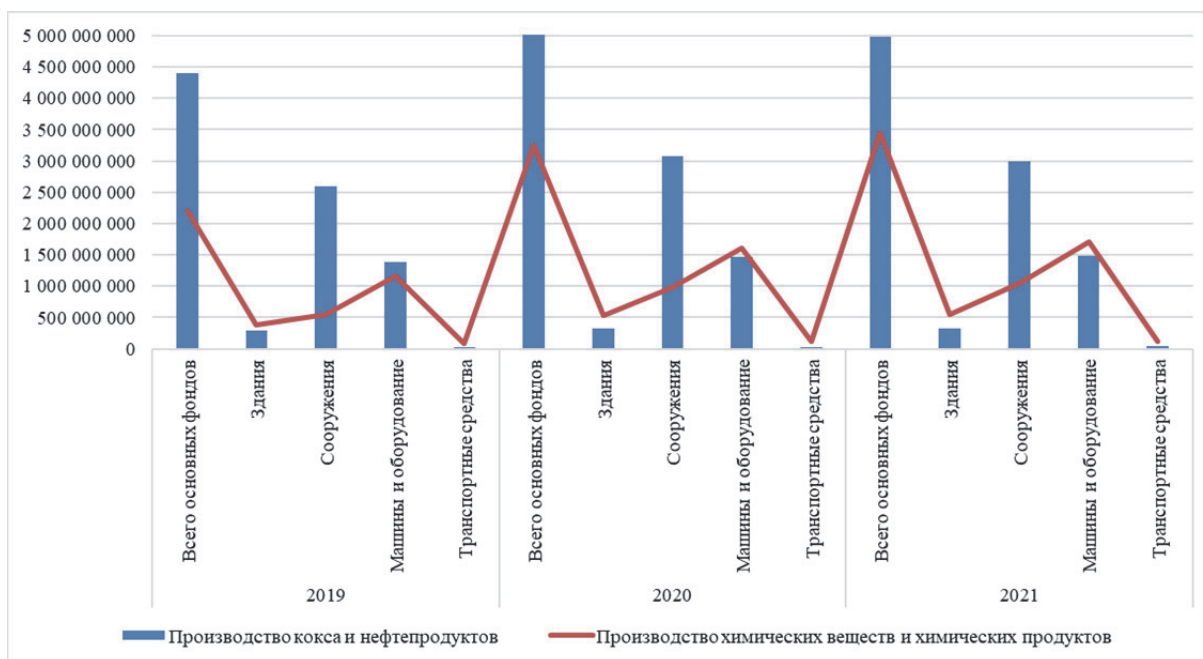


Рис. 1. Наличие основных фондов по полной учетной стоимости в коммерческих организациях (без субъектов малого предпринимательства), тыс. рублей [составлено автором по данным Росстата 11]

ношенные, продаются и сдаются в аренду средства, не используемые предприятием по различным причинам.

В рамках настоящего исследования интерес представляет для нас анализ наличия основных фондов у коммерческих организаций по полной учетной стоимости. Так, полная учётная стоимость основных фондов заключается в их первоначальной стоимости, измененной в ходе проведенных переоценок основных фондов и в результате их достройки, модернизации, дооборудования, реконструкции и частичной ликвидации [11].

Рисунок 1 наглядно демонстрирует, что коммерческие предприятия располагают достаточным количеством основных производственных фондов, выраженных согласно данным Росстата в денежном эквиваленте. Можно сделать вывод, что больше всего основных средств представлено в обрабатывающем производстве, а именно в производстве нефтепродуктов.

Для сравнения мы представили на рисунке 2 наличие основных фондов у предприятий и по остаточной балансовой стоимости.

К числу ключевых проблем использования основных производственных фондов в нефтехимическом комплексе относится высокая степень износа основных фондов нефтеперерабатывающей промышленности [правит рф]. Так, на рисунке 3 можно пронаблюдать динамику степени износа основных фондов коммерческих организаций нефтехимического комплекса за три года с 2019 по 2021 гг.

По данным рисунка 3 заметим, что наи-

большую степень износа основных фондов за три анализируемых периода имеют машины и оборудования, как в производстве нефтепродуктов – в среднем 66%, так и в производстве химических продуктов – в среднем 53,6% также за три анализируемых года. Также близко к максимальной степени износа можно отнести транспортные средства – 65,1% в производстве нефтепродуктов по итогам 2019 года, что значительно выше по сравнению с 2020 годом и постковидным 2021 годом, когда основные фонды, а в частности транспортные средства в связи с пандемией использовались гораздо реже. Наименьшую же степень износа наблюдаем у таких основных фондов, как здания, где процент износа составляет по итогам 2021 года 23,7% в производстве химических веществ и продуктов, и 32,9% соответственно в производстве нефтепродуктов.

Исходя из этого, уместно отметить главные направления роста эффективности использования основных производственных фондов. Согласно Исичко А. П. к таким направлениям следует отнести следующие моменты, представленные на рисунке 4.

Ввиду выше сказанного, проанализируем коэффициент обновления основных фондов, который представляет собой отношение основных фондов, введенных в действие в течение года, к их наличию на конец года, исчисленное в постоянных ценах [11].

Итак, из графика на рисунке видно, что наивысший коэффициент обновления наблюдался

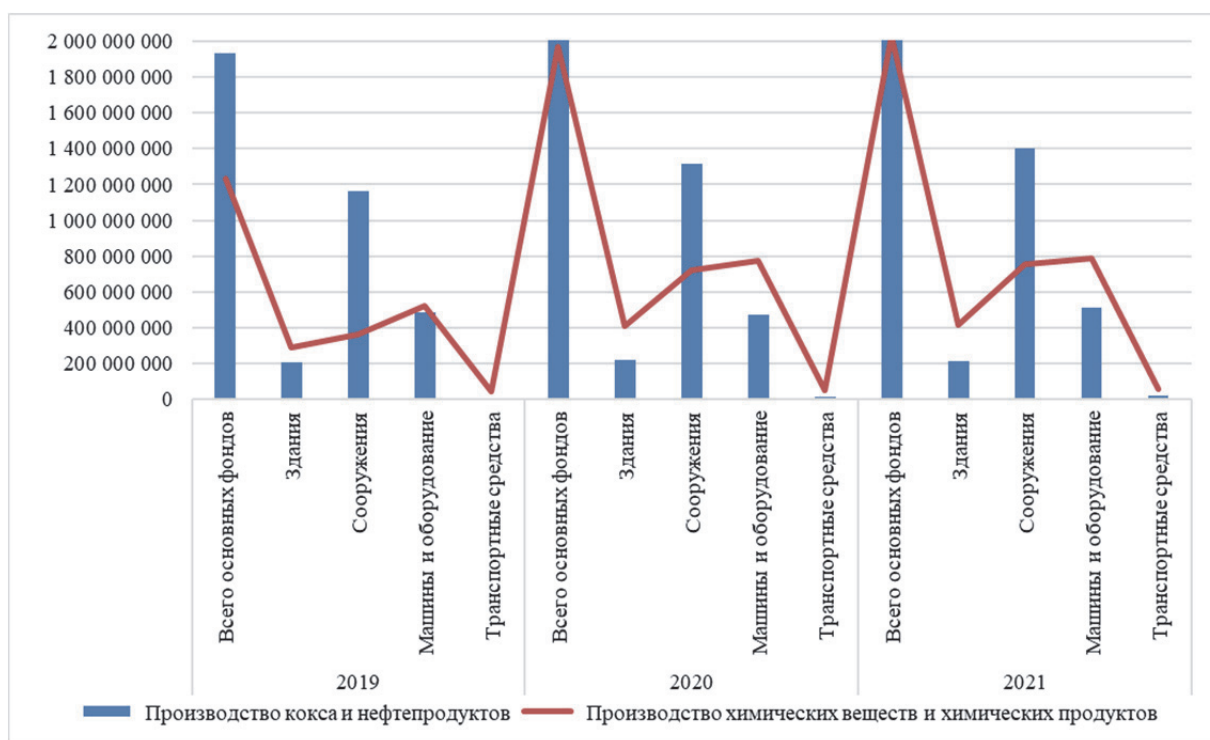


Рис. 2. Наличие основных фондов по остаточной балансовой стоимости коммерческих организаций (без субъектов малого предпринимательства), тыс. рублей [составлено автором по данным Росстата 11]

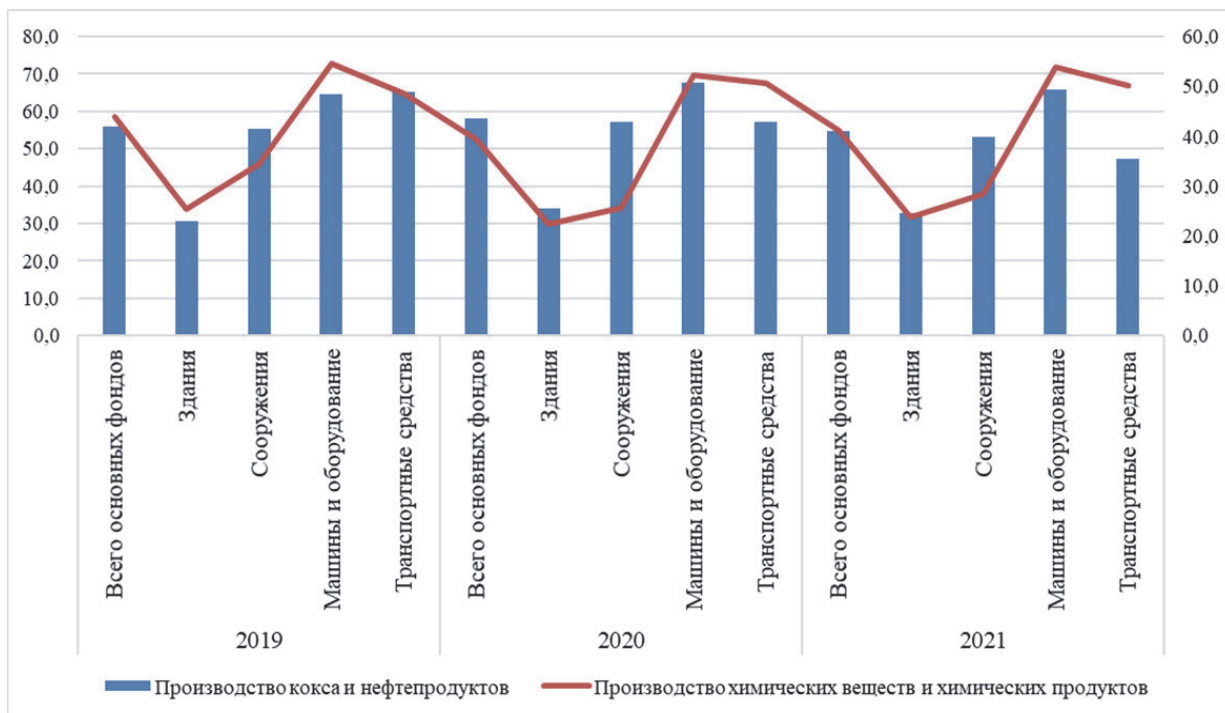


Рис. 3. Степень износа основных фондов коммерческих организаций (без субъектов малого предпринимательства), % [составлено автором по данным Росстата 11]



Рис. 4. Ключевые направления роста эффективности использования основных производственных фондов [составлено автором по данным 8]

в 2019 году – 4,7% по России в целом, и 6% по обрабатывающей промышленности. В 2020 году

заметно снижение коэффициента на 0,8% и 0,1% соответственно.

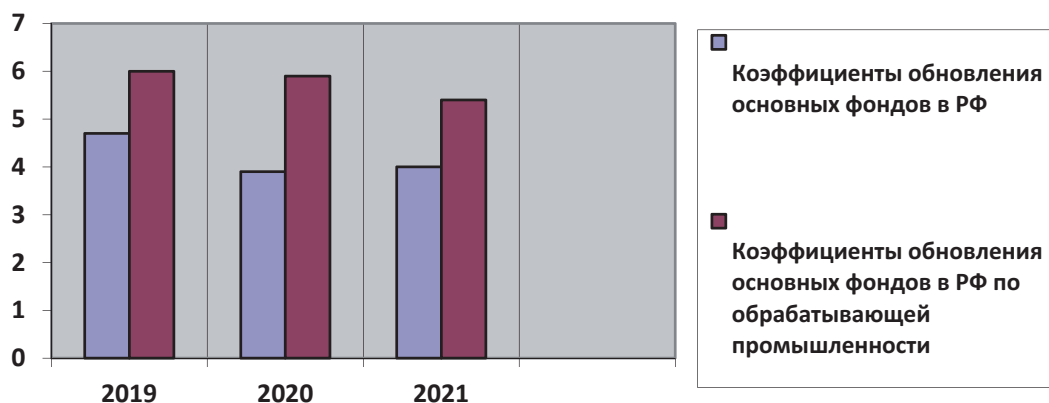


Рис. 5. Коэффициент обновления основных фондов в РФ в сопоставимых ценах (в процентах) [составлено автором по данным Росстата 11]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основные производственные фонды предприятий являются их неотъемлемой частью, главным источником дохода и прибыли. От хорошего и качественного состояния объектов основных фондов зависит и конкурентоспособность предприятий в нефтехимическом комплексе. Основные производственные фонды способны участвовать в большом количестве производственных циклов, если их правильно обслуживать и своевременно обновлять необходимые составляющие. В таком случае основные средства предприятия прослужат длительное время, сохранят свою натуральную форму. Состояние и эффективное использование основных производственных фондов оказывает прямое влияние на конечный финансово-экономический результат деятельности нефтехимического предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года. Приказ от 8 апреля 2014 года № 651/172. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722> (дата обращения: 11.02.2023)
2. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. N 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»». – URL: <http://gov.garant.ru/document?id=70543464&byPara=1&sub=1> (дата обращения: 11.02.2023)
3. Об утверждении программы развития нефтегазохимического комплекса Республики Татарстан на 2020–2024 гг. и перспективу до 2034 года. Приказ от 14.03.2020 года № 188. – URL: - https://mpt.tatarstan.ru/file/mpt/File/14.03.2020_4412_Pesoshin%20A.V._Garaev%20R.R.pdf (дата обращения: 11.02.2023)
4. Стратегия развития отраслей промышленности Республики Татарстан на период 2016 – 2021 годы с перспективой до 2030 года. Приказ от 26.07.2017 № 185-ОД. – URL: https://mpt.tatarstan.ru/prikaziministerstva.htm?pub_id=2073497.htm (дата обращения: 11.02.2023)
5. Федосеева, Л.А. Проблема повышения эффективности использования основных фондов и производственных мощностей предприятий / Л. А. Федосеева, Н. А. Дубровин, Е. Л. Ермолаева [и др.] // Гуманитарные научные исследования. – 2020. – № 12(112). – С. 15.
6. Царева, Н.Е. Проблема обновления основных производственных фондов предприятий малого бизнеса в России / Н. Е. Царева, К. А. Неоклеус // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2022. № 1(57). С. 253–262. – DOI 10.26456/2219-1453/2022.1.253-262.
7. Колесникова, Ю.С. Нефтехимическая промышленность как драйвер развития нематериальной собственности / Ю. С. Колесникова, С. Д. Мокичев, Д. Ф. Мухаметшин // Экономические науки. 2019. № 181. С. 276–279. DOI 10.14451/1.181.276.
8. Исичко, А. П. Эффективность использования основных производственных фондов как один из основных факторов, влияющих на результаты деятельности предприятия / А. П. Исичко, О. А. Стародубцева // Производственный менеджмент : теория, методология, практика: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 07 декабря 2017 года. – Новосибирск: Общество с ограниченной ответственностью «Центр развития научного сотрудничества», 2017. – С. 127–131.
9. Соколов, Ю.С. Оценка эффективности использования основных фондов предприятия / Ю.С. Соколов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2021. № 22 (364). С. 240–243. – URL: <https://moluch.ru/archive/364/81693/> (дата обращения: 11.02.2023).
10. Черенцов, Е.Д. Основные производственные фонды, как основной ресурс предприятия / Е.Д. Черенцов // Новый путь российской экономики: импортозамещение, инновационность, экономическая безопасность: сборник статей Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 23 декабря 2017 года. Том Часть 2. – Екатеринбург: Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2017. – С. 163–165.
11. Основные фонды и другие нефинансовые активы. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14304> (дата обращения: 11.02.2023)
12. Официальный сайт Правительства РФ. – URL: <http://government.ru/docs/> (дата обращения: 11.02.2023)

REFERENCES

1. Ob utverzhdenii Strategii razvitiya himicheskogo i neftekhimicheskogo kompleksa na period do 2030 goda. Prikaz ot 8 aprelya 2014 goda № 651/172. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722> (data obrashcheniya: 11.02.2023)
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 15 aprelya 2014 g. N 328 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoj programmy Rossijskoj Federacii «Razvitie promyshlennosti i povyshenie ee konkurentosposobnosti». – URL: <http://gov.garant.ru/document?id=70543464&byPara=1&sub=1> (data obrashcheniya: 11.02.2023)
3. Ob utverzhdenii programmy razvitiya neftegazohimicheskogo kompleksa Respubliki Tatarstan na 2020-2024 gg. i perspektivu do 2034 goda. Prikaz ot 14.03.2020 goda № 188. – URL: – https://mpt.tatarstan.ru/file/mpt/File/14.03.2020_4412_Pesoshin%20A.V._Garaev%20R.R.pdf (data obrashcheniya: 11.02.2023)
4. Strategiya razvitiya otraslej promyshlennosti Respubliki Tatarstan na period 2016 – 2021 gody s perspektivoy do 2030 goda. Prikaz ot 26.07.2017 № 185-OD. – URL: https://mpt.tatarstan.ru/prikazi-ministerstva.htm?pub_id=2073497.htm (data obrashcheniya: 11.02.2023)
5. Fedoseeva, L.A. Problema povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya osnovnykh fondov i proizvodstvennykh moshchnostej predpriyatij / L.A. Fedoseeva, N.A. Dubrovin, E.L. Ermolaeva [i dr.] // Gumanitarnye nauchnye issledovaniya. – 2020. – № 12 (112). – S. 15.
6. Careva, N.E. Problema obnovleniya osnovnykh proizvodstvennykh fondov predpriyatij malogo biznesa v Rossii / N. E. Careva, K. A. Neokleus // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie. 2022. № 1(57). S. 253-262. – DOI 10.26456/2219-1453/2022.1.253-262.
7. Kolesnikova, Yu.S. Neftekhimicheskaya promyshlennost' kak drajver razvitiya nematerial'noj sobstvennosti / YU. S. Kolesnikova, S. D. Mokichev, D. F. Muhametshin // Ekonomicheskie nauki. – 2019. – № 181. – S. 276-279. – DOI 10.14451/1.181.276.
8. Isichko, A.P. Effektivnost' ispol'zovaniya osnovnykh proizvodstvennykh fondov kak odin iz osnovnykh faktorov, vliyayushchih na rezul'taty deyatel'nosti predpriyatiya / A.P. Isichko, O.A. Starodubceva // Proizvodstvennyj menedzhment: teoriya, metodologiya, praktika: sbornik materialov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Novosibirsk, 07 dekabrya 2017 goda. – Novosibirsk: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «Centr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva», 2017. – S. 127-131.
9. Sokolov, Yu.S. Ocenka effektivnosti ispol'zovaniya osnovnykh fondov predpriyatiya / YU. S. Sokolov. – Tekst: neposredstvennyj // Molodoj uchenyj. 2021. № 22 (364). S. 240-243. – URL: <https://moluch.ru/archive/364/81693/> (data obrashcheniya: 11.02.2023).
10. Cherencov, E.D. Osnovnye proizvodstvennye fondy, kak osnovnoj resurs predpriyatiya / E.D. Cherencov // Novyj put' rossijskoj ekonomiki: importozameshchenie, innovacionnost', ekonomicheskaya bezopasnost': sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Ekaterinburg, 23 dekabrya 2017 goda. Tom CHast' 2. – Ekaterinburg: Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu «OMEGA SAJNS», 2017. – S. 163-165.
11. Osnovnye fondy i drugie nefinansovye aktivy. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/14304> (data obrashcheniya: 11.02.2023)
12. Oficial'nyj sayt Pravitel'stva RF. – URL: <http://government.ru/docs/> (data obrashcheniya: 11.02.2023)

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT POTENTIAL OF THE PETROCHEMICAL COMPLEX

© 2023 D.B. Flaks

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

In this study, the potential for technological development of enterprises in the petrochemical complex is considered. The main production assets of the enterprises of the petrochemical complex were considered as the main object. The purpose of this article is to establish the relationship that the main production assets are the basis for the technological development of the petrochemical complex. The main problems of using fixed production assets are presented. Based on the problems considered, the key directions for increasing the efficiency of using the fixed production assets of petrochemical enterprises are presented. The dynamics of the availability of fixed assets at the full book value and at the book value of commercial enterprises for three years - 2019-2021 is analyzed. The degree of depreciation of fixed assets of commercial organizations was also analyzed for the period from 2019 to 2021. It is noted in connection with which the depreciation of fixed assets was observed and why it decreased. The coefficient of renewal of fixed assets was considered both for the Russian Federation as a whole and for the manufacturing industry in comparable prices. As a result, it was concluded that the fixed production assets of enterprises are their integral part, the main source of income, and the competitiveness of enterprises in the petrochemical complex depends on the fixed production assets.

Key words: main production assets, petrochemical complex, technological development, petrochemical enterprises, industrial production.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-17-22

*Dmitry Flaks, Senior Lecturer of the departments of automation and control systems of technical processes.
Email address: flax.dmitry@yandex.ru*

**НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

© 2023 А.И. Шинкевич, В.А. Шогенов

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 01.02.2023

В настоящей статье приводится теоретическое обоснование обеспечения технологического суверенитета научно-производственного предприятия. С теоретической точки зрения технологический суверенитет рассматривается как способность государства располагать технологиями, которые считаются критически важными для обеспечения благосостояния и конкурентоспособности как регионов, так и предприятий. Целью настоящей статьи является обоснование аспектов достижения и обеспечения технологического суверенитета российских научно-производственных предприятий. Так как главным принципом независимости является преимущественное использование отечественной промышленной продукции, сырья, материалов и технологий. Методологической базой исследования послужили общенаучные и статистические методы, метод сравнительного анализа; использованы данные Росстата, позволившие проанализировать экономические показатели и индекс промышленного производства за последние три года; а также проанализированы нормативные документы. В результате исследования было выявлено, что к достижению технологического суверенитета необходимо прийти за короткий промежуток времени, а именно незамедлительно начать формировать технологическую независимость. Технологический суверенитет рассмотрен и проанализирован как часть инновационно-экономического суверенитета. Выделены основные подходы к обеспечению технологического суверенитета научно-производственных предприятий. Обозначены приоритетные направления развития по достижению технологического суверенитета в России в сложившихся условиях.

Ключевые слова: технологический суверенитет, кадровый потенциал, промышленная политика, технологическое развитие, промышленное производство, научно-производственные предприятия.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-23-27

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в условиях санкций обеспечение технологического суверенитета страны представляется особенно важным. Приоритетным направлением развития российской экономики является поддержка отечественных производителей и разработчиков, а также ускорение процесса цифровизации во всех сферах. Актуальность вопроса обеспечения технологического суверенитета как научно-производственных предприятий, так и российской экономики в целом подтверждается программой реализации проектов государственно-частного партнерства [1]. Несмотря на внешнеполитическую нестабильность в настоящее время, возможности технологического развития нашей страны расширяются и выходят на новый уровень, что, в свою очередь, способствует интеграции ресурсов и материалов ведущих научно-исследовательских и научно-производственных пред-

приятий, а также частного бизнеса и институтов развития с целью обеспечения системных технологических разработок и внедрения инновационных решений во все отрасли экономики.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методологической базой настоящего исследования являются такие общенаучные методы как структурный и системный методы, также применяются метод анализа и синтеза; с целью анализа динамики ВВП и индекса промышленного производства был применен метод статистического наблюдения и сравнительный анализ. Теоретической базой исследования являются научные труды отечественных исследователей, программы федерального назначения, а также новостные и аналитические обзоры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проекту поправок, к закону «О промышленной политике», подготовленного Минпромторгом, технологический суверенитет следует понимать, как «комплекс мер, которые направлены на обеспечение, развитие и удержание внутри России кадрового, финансового, технологического и материального потенциала,

Шинкевич Алексей Иванович, доктор экономических наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой логистики и управления.

E-mail: ashinkevich@mail.ru

Шогенов Вадим Алексеевич, заместитель директора по производству - начальник цеха.

E-mail: Vadim.shogenov@mail.ru

направленного на развитие российской промышленности» [2]. Исходя из данного определения технологического суверенитета главным принципом независимости является преимущественное использование отечественной промышленной продукции, сырья, материалов и технологий.

В настоящее время общепринятого устойчивого понятия технологического суверенитета пока нет, согласно институту Фраунгофера технологический суверенитет – это «способность государства располагать технологиями, которые считаются критически важными для обеспечения благосостояния и конкурентоспособности, а также возможность самостоятельно разрабатывать их или получать их от экономик других стран без односторонней структурной зависимости».

Достаточно длительное время в стране происходит активное перестроение ключевых отраслей экономики, однако за последнее время, в связи со сложившимися условиями, для государства приоритетным стало развитие и обеспечение собственного производства и создание передовых компетенций. Это говорит о том, что к достижению технологического суверенитета необходимо прийти за короткий промежуток времени, а именно незамедлительно начать формировать технологическую независимость в ведущих отраслях экономики.

В настоящее время экономическая ситуация такова: за первые шесть месяцев 2022 года ВВП в текущих ценах составил 34 663,6 млрд. рублей [3], что превышает аналогичные показатели 2021 года, представленные на рис. 1а. Фактическое значение индекса промышленного производства составляет 100,5 в % к предыдущему периоду [4], что ниже показателей 2021 года за

аналогичный период. Данные представлены на рис. 1 а-б.

В целом следует отметить, что у России присутствует задел в промышленности и технологиях, несмотря на то, что некоторые показатели и уменьшились за рассмотренные периоды. Согласно выступлению Премьер-министра РФ, на Иннопроме 2022 года российской экономике следует «перейти от догоняющей модели развития к опережающей», «только таким образом есть возможность вернуть внутренний рынок и интенсивно наращивать высокотехнологичный экспорт».

С целью достижения и обеспечения технологического суверенитета необходимы определенные меры и направления развития. Так, например, Афанасьев А.А. выделяет следующие направления развития по достижению технологического суверенитета в России в настоящих условиях [5]:

- реализация комплекса антикризисных мер по сохранению и восстановлению технологической целостности страны;
- меры реагирования, которые связаны с ограничениями деятельности иностранных компаний на территории страны;
- мероприятия, направленные на увеличение автономности функционирования ключевых сфер жизнеобеспечения;
- промышленная политика по локализации цепочек создания стоимости, импортозамещению, индустриализации;
- модернизация основных фондов на суверенной технологической основе.

В работе Кротовой М.В. отражены основные подходы к обеспечению технологического суверенитета [6]:

- «проведение границ». Здесь, в рамках

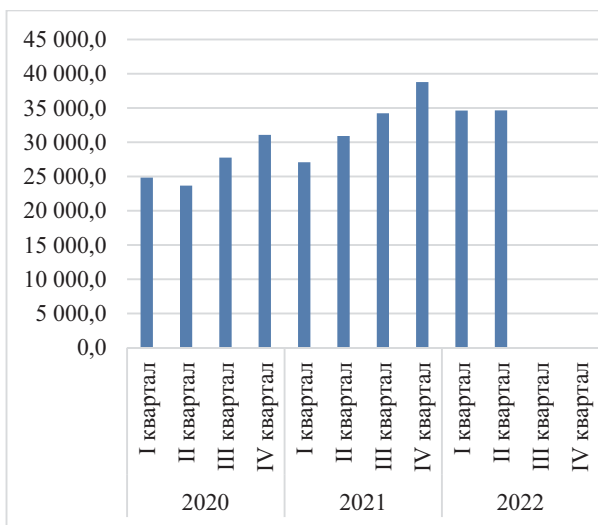


Рис. 1 а. Валовой внутренний продукт в текущих ценах, млрд.руб. (построено автором по данным [3])

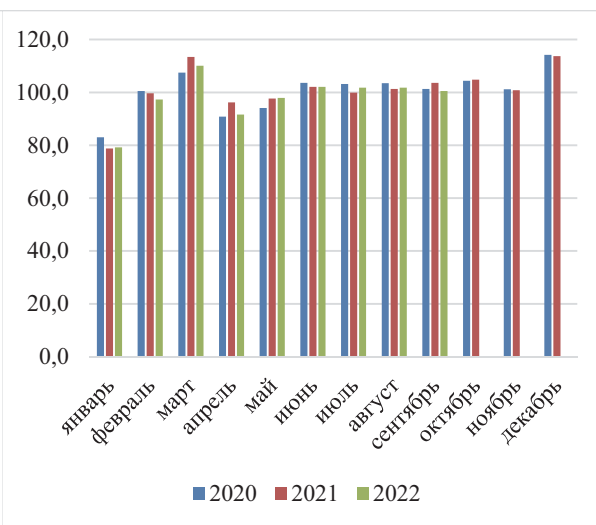


Рис. 1 б. Индекс промышленного производства в % к предыдущему периоду (построено автором по данным [4])

первого подхода рассматривается ограниченное рамок отраслевой модели, что позволяет более конкретно определить необходимое обеспечение разработчиками для технологического развития;

– выявление реальных ресурсов между исследуемой системой и окружающей средой;

– исследование взаимодействий системы с системами более высокого уровня.

Галимулина Ф.Ф. в своем исследовании рассматривает цифровые инструменты управления промышленным предприятием для обеспечения технологического суверенитета и предлагает выделять четыре типа видов деятельности обрабатывающей промышленности в условиях укрепления технологического суверенитета [7].

Кроме этого, следует отметить, что в настоящее время многие научно-образовательные центры уже внесли изменения в свои программы с целью достижения и обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета России. Однако, для обеспечения технологического суверенитета страны усилий и действия только со стороны государства недостаточно. Необходимо участие также и со стороны бизнеса, и научно-производственных предприятий, госкорпораций и госкомпаний, так как именно они, в большинстве случаев, являются основными спонсорами и инвесторами научных проектов. Сейчас, в рамках Концепции научно-технологического развития страны [8], главная задача крупнейших компаний заключается в координации своей научной деятельности. Также для достижения технологического суверенитета на федеральном уровне планируется создать реестр российской промышленной продукции, который будет предназначен для расширения применения отечественной продукции, а также с целью использования стимулирующих мер по ее преимущественному использованию.

Наряду с этим для обеспечения технологического суверенитета страны развивается и происходит подготовка специалистов и кадров для отечественной науки. Развиваются и функционируют передовые инженерные школы, организовываются и проводятся научно-технологические форумы, конгрессы, мероприятия с целью предоставления возможностей для молодых ученых, специалистов, а также объединения представителей ведущих научных школ, чтобы продемонстрировать свои научные достижения и разработки отечественных ученых.

Более того технологический суверенитет следует отличать от более широких понятий инновационного суверенитета и экономического суверенитета (рис. 2).

Экономический суверенитет выступает способностью создавать добавленную стоимость. В усилиях, предпринимаемых экономической,

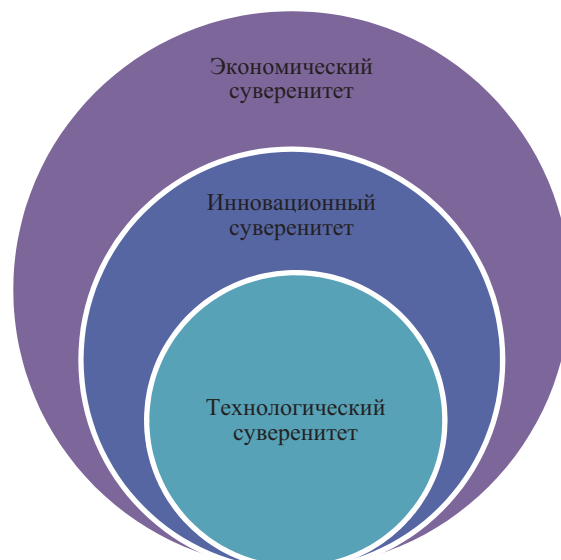


Рис. 2. Технологический суверенитет как часть инновационно-экономического суверенитета [9]

инновационной и технологической политикой для установления экономического суверенитета, растет интерес к технологическому суверенитету наряду с использованием сырья и выгодным положением экономических субъектов в глобальном производстве и цепочках создания стоимости. Технологический суверенитет играет особую роль в более широкой картине государственного суверенитета, потому что он обеспечивает экономический суверенитет, и сам по себе является возобновляемым, в отличие, например, от запасов ресурсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, технологический суверенитет в настоящее время для российской экономики является первостепенной и стратегической задачей. Однако недостаточно сосредоточиться только на технологическом суверенитете, который не представляется возможным без инновационного суверенитета и экономического суверенитета в том числе.

Обеспечение технологического суверенитета полностью зависит от эффективной интеграции науки, бизнеса и государства, с целью разработки и внедрения новых научно-технологических решений и подготовки квалифицированных специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковальчук, М. В РФ запускают новую программу для проектов, обеспечивающих технологический суверенитет / М. Ковальчук // ТАСС — российское государственное федеральное информационное агентство. 15 ноября 2022 г. — URL: <https://tass.ru/ekonomika/16328607> (дата обращения: 22.11.2022)
2. Гринкевич, Д. Минпромторг предложил способ до-

- стичь технологического суверенитета / Д. Гринкевич, Е. Кинякина, А. Бойко // Ведомости. 03 ноября 2022 г. – URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/11/03/948680-minpromtorg-predlozhit-sposob-dostich-tehnologicheskogo-suvereniteta> (дата обращения: 22.11.2022).
3. Национальные счета. Федеральная служба государственной статистики. 2022 г. – URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (дата обращения: 22.11.2022).
 4. Промышленное производство. Федеральная служба государственной статистики. 2022 г. – URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 22.11.2022).
 5. *Афанасьев, А.А.* Технологический суверенитет: основные направления политики по его достижению в современной России / А.А. Афанасьев // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12. – № 4. DOI: 10.18334/vinec.12.4.116433.
 6. *Кротова, М.В.* Возможности методологии системного анализа применительно к разработке стратегии обеспечения технологического суверенитета России / М.В. Кротова // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2022. – № 17-2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-metodologii-sistemnogo-analiza-primenitelno-k-razrabotke-strategii-obespecheniya-tehnologicheskogo-suvereniteta-rossii> (дата обращения: 23.11.2022).
 7. Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. N 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». – URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71551998/paragraph/1/doclist/1895/showentries/0/highlight/СТРАТЕГИЯ%20НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО%20РАЗВИТИЯ%20РОССИЙСКОЙ%20ФЕДЕРАЦИИ:1> (дата обращения: 23.11.2022)
 8. *Галимулина, Ф.Ф.* Цифровые инструменты управления промышленным предприятием в условиях укрепления технологического суверенитета / Ф.Ф. Галимулина // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2022. – № 4(95). – С. 65-72. DOI 10.21295/2223-5639-2022-4-65-72.
 9. *Jakob Edler.* Technology sovereignty. From demand to concept. – 2020. – URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/publikationen/technology_sovereignty.pdf.

SOME ASPECTS OF ENSURING THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF A SCIENTIFIC AND PRODUCTION ENTERPRISE

© 2023 A.I. Shinkevich, V.A. Shogenov

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

This article provides a theoretical justification for ensuring the technological sovereignty of a research and production enterprise. From a theoretical point of view, technological sovereignty is seen as the ability of a state to have technologies that are considered critical to prosperity and competitiveness. The purpose of the article is to substantiate the aspects of achieving and ensuring technological sovereignty. The methodological basis of the study was general scientific and statistical methods. As a result of the study, it was revealed that it is necessary to achieve technological sovereignty in a short period of time, namely, to immediately begin to form technological independence. The main approaches to ensuring the technological sovereignty of enterprises are identified.

Key words: technological sovereignty, human resources, industrial policy, technological development, industrial production, research and production enterprises.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-23-27

REFERENCES

1. Koval'chuk, M. V RF zapustyat novuyu programmu dlya proektov, obespechivayushchih tekhnologicheskij suverenitet / M. Koval'chuk // TASS — rossijskoe gosudarstvennoe federal'noe informacionnoe agentstvo. 15 noyabrya 2022 g. - URL: <https://tass.ru/ekonomika/16328607> (data obrashcheniya: 22.11.2022)
2. Grinkevich, D. Minpromtorg predlozhit sposob dostich' tekhnologicheskogo suvereniteta / D. Grinkevich, E. Kinyakina, A. Bojko // Vedomosti. 03 noyabrya 2022g. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2022/11/03/948680-minpromtorg-predlozhit-sposob-dostich-tehnologicheskogo-suvereniteta> (data obrashcheniya: 22.11.2022).
3. Nacional'nye scheta. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. 2022 g. - URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (data obrashcheniya: 22.11.2022).
4. Promyshlennoe proizvodstvo. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. 2022 g. - URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (data obrashcheniya: 22.11.2022).
5. Afanas'ev, A.A. Tekhnologicheskij suverenitet: osnovnye napravleniya politiki po ego dostizheniyu v sovremennoj Rossii / A.A. Afanas'ev // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. 2022. Tom 12. № 4. doi: 10.18334/vinec.12.4.116433.
6. Krotova, M.V. Vozmozhnosti metodologii sistemnogo analiza primenitel'no k razrabotke strategii obespecheniya tekhnologicheskogo suvereniteta Rossii / M.V. Krotova // Rossiya: tendencii i perspektivy razvitiya. - 2022. - № 17-2. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-gosudarstvennoj-statistiki>. 2022 g. - URL: <https://rosstat.gov.ru/statistics/accounts> (data obrashcheniya: 22.11.2022).

- методологии-системного-анализа-применительно-к-разработке-стратегии-обеспечения-технологического-суверенитета-россии (data obrashcheniya: 23.11.2022).
7. Ukaz Prezidenta RF ot 1 dekabrya 2016 g. N 642 «O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii». - URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71551998/paragraph/1/doclist/1895/showentries/0/highlight/STRATEGIYA%20NAUCHNO-TEKHNOLOGICHESKOGO%20RAZVITIYA%20ROSSIJSKOJ%20FEDERACII:1> (data obrashcheniya: 23.11.2022)
 8. Galimulina, F.F. Cifrovye instrumenty upravleniya promyshlennym predpriyatiem v usloviyah ukrepleniya tekhnologicheskogo suvereniteta / F.F. Galimulina // Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperacii, ekonomiki i prava. - 2022. – № 4(95). S. 65-72. DOI 10.21295/2223-5639-2022-4-65-72.
 9. Jakob Edler. Technology sovereignty. From demand to concept. - 2020. - URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/publikationen/technology_sovereignty.pdf.

*Aleksey Shinkevich, Doctor of Economics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Logistics and Management. E-mail: ashinkevich@mail.ru
Vadim Shogenov, Deputy Director for Production.
E-mail: Vadim.shogenov@mail.ru*

УДК 621.452 : 004.94

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА СБОРКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА

© 2023 Е. Ю. Печенина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 13.02.2023

Разработан цифровой двойник процесса сборки рабочего колеса компрессора, позволяющий прогнозировать угловые развороты лопаток, возникающие при сборке. Вычисляемые углы характеризуют натяги в соединениях торцевых полок лопаток. На входе в цифровой двойник поступают данные по отклонениям геометрии с контрольных операций деталей. При реализации цифрового использован метод случайного леса, обучение которого производилось на множестве численных экспериментов, выполненных в среде ANSYS с использованием конечно-элементной модели собранного рабочего колеса. Результаты экспериментов показали, что погрешность расчетов с использованием цифрового двойника не превышает 15 угловых минут.

Ключевые слова: цифровой двойник, рабочее колесо, сборка, герметичность, конечно-элементная модель, метод случайного леса.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-28-35

ВВЕДЕНИЕ

Заданная степень повышения давления, устойчивость и надежность работы компрессора зависит от обеспечения равномерности сборочных параметров между лопатками [1]. В рабочем колесе (РК) компрессора 8 ступени ключевым сборочным параметром является величина натягов между антивибрационными полками лопаток. Обеспечения равномерного натяга является при ремонте и использования двигателя в качестве наземной силовой установки перво-степенной задачей, так как требуемый ресурс работы компрессора возрастает в 2-3 раза. На рисунке 1 приведена модель рассматриваемого рабочего колеса компрессора.

Из-за недостаточного или излишнего напряжения между лопатками, а также его неравномерности лопатка становится излишне вибронатурженной, начинает колебаться и разрушается, обломки лопаток в процессе работы двигателя разрушают остальные лопатки диска, а кроме того, и лопатки нескольких дисков за ним. На рисунке 2 приведена фотография РК со сломанными лопатками, не прошедшего испытания.

Равномерность натягов по антивибрационным полкам обеспечивается точностью изготовления лопаток и их сборкой. Сужение допусков на изготовление экономически не целесообразно [2]. Существенным резервом повышения эксплуатационных показателей является улучшение

технологии сборки лопаточных венцов. При ремонте рабочего колеса выполняют предварительные расстановки лопаток, стремясь достичь лучшего результата, что является ресурсоемким процессом с множеством испытаний. Учитывая, что число лопаток в рассматриваемой ступени 84, число комбинаций принимает огромное значение, равное факториалу от числа лопаток.

Высокотехнологичная промышленность нового поколения основана на использовании цифровых данных для повышения качества и снижения сроков вывода изделий на рынок. Основой для такой промышленности является разработка цифровых двойников (ЦД) изделий. Применительно к рассматриваемому рабочему колесу, цифровой двойник – цифровая копия физического колеса в собранном состоянии, помогающая обнаруживать проблемы со сборкой, предсказывать результаты сборки и получать более точные результаты по натягам между лопатками. Применение компьютерного моделирования [3] и прогнозирования результирующих сборочных параметров [4] рабочего колеса возможно за счет использования современных средств измерений, позволяющих достаточно точно воспроизводить объекты разных габаритов и сложности [5].

В настоящее время существуют все возможности учитывать данные, поступающие с контрольно-измерительных операций лопаток [6, 7], и на основании этих данных строить математические модели расчета сборочных параметров [8] и производить сборку быстро и с требуемым качеством [9]. Цифровое моделирование позволяет осуществлять метод индивидуального подбора деталей в сборках [10, 11].

*Печенина Екатерина Юрьевна, аспирант, ассистент кафедры технологий производства двигателей.
E-mail: ek-ko@list.ru*

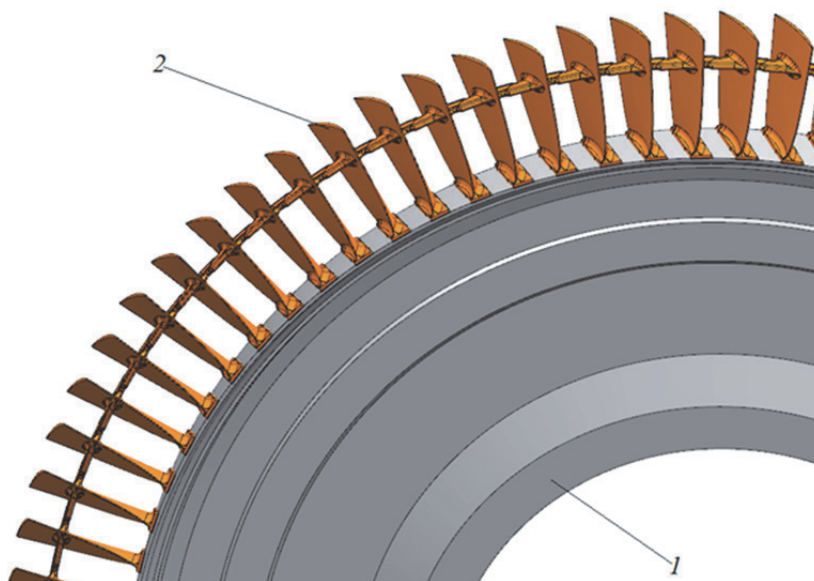


Рис. 1. Конструкторская модель рабочего колеса 8 ступени:
1 – диск; 2 – рабочая лопатка



Рис. 2. Не прошедшее испытания рабочее колесо

Целью исследования является создание цифрового двойника процесса сборки рабочего колеса 8 ступени компрессора, позволяющего производить расчет углов закрутки лопаток, характеризующих натяги между антивибрационными полками рабочих лопаток. Для повышения скорости получения результатов расчетов сделано их обобщение с помощью использования подходов машинного обучения, в частности, метода случайного леса [12].

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ДЛЯ РАСЧЕТА УГЛОВ

Номинальные размеры и допуски на изготовление лопаток предполагают наличие натяга между антивибрационными полками, его величина определяется конструктором. Натяги определяются сочетанием геометрических от-

клонений соседних лопаток, а также геометрическими отклонениями пазов диска, в которые они вставляются. Натяги в технологическом процессе контролируются в двух сечениях (рисунок 3) специальными приборами – угломерами: измеряется угол установки лопаток γ_b в свободном и собранном состояниях; разница этих углов γ_{b_n} характеризует величину натяга в соединении.

Согласно технологии изготовления, и на диске, и на лопатках проводится контроль геометрических параметров, характеризующих их качество.

На диске производится контроль пазов, ключевыми параметрами при их контроле являются: углы разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии пазов) β_s ; величины углов деления пазов α_{ss} .

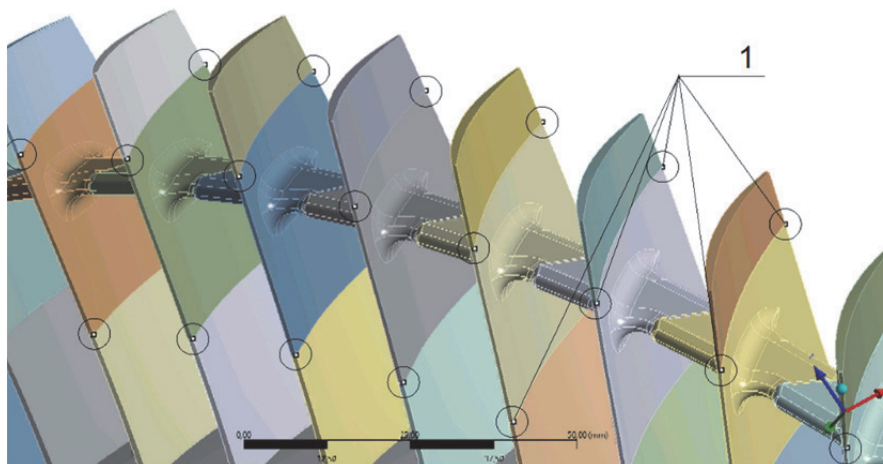


Рис. 3. Расположение контролируемых точек (1) на пере лопаток

При контроле лопаток в производстве измеряют: а) отклонение величин стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток (l_{sp}) со стороны спинки δl_s и корыта δl_p ; б) фактические значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии (γ_b).

После измерений выполняется расчет отклонений измеренных параметров p_{meas} от параметров p_t , заданных по чертежу:

$$\delta_{as} = p_{meas} - p_t. \quad (1)$$

Рассмотренные выше отклонения и план расположения лопаток в комплекте используются на входе в цифровой двойник для расчета значений возникающих натягов (характеризуемых $\gamma_{b,n}$). На рисунке 4 приведена архитектура цифрового двойника процесса сборки рассматриваемого РК и его место в технологическом процессе (ТП) сборки.

Основными этапами процесса сборки РК являются: 1) измерение геометрических параметров лопаток и дисков; 2) комплектование лопаток в РК; 3) сборка РК; 4) измерение сборочных параметров РК. На вход технологического процесса сборки РК поступают лопатки и диски. На выходе технологического процесса формируются РК. Повышение управляемости процессом сборки рабочих колёс возможно посредством выработки рациональных решений по комплектации и раскладке лопаток с использованием ЦД. Между ЦД и технологическим процессом сборки предусмотрены прямая и обратная связи.

Прямая связь предусматривает передачу информации из ЦД в операцию комплектования ТП. Передаваемая информация содержит данные по рассчитанным отклонениям углов $\gamma_{b,n}$ характеризующих возникающие натяги в соединениях между лопатками. Использование численного



Рис. 4. Архитектура цифрового двойника процесса сборки рабочих колёс

моделирования с использованием ЦД позволит принимать решение по улучшению комплектации (уменьшению неравномерности натягов) без многократных пересборок и измерений углов комплектов.

Обратная связь предусматривает передачу информации об измерениях геометрических параметров лопаток, дисков и рабочих колёс в ЦД для уточнения параметров моделирования при разработке модели.

ЦД включает в себя процедуру расчета отклонений параметров и комплекс моделей: параметрическая CAD-модель; конечно-элементная модель расчета деформаций; модель пересчета деформаций в углы установки; регрессионная модель, основанная на методе машинного обучения. Результаты рассчитанных углов и отклонений накапливаются в базе данных, информация из которой используется для обучения регрессионной модели. Рассмотрим разработанные модели, входящие в ЦД.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ CAD-МОДЕЛЬ

Параметрические модели лопаток созданы в программе NX. В модели упрощен хвостовик и пазы диска, осуществляется сдвиг и разворот торцевых контактных плоскостей антивибрационной полки. Кроме того, можно изменять угловое положение лопаток согласно погрешности деления пазов α_{ss} . На рисунке 5 приведен эскиз модели с обозначенными параметрами геометрических отклонений, которые можно вносить в модель.

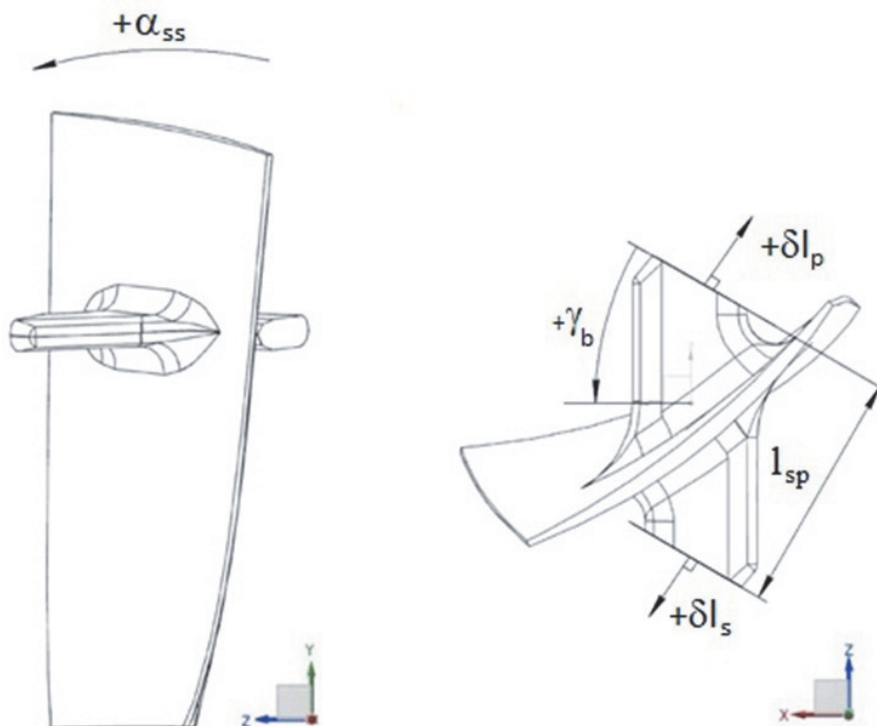


Рис. 5. Эскиз модели рабочей лопатки с параметрами отклонений

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ В ANSYS

Расчет изменения углов установки пера можно выполнить с использованием конечно-элементных моделей (КЭМ) в среде ANSYS. Создание конечно-элементной модели, как отмечалось выше, выполнялось в системе ANSYS Workbench, с использованием модуля Static Structural. Этапы формирования КЭМ: 1) задание механических свойств; 2) импортирование и связка параметризованных моделей лопаток и диска; 3) задание граничных условий; 4) задание выводимых параметров в препроцессоре.

Механические свойства материалов задавались исходя из материала лопаток рабочего колеса. Для выполнения КЭ моделирования сборки рабочего колеса задавались следующие механические свойства материала диска и лопаток: коэффициент Пуансона $-0,36$; модуль нормальной упругости $9,6 \cdot 10^{10}$ Па; плотность материала 4620 кг/м³; предел прочности $1,07 \cdot 10^9$ Па; физический предел текучести $9,3 \cdot 10^8$ Па; условный предел текучести $9,3 \cdot 10^8$ Па; коэффициент теплового расширения $9,4 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹.

Для автоматизации задания параметров модели (геометрических отклонений, измеренных на деталях или сгенерированных) в пакете MATLAB был написан скрипт, управляющий процессом в ANSYS с помощью отправки APDL команд. Скрипт так же позволяет автоматически сохранять результаты расчетов. Исходные геометрические параметры лопаток загружаются из файла формата *.xlsx. После расчета величины деформаций вдоль координатных осей для контрольных точек экспортируются в формате *.txt.

МОДЕЛЬ ПЕРЕСЧЕТА ДЕФОРМАЦИЙ В УСТАНОВКИ

Для расчета углов γ_b из величин координат контрольных точек была разработана математическая модель, реализованная в среде MATLAB. Она позволяет преобразовать деформации, полученные из КЭМ, и координаты исходных точек геометрической модели в углы установки профилей. В результате для каждой лопатки рассчитываются величины изменений углов установки профилей.

На первом этапе координаты контрольных точек из конструкторской модели сохраняются в матрицу $P_{84 \times 3}$. Значения деформаций точек на профиле лопаток вдоль трех осей последовательно загружаются и сохраняются в одну матрицу деформаций $D_{84 \times 3}$.

На втором этапе производится расчет координат точек на профиле лопаток после сборки, то есть когда лопатки контактируют друг с другом по антивибрационным полкам. Для этого необходимо просуммировать массив координат точек до сборки с массивом значений деформаций по правилу сложения матриц, получив матрицу $Q_{84 \times 3}$:

$$Q_{84 \times 3} = P_{84 \times 3} + D_{84 \times 3}. \quad (2)$$

Для выполнения расчета углов установки следует перейти в двумерную систему координат, что выполняется в два этапа. На третьем этапе преобразование Декартовой системы координат в полярную. За ось вращения примем ось двигателя X . Остальные две координаты точек в данном случае задаются с помощью угла φ^i и радиус-вектора ρ^i от центра координат:

$$\begin{cases} \rho^i = \sqrt{P_y^i + P_z^i}, \\ \varphi^i = \arctg\left(\frac{P_z^i}{P_y^i}\right). \end{cases} \quad (3)$$

На четвертом этапе из двух полярных координат рассчитаем длину окружности для каждой точки, получив вторую ось X_l новой системы координат:

$$P_{xl}^i = \rho^i \cdot \varphi^i / (\pi). \quad (4)$$

На заключительном этапе в полученной плоской системе координат выполняется непосредственно расчет угла касательной к профилю лопаток γ_b . Из координат точек вычисляются уравнения прямых, из уравнения прямых – углы наклона к оси X . Угол касательной до сборки находится аналогично.

Далее вычисляется разность этих углов и, таким образом, получается угол между двумя прямыми – изменение угла $\gamma_{b\ n}^i$, характеризу-

ющий разворот лопатки и возникающий натяг в соединении.

РАССМАТРИВАЕМЫЕ РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ

Расчет в КЭМ длится долго (для комплекта из 84 лопаток около двух часов на персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 7 2700 Eight-Core с тактовой частотой 3,2 ГГц), требует долгой настройки и поэтому данный расчет проблематично использовать в производстве.

Моделирование посредством ANSYS случаев сборки используется для генерации выборки, достаточной для создания регрессионной модели, в которой на входе будут значения отклонений лопатки и двух ее соседей, на выходе величина угла разворота этой лопатки. Для построения регрессионной зависимости использовались методы машинного обучения: метод опорных векторов (SVM) [13], гребневая регрессия (KR) [14] и случайный лес (RF) [12]. Из трех методов выбирался лучший с точки зрения получаемой в прогнозе ошибки.

Оценка ошибок прогнозирования угла производится по трем критериям: доля спрогнозированных величин в пределах допустимой погрешности δ (количество случаев, не превышающих определенный порог), среднеквадратичная ошибка MSE и коэффициент детерминированности R^2 . Допустимая величина ошибки была выбрана 10 угловых минут, или $0,167^\circ$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования включили в себя: апробацию разработанной конечно-элементной модели, используемой для создания обучающей выборки регрессионных моделей; проведение обучения трех моделей регрессии и выбор лучшей.

Используя результаты измерений лопаток для комплекта рабочих колес, было выполнено моделирование их сборки с использованием разработанной конечно-элементной модели. Углы были проанализированы и проведено их статистическое обобщение, а именно вычислено минимальное Δ_{min} , максимальное Δ_{max} значение, математическое ожидание μ и среднеквадратическое отклонение σ .

Рабочее колесо было собрано, с использованием угломера были измерены углы γ_b , и, соответственно, их разность $\gamma_{b\ n}$ до и после сборки.

В таблице 1 приведены статистические характеристики углов $\gamma_{b\ n}$, полученных в эксперименте и рассчитанные с использованием КЭМ модели ЦД (математические ожидания, среднеквадратические отклонения, минимальные и максимальные значения).

Таблица 1. Статистические характеристики углов $\gamma_{b,n}$

Параметр	Первое сечение			Второе сечение		
	Эксперимент	Модель	Погрешность	Эксперимент	Модель	Погрешность
$\mu, ^\circ$	0,92	0,89	0,04	1,34	1,30	0,03
$\sigma, ^\circ$	0,07	0,03	0,06	0,10	0,08	0,09
$\Delta_{min}, ^\circ$	0,75	0,81	-0,11	1,15	1,10	-0,14
$\Delta_{max}, ^\circ$	1,07	0,94	0,17	1,66	1,45	0,25

Согласно обобщенным результатам в таблице 1, предельная погрешность модели не превышает $0,17^\circ$ на первом сечении и $0,25^\circ$ на втором сечении, или 15 угловых минут.

Основываясь на статистических данных по отклонениям лопаток, была выполнена искусственная их генерация для проведения моделирования достаточной обучающей выборки с использованием цифрового двойника. всего в ANSYS было проведено моделирование 15 комплектов по 84 лопатки в каждом с различными сочетаниями геометрических отклонений лопаток, для того чтобы максимально охватить возможные случаи сборки. Обучающая выборка для прогноза углов каждой лопатки составила 1008 случаев, тестовая 252 случая. Математическое ожидание обучающей выборки μ составило $1,632^\circ$, среднеквадратическое отклонение σ составило $0,249^\circ$.

В таблице 2 приведены значения минимального Δ_{min} , максимальной погрешностей прогноза Δ_{max} , а так же μ и σ для тестовой и обучающей выборок при использовании рассматриваемых методов машинного обучения.

Меньшие погрешности дает модель RF, предельная величина погрешности для тестовой выборки фактически не превышает $0,05^\circ$ для первого сечения и $0,11^\circ$ для второго (6,6 угловых минут). При обучении предельные погрешности

модели RF не превышают $0,163^\circ$ (10 угловых минут). В таблице 3 приведены рассчитанные параметры точности прогнозирования с использованием рассмотренных методов машинного обучения для тестовой и обучающей выборки.

Согласно полученным результатам была выбрана модель регрессии с использованием метода случайного леса, имеющего наибольшей коэффициент R^2 , наименьшую величину MSE и в котором ни один случай не выходит за допустимый предел погрешности в 10 угловых минут, что является хорошим результатом, так как в практике контроля сборочных параметров используют оптические угломеры, цена деления которых составляет 10 угловых минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований разработан цифровой двойник, позволяющий прогнозировать изменение углов установки, возникающие из-за контакта антивибрационных полок рабочих лопаток в сборке колеса компрессора, характеризующие натяги в соединении. В цифровом двойнике реализована конечно-элементная модель непосредственного расчета изменения углов, и кроме того обобщающая ее регрессионная модель, основанная на методе случайного леса. Погрешность расчета углов с помощью цифрового двойника не превышает 15 угловых минут, если использовать конечно-элементную

Таблица 2. Статистическая оценка погрешностей прогнозирования $\gamma_{b,n}$

Параметр	Первое сечение						Второе сечение					
	SVM		KR		RF		SVM		KR		RF	
	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест
$\mu, ^\circ$	0,002	-0,001	$-1 \cdot 10^{-4}$	0,002	-0,002	$-3 \cdot 10^{-4}$	0,011	-0,002	$-4 \cdot 10^{-4}$	0,008	-0,005	-0,001
$\sigma, ^\circ$	0,049	0,028	0,004	0,049	0,029	0,011	0,056	0,072	0,011	0,061	0,065	0,029
$\Delta_{min}, ^\circ$	-0,100	-0,088	-0,021	-0,093	-0,082	-0,040	-0,244	-0,250	-0,059	-0,23	-0,163	-0,106
$\Delta_{max}, ^\circ$	0,100	0,062	0,016	0,100	0,052	0,046	0,152	0,173	0,042	0,132	0,146	0,093

Таблица 3. Параметры точности обучения и теста для разных моделей регрессии для прогноза

Метод регрессии	Первое сечение						Второе сечение					
	δ %		R^2		MSE		δ %		R^2		MSE	
	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест	Обучение	Тест
SVM	1,00	1,00	0,72	0,71	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0,99	0,99	0,95	0,94	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
KR	1,00	1,00	0,91	0,90	$8 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,99	0,92	0,91	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
RF	1,00	1,00	1,00	0,98	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	1,00	1,00	1,00	0,99	$1 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$

модель. Регрессионная модель позволяет заменить конечно-элементную модель, работающую долго и сложно применимую в практике, однако вносит дополнительную погрешность расчета, не превышающую 10 угловых минут. Прогнозирование ключевого сборочного параметра сразу после контрольных операций позволяет использовать модель для проведения виртуальных расчетов сборочных состояний и подбора лучшего сочетания лопаток до проведения фактических работ по сборкам комплектов рабочих колес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – Т.2. – М.: Машиностроение, 2008. – 365 с.
2. *Непомилуев, В.В.* Повышение качества сборки путем обеспечения статистической управляемости технологических процессов изготовления деталей / В.В. Непомилуев, И.В. Дюпин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 2. – С. 3-7.
3. *Kannan S.M., Asha A., Jayabalan V.* A new method in selective assembly to minimize clearance variation for a radial assembly using genetic algorithm // *Quality engineering*. 2005. Vol. 17. No. 4. P. 595-607. DOI: 10.1080/08982110500225398.
4. *Samper S., Adragna P-A., Favreliere H., Pillet M.* Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces // *J Comput Inf Sci Eng*. 2009. Vol. 9. No. 2. P. 1-12. DOI: 10.1115/1.3249575.
5. *Vezzetti E.* Computer aided inspection: design of customer-oriented benchmark for noncontact 3D scanner evaluation // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. No. 41. P.1140-1151. DOI: 10.1007/s00170-008-1562-x.
6. *Chang H.-C., Li A.C.* Automatic inspection of turbine blades using a 3-axis CMM together with a 2-axis dividing head // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. No.26. P.789-796. DOI: 10.1007/s00170-003-1877-6.
7. *Savio E., Chiffre L. De., Schmitt R.* Metrology of freeform shaped parts // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 56. No. 2. P. 810-835. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008.
8. *Groch D., Poniatowska M.* simulation tests of the accuracy of fitting two freeform // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 21. P. 23-30. DOI: 0.1007/s12541-019-00252-4.
9. *Zhang Z., Zhang Z., Jin X., Zhang Q.* A novel modelling method of geometric errors for precision assembly // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 94. P. 1139–1160. DOI: 10.1007/s00170-017-0936-3.
10. *Непомилуев В.В., Майорова Е.А.* Оптимизация метода индивидуального подбора для многосвязных размерных цепей / В.В. Непомилуев, Е.А. Майорова // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2008. – № 2(6). – С. 302-309.
11. *Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Макеев А.Б.* Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя / Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин, А.Б. Макеев // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2018. – № 7(216). – С. 313-319.
12. *Breiman L.* Random Forests // *Machine Learning*. 2001. Vol. 45. No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
13. *Cristianini N., Shawe-Taylor J.* An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods // Cambridge University Press, 2000. DOI: 10.1017/CBO9780511801389.
14. *Murphy K. P.* Machine Learning: A Probabilistic Perspective // The MIT Press. 2012. Chapter 14.4.3, P. 492-493.

CREATE A DIGITAL TWIN OF THE COMPRESSOR IMPELLER ASSEMBLY PROCESS

© 2023 E.Yu. Pechenina

Samara National Research University, Samara, Russia

A digital dual compressor wheel assembly process has been developed to predict the angular rotations of the blade assembly rotating as it rotates. The calculated angles characterize the tension in the joints of the end flanges of the blades. At the input of a digital double sequence of data on geometry deviations with control of operations on parts. During the implementation, the random forest method was used, the study of which was carried out on a set of calculated experiments performed in the ANSYS environment using the element model of the assembled impeller. The experimental results show that the calculation error does not exceed 15 minutes of arc.

Keywords: digital twin, impeller, assembly, tightness, finite element model, random forest method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-28-35

REFERENCES

1. *Inozemtsev A.A.* Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants] / А.А. Inozemtsev, М.А. Nikhamkin, V.L. Sandratskiy. – М.: Mashinostroyeniye. 2008. – Vol.2. – 365 p. (in Russ.).
2. *Nepomiluev V.V., Djupin I.V.* Povyshenie kachestva sborki putem obespecheniya statisticheskoy

- upravljajemosti tehnologicheskikh processov izgotovleniya detalej [Improving assembly quality by providing statistical controllability of technological processes for manufacturing parts]. Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii [Assembly in mechanical engineering, instrument making] / V.V. Nepomiluev, I.V. Djupin. – 2008. – No. 2. – Pp. 3-7. (in Russ.).
3. Kannan S.M., Asha A., Jayabalan V. A new method in selective assembly to minimize clearance variation for a radial assembly using genetic algorithm. *Quality engineering*, 2005. Vol. 17. No. 4. Pp. 595-607. DOI: 10.1080/08982110500225398.
 4. Samper S., Adragna P-A., Favreliere H., Pillet M. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces. *J Comput Inf Sci Eng*, 2009. Vol. 9. No. 2. Pp. 1-12. DOI: 10.1115/1.3249575.
 5. Vezzetti E. Computer aided inspection: design of customer-oriented benchmark for noncontact 3D scanner evaluation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009. No. 41. Pp. 1140-1151. DOI: 10.1007/s00170-008-1562-x.
 6. Chang H.-C., Li A.C. Automatic inspection of turbine blades using a 3-axis CMM together with a 2-axis dividing head. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005. No.26. Pp. 789-796. DOI: 10.1007/s00170-003-1877-6.
 7. Savio E., Chiffre L. De., Schmitt R. Metrology of freeform shaped parts // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2007. Vol. 56, No. 2, P. 810-835. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.008.
 8. Groch D., Poniatowska M. Simulation tests of the accuracy of fitting two freeform. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019. Vol. 21. Pp. 23-30. DOI: 0.1007/s12541-019-00252-4.
 9. Zhang Z., Zhang Z., Jin X., Zhang Q. A novel modelling method of geometric errors for precision assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. Vol. 94. Pp. 1139–1160. DOI: 10.1007/s00170-017-0936-3.
 10. Nepomiluev V.V., Majorova E.A. Optimizatsiya metoda individual'nogo podbora dlja mnogozvennykh razmernykh cepej [Optimization of the individual selection method for multi-link dimensional chains] / V.V. Nepomiluev, E.A. Majorova *Izvestiya MGTU «MAMI» [News of MGTU «MAMI»]*. – 2008. – Vol. 2. – No.6. – Pp. 302-309.
 11. Osipovich D.A., Yarushin S.G., Makeyev A.B. Issledovaniye algoritmov podbora lopatok pri sborke soplovykh apparatov gazoturbinnogo dvigatelya [Investigation of the algorithms for the selection of blades during the assembly of gas turbine engine nozzles] / D.A. Osipovich, S.G. Yarushin. Makeyev A.B. – Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii [Assembly in mechanical engineering, instrument making]. – 2018. – No. 7 (216). – Pp. 313-319.
 12. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*, 2001. Vol. 45. No. 1. Pp. 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
 13. Cristianini N., Shawe-Taylor J. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. Cambridge University Press, 2000. DOI: 10.1017/CBO9780511801389.
 14. Murphy K. P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press. 2012. Chapter 14.4.3, Pp. 492-493.

УДК 51.74

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2023 М.Х. Дуббесса

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.01.2023

В статье проведено исследование особенностей методов, применяемых для контроля и диагностики технического состояния бортовых электрических систем летательных аппаратов на примере аналитических, табличных и логических моделей. Выделены достоинства и недостатки этих моделей. По результатам анализа установлено, что в современных условиях интеллектуализации бортовых электрических систем, а в частности систем электроснабжения и формирования единого информационного пространства целесообразно использовать комплексную контрольно-диагностическую систему.

Ключевые слова: контроль, диагностика, модель, бортовая электрическая система, летательный аппарат.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-36-42

Одним из аспектов нормативно-правового регулирования использования летательных аппаратов (ЛА) в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой технической документации является обеспечение безопасности их производства и производственной инфраструктуры. Технология изготовления определяет, насколько могут быть реализованы потенциальные возможности конструкции. Статистика свидетельствует, что до 80% отказов в работе изделий возникает при их изготовлении на заводах-изготовителей [1]. На данном этапе надежность зависит от обоснованности и полноты требований конструкторской и технологической документации на показатели качества деталей, методов контроля и испытаний [2].

К основным потенциально опасным объектам авиационной техники относятся системы электроснабжения (СЭС). Далее будем смотреть проблемы БЭС на примере СЭС. Большинство аварий, связанных со СЭС ЛА, имеет скрытый характер и проявляется лишь после соответствующих контроля или испытаний. Основными причинами возникновения аварий и низкой энергоэффективности СЭС ЛА являются: игнорирование фактора влияния качества напряжения питания и режимов нагрузки на надежность и безотказность СЭС ЛА, недостаточный объем информации о техническом состоянии элементов, отсутствие эффективной непрерывной защиты источников питания, несвоевременное выявление и устранение дефектов, некачественный монтаж оборудования.

*Дуббесса Мулубиркан Хайле, аспирант.
E-mail: muluselam@mail.ru*

Кроме того, в настоящее время отмечается постоянно растущий спрос на электроэнергию в ЛА. Современные ЛА становятся более электрическими и требуют использования различных видов источники электрической энергии как новых типов химических (аккумуляторных батареи 28В) и генераторы переменного тока переменной частоты 200В, 350~800Гц с различными преобразователями электрической энергии [3–5].

В данном контексте поддержка надежной работы оборудования электроэнергетических систем и электрических сетей ЛА, а также обеспечение качества электрических параметров СЭС ЛА в условиях переходных процессов в нормальных, ненормальных и аварийных режимах работы является стратегической задачей, которая предполагает необходимость эффективного разрешения комплексной проблемы контроля, диагностики, оценки и обеспечения надежности СЭС ЛА. Целью контроля и диагностики являются обеспечение рациональной производства СЭС ЛА при заданных показателях надежности и сокращении расходов на его проверки и испытания. Эта цель достигается путем управления техническим состоянием электрооборудования в процессе производства, что позволяет выполнять задачи оценки и оценивания состояния СЭС ЛА в соответствии с данными контроля и диагностики. Контроль и диагностика проводятся, как правило, с использованием мобильных или переносных технических средств, а также путем установления специального оборудования в реальном режиме времени (on-line) [6].

Внедрение эффективных систем контроля и диагностирования СЭС особенно актуально для современного ЛА, требующих надежных конструкции, крепеж элементов и совершенство технологии их соединений. Выполнение высоконагруженных соединений является одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов монтажа СЭС ЛА.

Необходимо отметить, что сложность процессов контроля и диагностики СЭС ЛА обусловила появление значительного количества различных методов и подходов, каждый из которых имеет свои преимущества, недостатки и сферу использования. Наиболее распространенными контрольно-диагностическими моделями являются аналитические, табличные и логические модели, которые позволяют обеспечивать выявление дефектов на работающем или выведенном из работы для обследования (но неразобранном) оборудовании; прогнозировать развитие дефектов, оценивать их опасность и общее состояние ключевых узлов; создавать базу для подготовки рекомендаций по дальнейшей эксплуатации и техническому обслуживанию отдельных модулей (например, немедленный вывод в ремонт, смещение сроков плановых ремонтов, работа без ограничений и т.д.).

В то же время необходимо отметить, что начало XXI века ознаменовалось появлением новой концепции энергоснабжения и энергообеспечения в различных отраслях промышленности, в том числе и в авиации, основу которой составляют принципы энергоэффективности, интеллектуальные энергетические системы и новые источники генерации энергии. Эти сдвиги обуславливают необходимость пересмотра и переосмысления методов контроля и диагностики, поскольку с помощью использования новейших технологий интеллектуальной сети (Smart Grid) электроэнергетические системы дополняются «искусственным интеллектом», что позволяет существенно повысить эффективность их функционирования.

Таким образом возникает настоятельная необходимость исследования эффективности и надежности моделей контроля и диагностирования состояния объектов СЭС ЛА, учитывая существующие тенденции, касающиеся ужесточения требований к эффективности процессов контроля и диагностики за счет автоматизации процесса измерений и регистрации, уменьшения количества обслуживающего персонала и повышения скорости получения оперативной информации о техническом состоянии электрооборудования ЛА, что в целом обуславливает актуальность, теоретическую и практическую значимость темы данной статьи.

Значительный вклад в решение вопросов разработки научно-технических основ контро-

ля и диагностирования технического состояния систем электроснабжения и распределения на ЛА внесли такие отечественные и зарубежные ученые как: Александровская, Л.Н., Воробьев В., Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.И., Стогний Б.С., Алексеев Б.А., Boss P., Ecknauer E., Gysi R., Knab HJ, Leibfried Th. и др [7–9].

Активно развиваются и внедряются комплексные системы контроля и диагностики энергетических систем ЛА, разработанные в России и других странах Мира. Комплекс контроля и диагностирования, например, основной изоляции трансформаторов на базе информационно-технического комплекса «Регина», системы SAFE-T, TDM, СУМ-ТО. Существует также ряд разработок США и стран Евросоюза (системы TPAS, Siemens TMDS, ABB TEC, AREVA T&D MS 3000).

В то же время указанные системы контроля и диагностирования имеют достаточно высокую стоимость аппаратного и программного обеспечения, кроме того, алгоритмы их работы не всегда позволяют достоверно оценивать техническое состояние элементов и составных частей СЭС ЛА, поскольку они базируются на показателях предельного контроля за измеряемыми диагностическими параметрами.

Итак, вышеприведенные обстоятельства предопределили цель проводимого исследования, которая заключается в изучении особенностей методов, используемых для контроля и диагностики технического состояния СЭС ЛА на примере аналитических, табличных и логических моделей.

ЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЭС ЛА

Логистическая модель рассматривает в целом архитектуру СЭС ЛА, которая обобщенно понимается как структура и алгоритм функционирования ее определенных элементов. В функциональном аспекте структура исследуемого объекта представляется в виде совокупности взаимосвязанных одно функциональных узлов, предназначенных для выполнения простых функций, затем определяются необходимые взаимосвязи между ними, технические параметры и характеристики каждого узла. Алгоритм функционирования отражает характер и последовательность взаимодействия между узлами при реализации закона функционирования, то есть внутреннее поведение объекта.

Перед процессом контроля и диагностирования состояния СЭС ЛА на основании модели соединений заранее составляется структурно-логическая схема надежности системы, которая отражает состав ее элементов, формализацию

связей между ними и особенности их взаимодействия. Связи между элементами схемы представляются в виде последовательного, параллельного и комбинированного соединений. При этом с целью расчета надежности используется выражение для простых последовательных и параллельных структур, а в случае смешанных схем проводится поэтапный эквивалентный расчет схемы в известной структуре. В тоже время необходимо иметь в виду, что параллельные и последовательные соединения в контексте надежности могут не совпадать со схемами соединения в электрических схемах.

На рис. 1 в качестве примера приведена функционально-логическая модель системы предпускового контроля двигателя внутреннего сгорания (ДВС) энергетической установки ЛА, в которой, в соответствии с логикой работы системы электрического пуска двигателя, дополнительно введен блок управления режимом работы масло закачивающего насоса; блок управления режимом работы аккумуляторных батарей; блок защиты двигателя от нарушения технологии подготовки пуска, который состоит из четырех датчиков (уровня охлаждающей жидкости и масла, температуры и давления масла) [10].

Один из главных недостатков этого метода заключается в том, что задача синтеза архитектуры современных СЭС ЛА в целом формализуется трудно и в наше время ее решают, как правило, эвристически - на основе опыта и интуиции разработчика. Кроме того, решение задачи затруднено из-за большого количества

альтернативных вариантов, поскольку современная элементная база СЭС - это существенно неоднородной базис для синтеза, что делает возможным использование как простых компонентов, так и сложных микроэлектронных изделий, а также позволяет строить цифровую аппаратуру как по принципу «жесткой логики» (когда структура устройства однозначно определяет алгоритм функционирования), так и по принципу «программируемой логики» (когда при фиксированной структуре аппаратных средств возможна реализация различных алгоритмов) [11,12]. В последнем случае появляются многочисленные варианты распределения функций между аппаратными и программными средствами. Это дополнительно усложняет задачи контроля и диагностирования, поскольку необходимо выполнять сравнительную оценку вариантов как по составу и характеристикам аппаратных средств, так и по параметрам программного обеспечения.

Кроме того, к недостатку этих моделей можно отнести достаточно грубые предположения. Например, все неисправности считаются однократными, либо же допускается, что вероятность появления в системе единичных дефектов значительно выше вероятности одновременного появления двух и более дефектов.

Результатом решения задач контроля и диагностирования состояния СЭС ЛА с использованием логической модели является построенная на функционально-логическом уровне модель структуры СЭС M_c и модель алгоритма ее функционирования M_a , первая из которых отражает

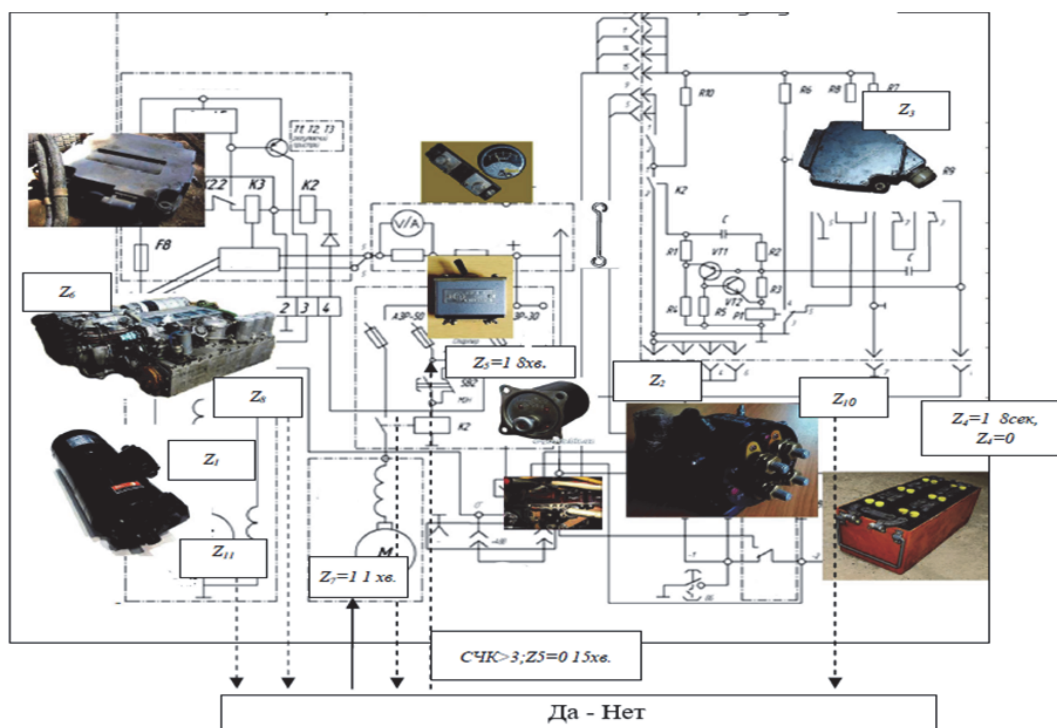


Рис. 1. Функционально-логическая модель системы предпускового контроля ДВС

наличие функциональных узлов и взаимосвязи между ними, а вторая описывает алгоритм функционирования, часто без конкретизации аппаратной реализации. Математическую модель объекта функционального аспекта представляют в виде некоторого математического оператора F_1 , который превращает вектор \vec{Z} параметров моделей M_c и M_a и вектор внешних воздействий \vec{Q} в вектор выходных параметров \vec{Y} :

$$\vec{Y} = F_1(\vec{Z}, \vec{Q}).$$

Содержание момента контрольно-диагностической модели СЭС ЛА заключается в решении следующих задач:

а) определение перечня соответствующих показателей надежности работы исследуемых элементов СЭС с учетом специфики их функционального назначения, режимов работы, параметров элементной базы, которые определяют виды и механизмы отказов;

б) распределение требований относительно показателей надежности составных частей структуры и предварительная оценка показателей надежности;

в) определение путей и способов обеспечения заданных требований в соответствии с показателями надежности.

В общем случае показатель надежности СЭС устанавливают, предположив, что к некоторому моменту времени t_0 объект выключен или находится в резерве, а в момент t_0 начал функционировать. Поэтому показатель надежности подают в виде:

$$P(T) = P(t_0)P(t_0, T), t_0 < T,$$

где $P(t_0)$ – вероятность того, что в момент t_0 объект работоспособен;

$P(t_0, T)$ – вероятность правильного функционирования объекта на интервале времени $DT=[t_0, T]$, при условии, что в момент начала функционирования t_0 объект был работоспособным.

В такой формулировке показатель $P(t_0)$ трактуют как функцию готовности, характеризующую состояние структуры (техническое состояние) СЭС в момент t_0 , а показатель $P(t_0, T)$ определяет вероятность правильного функционирования (функциональное состояние) объекта на интервале DT .

Преимуществом логических моделей контроля и диагностирования состояния СЭС является то, что с их помощью решают не только задачи анализа надежности систем, то есть установление значений показателей функции готовности и вероятности правильного функционирования элементов и составляющих СЭС ЛА, в зависимости от принятых значений параметров моделей, но и задачи синтеза надежности системы, а также ее оптимизации.

ТАБЛИЧНЫЕ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ СЭС ЛА

Согласно табличной модели контроля и диагностирования состояния СЭС ЛА поочередно рассматривается отказ элементов электроустановки, выявляются его последствия в нормальном и отказных состояниях. Расчет выполняют в табличной форме: по вертикали фиксируют ряд наблюдаемых элементов (i -й ряд), а по горизонтали – ряд расчетных режимов (j -й ряд).

В качестве универсальной математической модели для синтеза алгоритма диагностики отказов СЭС используется таблица функций неисправности (ТФН), в которой столбцы соответствуют допустимым элементарным проверкам (диагностическим параметрам), а строки – техническим состояниям объекта контроля и диагностирования (ОКД).

В строках таблицы указывают все возможные проверки Z_j , которые могут быть использованы в процедуре диагностики. Столбцы таблицы соответствуют исправному S_0 состоянию СЭС и всем возможным неисправным состояниям S_1, S_2, \dots, S_k . Каждое неисправное состояние соответствует одной неисправности (одиночной или кратной) из заданного класса неисправностей, по которому проводятся тест. На пересечении i -го столбца и j -ой строки проставляется результат R_{ij} j -й проверки для системы, находящейся в i -м состоянии. Каждая строка таблицы является двоичным кодом состояния модели при отказе соответствующего элемента. Двоичные коды строк не совпадают друг с другом, то есть все одиночные отказы имеют отличие в полном наборе исходных параметров.

Каждая строка ТФН соответствует одной элементарной проверке и обозначается символом этой проверки. Считается, что каждому элементу ОКД соответствует одна проверка. Каждый столбец ТФН соответствует одному техническому состоянию СЭС ЛА. ТФН содержит количество столбцов, равное числу элементов ОКД плюс единица. Для этого используются законы булевой алгебры. В случае, если есть один столбец или несколько одинаковых столбцов, такой столбец зачеркивается, а столбец неисправного состояния ТФН, который остается, заменяется столбцом некоторого эквивалентного состояния. Если окажется, что в минимизированной матрице двоичные коды некоторых строк совпадают, то такую укороченную матрицу надо дополнить минимально необходимым числом параметров, чтобы все строки отличались.

Рассмотрим особенности использования табличной модели контроля и диагностирования состояния СЭС ЛА на примере представленной на рис. 1 системы предпускового контроля ДВС.

Каждый элемент диагностирования может находиться в двух состояниях - работоспособном или неработоспособном. Работоспособному состоянию поставим в соответствие значение «1», а неработоспособному – «0». Запишем множество $Z = \{z_1, \dots, z_n\}$, каждый элемент которого определяет элементы модели диагностирования. Z_1 - стартер-генератор; Z_2 - реле-регулятор; Z_3 - реле стартер-генератора; Z_4 - пусковая аппаратура; Z_5 - аккумуляторные батареи; Z_6 - предохранитель; Z_7 - автомат; Z_8 - вольтамперметр; Z_9 - розетка внешнего пуска; Z_{10} - кнопка стартера.

Кроме того, в перечень элементов таблицы функций неисправностей введем элементы, которые задействованы в процессе пуска двигателя: Z_{11} - двигатель; Z_{12} - масло закачивающий насос. По аналогии предлагается проводить организацию опроса датчиков. Z_{13} - датчик температуры масла двигателя; Z_{14} - датчик уровня охлаждающей жидкости; Z_{15} - датчик уровня масла двигателя; Z_{16} - датчик давления масла двигателя.

Результаты опроса предлагается подавать в бинарном виде. Недопустимо низкому значению контролируемого параметра соответствует логическое значение. Таким образом, количество строк в таблице будет равняться $n = 16$. Количество столбцов в таблице будет определять-

ся работой системы по функциональной схеме и равняться $m = 16 + 1 = 17$. Множество технических состояний СЭС ЛА, которое было определено с учетом режимов работы системы электропуска на основании табличной модели контроля и диагностирования представлено в табл. 1.

К преимуществам табличной модели контроля и диагностирования состояния СЭС ЛА можно отнести следующие возможности:

- использование минимальной совокупности диагностических параметров для проверки работоспособности системы;
- организация поиска неисправности комбинационным методом;
- определение минимальных частных наборов диагностических параметров для проверки работоспособности отдельных функциональных элементов системы;
- построение дешифратора технического состояния системы для устройства автоматического контроля и поиска неисправностей;
- полученная от системы мониторинга информация предоставляет возможность быстрого обнаружения поврежденного элемента для выполнения ремонтных работ с целью восстановления нормального режима функционирования электрических сетей в случае возникновения аварии.

Таблица 1. Таблица функций неисправности СЭС ЛА

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}
Z_1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
Z_2	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1
Z_3	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Z_4	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
Z_5	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
Z_6	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
Z_7	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
Z_8	0	1	1	1	0	2	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
Z_9	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Z_{10}	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1
Z_{11}	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
Z_{12}	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
Z_{13}	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1
Z_{14}	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1
Z_{15}	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Z_{16}	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0

Ограничением и недостатком табличных моделей является то, что в них отражаются не логические связи между элементами контроля и диагностики, а функциональные зависимости в составе комплектующих элементов, что при их значительном количестве затрудняет выявление причин, вызывающих отказы оборудования. Иными словами, табличные модели позволяют фиксировать контролируемые параметры, но не предоставляют оперативной информации о месте повреждения в СЭС ЛА.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЭС ЛА

Аналитические модели используют для определения состояния и диагностирования неисправностей СЭС ЛА разнообразный математический инструментарий, например, функции алгебры логики.

Согласно аналитическим моделям главную схему СЭС ЛА и ее элементы подают в виде некоторых функций работоспособности или функций неработоспособности (ФНС). Функции работоспособности используют для сравнительно простых схем электроснабжения, функции неработоспособности - для более сложных.

Порядок использования аналитических моделей для диагностирования состояния СЭС ЛА предусматривает следующие этапы расчета:

1. Предварительное упрощение первоначальной схемы электрических соединений системы путем эквивалентирования однотипных элементов.
2. Преобразование эквивалентной схемы в схему замещения и расчет эквивалентных параметров с использованием выбранного математического инструментария.
3. Расчет количественных показателей надежности для эквивалентной схемы, в том числе функции работоспособности S и вероятностных полиномов R .
4. Расчет числовых значений количественных показателей надежности главных схем, например, времени наработки главной схемы до отказа.

По своему содержанию аналитическая модель диагностирования состояния СЭС является дедуктивным методом и применяется тогда, когда количество различных видов отказов системы невелико. Преимуществами аналитических моделей является то, что они позволяют диагностировать отказы и неисправности СЭС с определенной степенью нарушения работоспособности установок - отказ линий, трансформаторов, погасание секций, возникновения дефицита мощности в системе, а также при различных сочетаниях указанных аварий.

Недостатки аналитических моделей контроля и диагностирования определяются особенностями того метода или алгоритма, который составля-

ет их основу. Так, например, при использовании символического метода представления синусоидальных величин значительно упрощается расчет электрических цепей, что ограничивает его применение исключительно в установившемся режиме и требует использования метода наложения при моделировании нелинейной нагрузки.

В свою очередь аналитические модели позволяют решать более широкий класс задач, а при современном уровне развития средств вычислительной техники и существующих специальных программных комплексов процесс определения неизвестных функций значительно упрощается. Однако обработка значительных массивов информации, полученных от модели с использованием аналитических методов, даже для мощностей современной вычислительной техники может занимать значительное количество время-машинных ресурсов. Это предполагает необходимость применения аппарата нейронных сетей для расчета управляющего воздействия, что является достаточно сложной задачей, требующей квалифицированного персонала и определенных временных и финансовых ресурсов, что безусловно является ограничениями и в определенном смысле недостатками аналитических моделей.

Таким образом, подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. В условиях эволюции развития электрических сетей и СЭС ЛА, а также их стремительной интеллектуализации не подлежит сомнению тот факт, что использование только одной модели контроля и диагностирования является нецелесообразным, поскольку это не позволит получить достоверную и всестороннюю информацию о состоянии узлов и элементов СЭС ЛА. Представляется, что на современном этапе необходимо использовать комплексную контрольно-диагностическую систему, которая будет базироваться на синтезе математических моделей и методов оптимизации электропотребления, позволит учитывать глубину взаимной интеграции электросетевой инфраструктуры и информационной компьютерной архитектуры современного ЛА со всеми функциональными и логическими связями, которые существуют между элементами контура электроснабжения. Все это позволит получить точную оценку технического состояния СЭС ЛА, повысить надежность работы ключевых узлов, снизить повторных испытательных полетов, сократить затраты на испытания и оптимизировать производственные процессы контроля и испытания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович, В.И. Теоретические основы обеспечения надежности летательных аппаратов на стадии их производства [Электронный ресурс]: [учеб. пособие] / В. И. Богданович. – Самара: СГАУ, 2007. – 92 с.

2. Xia, Jinsong. Modeling and Prediction of the Reliability Analysis of an 18-Pulse Rectifier Power Supply for Aircraft Based Applications // IEEE access: practical innovations, open solutions. 2020. Volume 8. Pp 47063-47071.
3. Ian Moir and Allan Seabridge (2008), Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition ed, John Wiley & Sons, Ltd.
4. R.P.G. Collinson (2011), Introduction to Avionics Systems, Third Edition, Springer Science + Business Media B.V.
5. Коптев, А.Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации [Электронный ресурс]: [учеб. пособие] / А.Н. Коптев. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011.
6. Schefer, Hendrik. Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft // IEEE access: practical innovations, open solutions. 2020. Volume 8. Pp 84188-84216.
7. Александровская, Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [текст] / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов, В.А. Кузнецов, А.А. Кутин, А.М. Шолом. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
8. Воробьев, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования учебник / В.Г. Воробьев. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с.
9. Чинючин, Ю.М. Основы технической эксплуатации и ремонта АТ. Учебное пособие / Ю.М. Чинючин, И.Ф. Полякова. – М.: МГТУ ГА, 2004. – 81 с.
10. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
11. Yang, Yuanchao. Power Management Problem for Civil Aircraft under More Electric Environment // International journal of aerospace engineering. 2020. Volume 2. Pp. 28-34.
12. Aygun, Hakan. Exergo-economic cost analysis for a long-range transport aircraft propulsion system at non-linear power loads // Energy: the international journal. 2020. Volume 204. Pp. 13-28.

MATHEMATICAL MODELS OF OBJECT MONITORING AND DIAGNOSING FOR AIRCRAFT ONBOARD ELECTRICAL SYSTEMS TO DETERMINE THEIR TECHNICAL CONDITIONS

© 2023 M.H. Dubbessa

Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

The article studies the features and methods used to monitor and diagnose the technical condition of onboard electrical systems by using as an example analytical, tabular and logical models. The advantages and disadvantages of these models are highlighted. Based on the analysis results, applying a complex monitoring and diagnostic system is advisable to establish up to date intellectualization of onboard electrical systems, specifically aircraft electrical power supply systems and formation of a single information space.

Keywords: monitor, diagnostics, model, onboard electrical system, aircraft.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-36-42

REFERENCES

1. Bogdanovich, V.I. Teoreticheskie osnovy obespecheniya nadezhnosti letatel'nyh apparatov na stadii ih proizvodstva [Elektronnyj resurs]: [ucheb. posobie] / V. I. Bogdanovich - Samara: SGAU, 2007. – 92 s.
2. Xia, Jinsong. Modeling and Prediction of the Reliability Analysis of an 18-Pulse Rectifier Power Supply for Aircraft Based Applications // IEEE access: practical innovations, open solutions. 2020. Volume 8. Pp 47063-47071.
3. Ian Moir and Allan Seabridge (2008), Aircraft Systems Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition ed, John Wiley & Sons, Ltd.
4. R.P.G. Collinson (2011), Introduction to Avionics Systems, Third Edition, Springer Science + Business Media B.V.
5. Коптев, А.Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации [Elektronnyj resurs]: [ucheb. posobie] / A.N. Koptev. - Samara: SGAU, 2011.
6. Schefer, Hendrik. Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft // IEEE access: practical innovations, open solutions. 2020. Volume 8. Pp. 84188-84216.
7. Александровская, Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [текст] / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов, В.А. Кузнецов, А.А. Кутин, А.М. Шолом. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
8. Воробьев, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования учебник / В.Г. Воробьев. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с.
9. Чинючин, Ю.М. Основы технической эксплуатации и ремонта АТ. Учебное пособие / Ю.М. Чинючин, И.Ф. Полякова. – М.: МГТУ ГА, 2004. – 81 с.
10. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий. – ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
11. Yang, Yuanchao. Power Management Problem for Civil Aircraft under More Electric Environment // International journal of aerospace engineering. 2020. Volume 2. Pp. 28-34.
12. Aygun, Hakan. Exergo-economic cost analysis for a long-range transport aircraft propulsion system at non-linear power loads // Energy: the international journal. 2020. Volume 204. Pp. 13-28.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2023 А.Н. Коптев, С.Ф. Тлустенко

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 13.02.2023

Предложена методика оптимизации производства летательных аппаратов, технологических систем и процессов. Показан способ упорядочения и систематизации исходных данных при постановке и решении задачи распределения ресурсов производства. Рассмотрен способ синтеза и анализа производственной среды как дискретно-непрерывного пространства, в пределах которого можно выделить относительно однородные локальные подструктуры, для описания которых можно построить эффективные адекватные математические модели, предложить способы их формализованного описания, методы оптимизации при синтезе конкретных производственных схем. Введено понятие множеств в его приложении к процессам формирования баз данных граничных управляемых переменных по оптимальным значениям выходных переменных. Показана методика построения и вычисления главной целевой функции оптимизации ПС, которая включает и определяется структурой и взаимосвязями входящих подсистем с их характеристическими локальными целевыми функциями.

Ключевые слова: производственные процессы, информационная система, математическая модель, компактные множества, матричное описание процессов, локальные подсистемы, упорядочения баз данных, целевая функция, факторы эффективности.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-43-47

Оптимизация организационно-технических систем (ОТС) производства в настоящее время является одним из основных факторов устойчивого развития предприятий аэрокосмического профиля. Определяющим фактором эффективности производственной системы (ПС) является качество и производительность труда при минимальных затратах ресурсов. Анализ ПС показал, что такие требования выполняются в условиях комплексной автоматизации производства. Построение оптимальной модели реальной технологической системы (ТС) и процесса как объекта управления и производства определяется тем, что такие системы и процессы в основном не стационарны, не линейны, многомерны по внутренним прямым и обратным структурным и функциональным связям. Сложной задачей является создание баз данных по априорной информации, о форме и степени взаимосвязи между переменными в динамике в реальном масштабе времени. Это значительно усложняет получение адекватного (изоморфного) математического описания производственных и технологических процессов как объектов управления (автоматов) при некотором множестве варьируемых элементов $N=\{1,2,\dots, n\}$.

Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор института авиационной техники. Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

Систематизация производственных процессов связана с решением задач упорядочения. Для определения и оценки исходных значений баз данных необходимо выполнить построение одной или более перестановок, удовлетворяющих определенным ограничениям и соответствующих экстремуму некоторых функций, определенных на рассматриваемом множестве значений параметров и начальных условий. Вариант перестановки можно представить последовательностью элементов из множества $N=\{1,2,\dots, n\}$, или при символической записи в виде: $\pi = (i_1, i_2, \dots, i_n)$, где i_n - элемент из N , занимающий в последовательности π k -е слева место в рассматриваемой последовательности мест K , или в виде матрицы $\|x_{ij}\|$ размерности $n \times n$, элементами которой являются числовые значения параметров процессов. При этом значение $x_{ij} = 1$ соответствует записи (i, j) , а сумма элементов в такой матрице, стоящих в каждой строке и каждом столбце, равна 1. Рассмотрим два n -мерных вектора $(\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ и $(\beta = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$, компоненты которых - действительные числа. Обозначим через $\pi=(i_1, i_2, \dots, i_n)$ некоторую перестановку элементов множества $N=\{1,2,\dots, n\}$. В этом случае построение оптимальных перестановок можно выполнить по формуле: $f_1(\pi) =$

$$f_1(\pi) \sum_{i=1}^n \alpha_k \cdot \beta_k .$$

Покажем пример построения перестановки π^* элементов множества N , кото-

рой соответствует наименьшее значение $f_1(\pi)$. Будем предполагать, что компоненты вектора α и β пронумерованы так, что $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_n$.

Для расчёта и анализа вариативных показателей эффективности производства рассмотрим вариант перестановки π^1 , отличающийся от варианта π транспозицией элементов i_k и i_{k+1} . При этом $f_1(\pi^1) - f_1(\pi) = (\alpha_k - \alpha_{k+1})(\beta_{ik+1} - \beta_{ik})$. Если $\beta_{ik} \geq \beta_{ik+1}$, то эта разность неотрицательна.

Таким образом, упорядочивая числа β_i в порядке их не возрастания, получаем искомый результат: $\pi_1^* = (i_1^*, i_2^*, \dots, i_n^*)$, где $\beta_{ik}^* \geq \beta_{ik+1}^*$ для всех K .

Так как показатели эффективности зависят от граничных условий и целей исследования, условий работы конкретной ПС или входящей в неё ТС и системы управления, то эти показатели можно представить некоторой математической моделью, эквивалентной ПС, включающей отдельные требования и характеристики общей цели. Такое описание ПС может содержать целевое указание на связь между отдельными элементами системы и целевыми функциями в пределах общего влияния структуры системы на показатель эффективности, а также заданием условий её функционирования и связей между конкретными параметрами системы и составляющими показателей эффективности для вычисления количественных оценок этих показателей, используя данные о структуре и параметрах системы.

При исследовании общего влияния структуры на показатели эффективности рассмотрим характеристики структурной эффективности ТС производства при достижении многих целей с контролем, анализом и оптимизацией сразу нескольких выходных величин (рисунок 1). Общая система состоит из структурных входящих подсистем, которые описываются выражениями:

$$\varphi_j = f_j(x_1, \dots, x_m), \quad j = 1, 2, \dots, r,$$

где x_i – управляемые переменные; j_j – выходные переменные. Главная целевая функция зависит от локальных целевых функций, определяемых через j_j , от структуры связей между подсистемами, от вида функций j_j .

Пусть задача некоторой управляющей системы заключается в получении максимума выражения $\Phi(G - M)$, где G – ресурсы, а M – расход.

Если система может управлять двумя переменными: x_1 и x_2 , то имеем: $G = f_1(x_1, x_2)$, $M = f_2(x_1, x_2)$, тогда: $\max \Phi(G - M) = \max_{(x_1, x_2)} [f_1(x_1, x_2) - f_2(x_1, x_2)]$.

В современных условиях развития автоматизированных производственных систем необходимо совершенствовать методологическую базу формализованного описания процессов и систем, позволяющую оперативно корректировать существующие знания и закономерности, на базе которых уже созданы и функционируют системы автоматизации ТС при условии, что процесс управления должен включать следующие элементы (рисунок 1).

Оптимизация производственных решений в такой системе необходима как на уровне проектирования и построения новых структур, так и в действующем производстве. В соответствии с иерархией производства предлагается исследование составляющих подсистем общей производственной системы как локально функционирующих структур с условием их оптимального синтеза в последующих процессах интеграции в единую систему и вычисления основных критериев функционирования.

На вероятностном уровне причинно-следственная связь между входной $X_{\text{впр}}$ и выходной $Y_{\text{вык}}$ функциями для ТС устанавливается оператором A_t : $y(t) = A_t x(t)$. В блоке управления может реализоваться и обратный оператор:

$$\bar{A}_t : x(t) = \bar{A}_t y(t),$$

так как в этом случае следствие $y(t)$ выступает в роли причины, а причина $x(t)$ – в роли следствия, что имеет значение в зависимости от постановки целей решаемых задач.

Иерархическая структура и характер функционирования ПС позволяют вводить количественные оценки эффективности взаимодействия её компонент в процессе построения адекватной условиям производства математической модели. Получение количественных и качественных оценок функционирования технологической системы связано с определением наиболее вероятных условий ее работы с учетом ограничений.

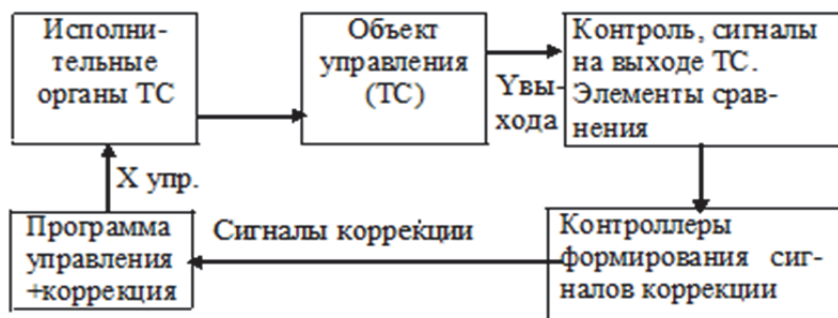


Рисунок 1. Блок-схема процесса многокритериального управления ТС производства в условиях автоматизации

Система условий производства имеет несколько обобщенный характер по отношению к объектам и предметам труда. Однако логично в постановке и решении задач принимать во внимание лишь те из этих условий, которые существенным образом влияют на основные исследуемые факторы и, соответственно, результаты: виды и объемы потребляемых ресурсов, реализуемые производственные и технологические схемы, в последующем действии, а также лишь некоторые из значений, принимаемых этими условиями. Целью такого подхода в исследуемом процессе является обособление системы. Соответствующее формализованное описание таких систем можно создать на основе систематизации граничных условий по целевому критерию решаемой задачи по методике, согласно которой предполагаем:

- число учитываемых условий равно W_r , где $r = 1, 2, \dots, t$; (1);

- реализации упорядочиваются: $\omega_{r\min} \leq \omega_{rs} \leq \omega_{r\max}$, где $S = 1, 2, \dots, u$ для каждого из условий W_r (2).

- обособленную систему W , которая характеризуется упорядоченным множеством условий, можно представить в виде матрицы:

$$W = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1u} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{t1} & \omega_{t2} & \dots & \omega_{tu} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Тогда для обеспечения определения наиболее вероятных по оптимальности условий необходимо (кроме значения условий реализации) знать вероятности (частоты) проявления условия W_r :

$$E = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1u} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2u} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{t1} & v_{t2} & \dots & v_{tu} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В матрице (2) v_{rs} представляет собой вероятность (частоту) s -й реализации r -го условия.

Матрицу W в математической модели мы будем называть матрицей условий, а матрицу E – матрицей вероятностей.

Наиболее вероятные условия определяются в результате умножения элементов матрицы условий на соответствующие им элементы матрицы вероятностей с последующим суммированием произведений по строкам:

$$EW = \begin{bmatrix} EW_1 \\ EW_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ EW_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^u \omega_{1s} & v_{1s} \\ \sum_{s=1}^u \omega_{2s} & v_{2s} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \sum_{s=1}^u \omega_{ts} & v_{ts} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Алгоритм расчётов общей суммы эксплуатационных и производственных затрат аналогичен получению по данной схеме общей зависимости производственных затрат. Однако эксплуатационные затраты в отличие от производственных зависят от времени, так как потребление ресурсов в эксплуатации происходит с течением времени эксплуатации, то есть в течение всей продолжительности последующего действия τ_r . Следовательно, потребление ресурсов будет выражаться показательными функциями, то есть как потребление, приходящееся на единицу времени. Обозначим такое потребление через N_v^*, n_v^* . В этом случае суммарное потребление ресурсов в подготовительной части последующего действия составит $N_v = N_{v\tau v}^*$ или $n_v = n_{v\tau v}^*$. Для определения интегрального показателя эффективности производства и качества изделий и с учётом характеристики потребления в виде показательной функции рассмотрим наиболее общий случай определения эксплуатационных затрат.

Допустим, задано: $i = k, r = t$. Обозначим через n_{vir}^* потребление ресурсов i -го вида при r -м условии, получим:

$$n_{vir}^* = [g(X)]_r / EW_r.$$

Построим матрицу затрат ресурсов (4), в которой элементы этой матрицы представляют элементарные затраты: i -ая строка матрицы характеризует потребление i -ого вида ресурсов при наличии всех t условий, а ее r -й столбец – потребление всех видов ресурсов при r -м условии.

$$N_v^* = \begin{bmatrix} n_{v11}^* & n_{v12}^* & \dots & n_{v1t}^* \\ n_{v21}^* & n_{v22}^* & \dots & n_{v2t}^* \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ n_{vk1}^* & n_{vk2}^* & \dots & n_{vkt}^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После построчного суммирования элементов матрицы, имеющих одну и ту же единицу размерности, получим следующую матрицу затрат:

$$N_v^* = \begin{bmatrix} \sum_{r=1}^t n_{v1r}^* \\ \sum_{r=1}^t n_{v2r}^* \\ \dots \\ \sum_{r=1}^t n_{vk}^* \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Умножая элементы матрицы (5), как и по методике с определением производственных затрат, на соответствующие им элементы матрицы (6) весовых коэффициентов, придающих одинаковую размерность всем видам ресурсов:

$$\begin{bmatrix} \dot{a}_1 \\ \dot{a}_2 \\ \dots \\ \dot{a}_k \end{bmatrix}, \quad (8)$$

получим матрицу эксплуатационных затрат в стоимостном выражении:

$$\bar{N}_v^* = \begin{bmatrix} a_1 \sum_{r=1}^t n_{v1r}^* \\ a_2 \sum_{r=1}^t n_{v2r}^* \\ \dots \\ a_k \sum_{r=1}^t n_{vk}^* \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Поскольку элементы этой матрицы имеют одинаковую размерность, их можно суммировать в виде (8):

$$\bar{N}_v^* = \sum_{i=1}^k a_i \sum_{r=1}^t n_{vr}^*. \quad (10)$$

После преобразования получим:

$$\bar{N}_v^* = \sum_{r=1}^t n_{vr}^*. \quad (11)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При таком подходе, учитывая возможность вариации вводимых ограничений при задании начальных условий по исследуемым производственным схемам, можно строить некоторое множество вариантов моделей с адекватными получаемыми результатами решений в диапазоне допустимых вариаций. Применительно к специфике производства такая методика позволяет вводить и оперировать с некоторым существенным множеством факторов при допустимой погрешности для определения ресурсов производственных и эксплуатационных мощностей по различным условиям эксплуатации и по подразделениям производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приоритеты авиационных технологий: В 2-х кн. / Науч. ред. А.Г. Братухин. М.: Изд-во МАИ, 2004. – Кн. 1. – Гл. 1-12. – 696 с.
2. *Норенков, И.П.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И.П. Норенков, П.К. Кузьмик. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.
3. *Еленева, Ю.А.* Экономика машиностроительного производства / Ю.А. Еленева. – М.: Academia, 2016. – 297 с.
4. *Головицына, М.В.* Методы, модели и алгоритмы в автоматизированной подготовке и оперативном управлении производством РЭС: Монография / М.В. Головицына. – М.: Инфра-М, 2016. – 317 с.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING AND RESEARCHING TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN THE CONTEXT OF AUTOMATION OF THE PRODUCTION OF AIRCRAFT

© 2023 A.N. Koptev, S.F. Tlustenko

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia

The methodology for optimizing the production of aircraft, technological systems and processes is proposed. The method of streamlining and systematizing the source data is shown when setting and solving the problem of distribution of production resources. The method of synthesis and analysis of the production environment as a discrete and non- abroad space is considered, within which you can

distinguish relatively homogeneous local substructures, for the description of which you can build effective adequate mathematical models, propose methods of their formalized description, methods of optimization in the synthesis of specific production schemes. The concept of sets in his appendix to the processes of forming databases of boundary controlled variables on the optimal values of the output variables was introduced. The methodology for constructing and calculating the main target function of optimizing the PS, which includes and is determined by the structure and relationships of incoming subsystems with their characteristic local target functions.

Key words: production processes, information system, mathematical model, compact sets, matrix description of processes, local subsystems, streamlining databases, target function, efficiency factors.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-43-47

REFERENCES

1. *Prioritety aviacionnyh tekhnologij: V 2-h kn. / Nauch. red. A.G Bratuhin. M.: Izd-vo MAI, 2004. – Kn. 1. – Gl. 1-12. – 696 s.*
2. *Norenkov I.P. Informacionnaya podderzhka naukoemkih izdelij. CALS-tekhnologii / I.P. Norenkov, P.K. Kuz'mik. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2002. – 320 s.*
3. *Eleneva, Yu.A. Ekonomika mashinostroitel'nogo proizvodstva / Yu.A. Eleneva. – M.: Academia, 2016. – 297 c.*
4. *Golovicyna, M.V. Metody, modeli i algoritmy v avtomatizirovannoj podgotovke i operativnom upravlenii proizvodstvom RES: Monografiya / M.V. Golovicyna. – M.: Infra-M, 2016. – 317 c.*

УДК 656.7.658

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО ПРОИЗВОДСТВА В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ

© 2023 С.Ф. Тлустенко

Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 13.02.2023

Показаны результаты разработки методов построения стратегии технологических инноваций, способов обоснования задач постановки целей научно-технического развития предприятий в условиях неоднозначности характеристик воздействующих внешних и внутренних факторов. Показаны способы, использующие теорию нечётких множеств, нечеткие представления информации для задач, оперирующих соответствующей информацией, значительная часть которой содержит неопределенность. Анализ и методы обработки такой информации по условиям решения задач планирования стратегии развития производства представляет значительный интерес для принятия стратегических решений. Предложен алгоритм синтеза инновационной системы производства по взаимосвязи стратегии и детерминированных управляющих воздействий, содержащих четко определенные численные значения уровней воздействий и конечных результатов. Показан способ описания исходных данных задач стратегического управления в инновационной среде, содержащих неопределенность, с помощью нечетких численных значений параметров системы.

Ключевые слова: эффективность производства, технологические инновации, цифровые технологии, неопределенность, нечеткие оценки, инновационные проекты, системные представления, векторная переменная.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-48-54

К сфере стратегических решений повышения эффективности производства летательных аппаратов относятся задачи определения структуры и целей производственных и технологических инноваций (ТИ) в условиях автоматизации научно-исследовательских, конструкторско-технологических разработок и производственных комплексов на единой базе цифровых технологий. Методы и процессы научно-технического развития на уровне предприятий включают в себя вопросы целенаправленного поиска направлений технологического развития и реализации инноваций в производстве. Элементами, необходимыми для формирования стратегии научно-технологического развития предприятий, являются и способы обоснования выбора технологических инноваций (ТИ) производства. От эффективности таких способов и методов зависят процедуры постановки целей инноваций, содержание процессов формирования и распределения затрат на исследования и разработку проектов инноваций, в том числе образование фондов экономического стимулирования за разработку новых моделей и типов продукции и технологии, социально-экономические результаты внедрения ТИ, способы оценки реализации инноваций.

Управление процессами формирования стратегии научно-технологического развития предприятий оперирует информацией, значи-

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент. E-mail: titan250@mail.ru

тельная часть которой содержит неопределенность. Такие данные не могут полно определяться четкими значениями, части из них вообще нельзя дать прямую количественную оценку. С другой стороны, любые управляющие воздействия должны содержать четко определенные числовые значения уровней воздействий: объемы различных статей затрат, цена, производственные мощности и т.д. (рисунок 1).

Разработка специальных математических методов описания исходных данных задач стратегического управления в инновационной среде, содержащих неопределенность, с помощью нечетких численных значения параметров системы, позволяет создавать новые типы системных представлений со своими специфическими свойствами. Нечеткие количественные оценки, вводимые для работы в условиях неопределенности, с одной стороны, позволяют расширить круг используемых для принятия решений внутренних и внешних параметров, с другой – снизить сложность расчетов до практически приемлемого уровня в процессах синтеза структуры инновационных проектов.

При рассмотрении в различных планах результатов анализа организационно-технических и производственных систем можно выделить следующие основные типы системных представлений их построения:

- микро- и макроструктурный;
- специализированный функциональный;
- многоуровневый иерархический;

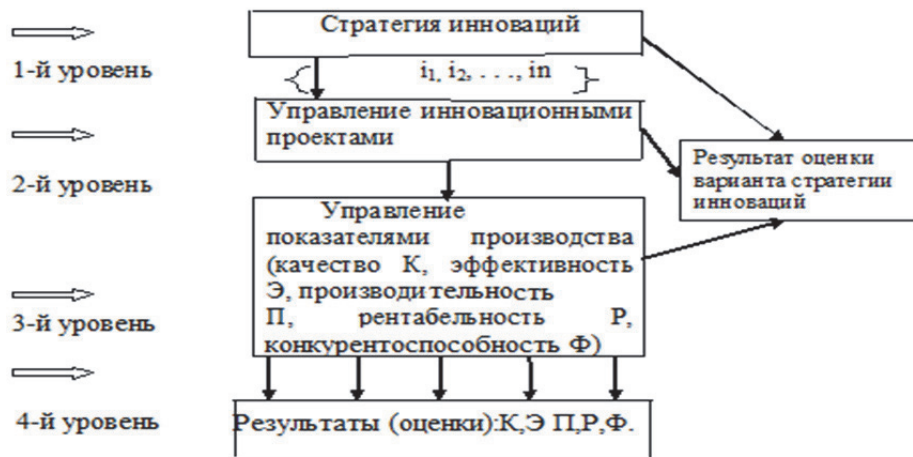


Рисунок 1. Алгоритм синтеза инновационной системы производства по взаимосвязи стратегии и детерминированных управляющих воздействий, содержащих нечетко определенные численные значения уровней воздействий и конечных результатов.

- формализованный процессуальный.

Соответственно каждый из указанных типов системных представлений со своими специфическими свойствами обладает и общими для других представлений свойствами вследствие логичных объективных целевых взаимосвязей между ними, и некоторые понятия нечётких представлений используются для описания различных взаимосвязей в системе (рисунок 2).

В общем случае современная инновационная среда представляется в виде многомерного объекта, на входе которого действует векторная переменная $x(t)$ с составляющими $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. К этим переменным относятся все свойства и характеристики производства (виды и качество продукции, технологическое оборудование, организационно-техническая структура и др). Параметры, характеризующие условия реализации инновационных процессов, на рис.2 обозначены через векторную функцию $z(t)$ с составляющими $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$. К этим параметрам относятся характеристики инновационных процессов-смена или повышение качества продукции производства, внедрение новых технологических процессов, повышение возможностей производства за счёт внедрения оборудования с числовым программным управлением и др.

Важным свойством теории нечетких множеств является формальный аппарат теории, позволяющий оперировать понятиями нечетких множеств, характеризующихся функцией принадлежности. Особенностью включаемых в расчет параметров является возможность определения характеристик также и уровней неопределенности (размытости) исходных данных. В зависимости от точности экспертных оценок устанавливается уровень и характер неопределенности, могут использоваться простые интервальные оценки, доверительные тройки (составная оценка, содержащая минимально и максимально возможные значения параметра, а также наиболее возможное из данного интервала), более сложные конфигурации, детализирующие область размытости исследуемой структуры по принципу «уровень достоверности – доверительный интервал». В этом случае фиксирование отдельных параметров из интервала $\{0,1\}$, которыми оценивается степень достоверности, может иметь относительно субъективный характер. Для представления четких множеств можно использовать следующие два способа:

- путем перечисления всех элементов множества в следующем формате записи: $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, где A – имя множества, $a_1, a_2, \dots,$

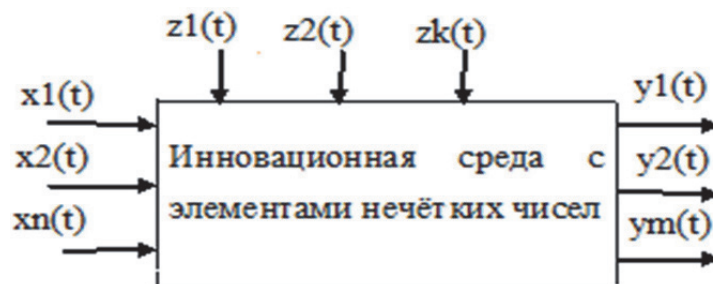


Рисунок 2. Блок-схема построения общей методики анализа и управления инновационными процессами как многомерными объектами исследования на производстве

a_n – имена элементов этого множества, n – количество элементов в множестве, где каждый элемент в списке является оригинальным (без повтора);

- путем определения характеристического свойства элементов множества с именем A , когда формат записи: $A:\{a : P(a)\}$, где A – имя множества, a – обобщенное имя элемента, $P(a)$ – предикат, который является логическим условием или процедурой для проверки того, принадлежит ли данный элемент этому множеству или нет.

Применение нечетких чисел позволяет упрощать содержание модели, опуская полное формальное описание сложных элементов и подсистем объекта, размывая оценки результирующих параметров на соответствующую величину неопределенности, вносимую данным упрощением, что существенно повышает производительность расчетов без существенного снижения их качества. Поиск решений на основе четкого моделирования содержит те же процедуры, что и в задачах с четкими параметрами, дополнительным этапом является выработка конкретных управленческих решений на основе размытого ответа. Однако не всегда удается описать знания, существенные для принятия стратегических решений, на основе количественных (даже нечетких) оценок.

Стратегическое управление инновациями на основных уровнях производственной структуры включает все существенные параметры деятельности, где необходимо использовать в качестве аналитической основы прикладные модели и методы, разрабатываемых для функционирования инновационных преобразований. Отметим, что способы вычисления функции принадлежности обеспечивают установление вполне конкретных (неслучайных) числовых значений степеней принадлежности функции. Это поясняется следующим. Функция принадлежности устанавливает соответствие между элементами универсального множества $U \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ и числовыми значениями их степеней принадлежности некоторому новому множеству A : $A(u)$ на отрезке $[0,1]$. Значение функции принадлежности $A(u)$ для некоторого элемента $u \in U$ показывает, в какой мере, в какой степени этот элемент принадлежит множеству A . Если степени принадлежности $A(u)$ принимают только два значения 0 или 1, то множество A является четким, в противном случае это множество является нечетким (степени принадлежности могут принимать любые значения на отрезке $[0,1]$, например, 0,2 или 0,8).

Для вычисления значений функции принадлежности при построении множества используем прямые (экспертные) методы, когда решение принимает эксперт, и косвенные методы, ког-

да степени принадлежности определяются на основе измерений и вычислений параметров свойств элементов. Такой подход при использовании различных методов приводит к установлению вполне конкретных (неслучайных) числовых значений степеней принадлежности в теории нечетких чисел.

Исследования и анализ инновационной среды, планирования не всегда имеют точное формализованное описание, поэтому для работы с такой информацией и знаниями требуются модели и методы, способные формализовать качественные характеристики состояний элементов объекта и внешней среды, а также качественные оценки силы и характера взаимной связи элементов системы. Следовательно, необходимы методики решения задачи стратегического управления инновациями с использованием нечетких оценок. На первом этапе проведен анализ реального опыта решения задачи стратегического управления инновационными процессами на авиационных предприятиях, что позволило выделить объекты инновационных преобразований на предприятиях и определить содержание инновационных процессов, а также сформировать стратегические направления внедрения и развития инноваций.

В итоге экспертами были определены следующие цели инновационного развития предприятий, достижение которых обеспечивало бы выполнение требований по стратегии инновационных преобразований: достижение устойчивых показателей рентабельности производства ar_1 ; снижение затрат производства ar_2 ; повышение качества и лётных характеристик изделий ar_3 ; повышение надёжности при одновременном снижении эксплуатационных затрат (ar_4). Таким образом, были получены четыре параметра и четыре соответствующих качественных критерия, характеризующих требуемое для предприятия состояние производственной среды, определяемое вектором цели Ar .

Соответственно каждой из указанных составляющих общей стратегии была определена соответствующая числовая (нечеткая) оценка в интервале от 0 до 1 (при условии, что чем выше нечеткая числовая оценка, тем выше достоверность описания и оценки составляющей стратегии по значениям нечетких оценок: $Ar = (ar_1, ar_2, ar_3, ar_4) = (0.8 \ 0.9 \ 0.6 \ 0.8)$).

После этого определялись значения на выходе объекта, определяющие влияние на указанные параметры производственной среды и качественные оценки связи между ними в виде матрицы эффективности взаимодействий и степени влияния фактора на результат. Нечеткие оценки, соответствующие 0.5, описывают нейтральные отношения, и их приближение к границам оценочных интервалов (0 и 1) отражает

усиления связи (отрицательное и положительное) соответственно. Важно, чтобы качественные признаки для нечетких оценок, определяющих состояния и отношения, совпадали: например, оценка 0.5 характеризует нейтральный уровень связи и средний уровень развития элемента объекта или среды, выше 0.5 – наличие положительной связи (усиливающейся с приближением к 1) и состояние среды выше среднего (приближающееся к оптимальному уровню при значении, равном 1).

К точкам выхода объекта были отнесены: эффективность стратегии управления инновациями (p_1), квалификация и состав производственного персонала (p_2), качество конструкторско-технологической документации (p_3), эффективность работы оборудования (p_4), уровень автоматизации производственных процессов (p_5). По заданным исходным условиям, определенных экспертами, была построена нечеткая матрица влияний точек выхода объекта (P) на точки выхода микросреды (A) при сложившемся состоянии внешней среды:

$$R^{D_0}P \rightarrow A = \begin{pmatrix} 0,5 & 1 & 0,6 & 0,7 \\ 0,5 & 0,8 & 0,7 & 0,9 \\ 0,8 & 0,7 & 1 & 0,5 \\ 1 & 0,5 & 0,6 & 4 \\ 1 & 0,6 & 0,5 & 1 \end{pmatrix}.$$

Например, количество и виды современного оборудования с числовым программным управлением не только определяют производительность труда [$a_{23} = 0,8$], но обеспечивает повышение качества продукции [$a_{41} = 1,0$]. Из множества элементов объекта были выделены такие точки входа как параметры объекта, при управляющем воздействии на которые изменяется состояние элементов и подсистем производства, определяющих заданные показатели выпускаемой продукции. К ним эксперты отнесли: используемую технологическую документацию и оснащение, квалификацию и компетентность персонала (b_1), технологическую подготовку производства (b_2), производственные условия (b_3), организацию производства (b_4). До момента реализации стратегии состояние данных параметров характеризовались вектором:

$$B_0 = (b_1, b_2, b_3, b_4) = (0,7 \ 0,6 \ 0,5 \ 0,4),$$

а влияние точек входа (B) на точки выхода объекта (P), по мнению экспертов, определялось следующей матрицей:

$$R^{A_0}B \rightarrow A = \begin{pmatrix} 1 & 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,5 \\ 0,7 & 0,5 & 1 & 0,4 & 0,5 \\ 0,5 & 0,8 & 0,6 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & 0,9 & 0,7 & 0,6 \end{pmatrix}.$$

Необходимо отметить, что в стратегической перспективе дорогостоящие инвестиции (в результате уменьшения производственной себестоимости) не только окупают затраты, но и позволяют снизить цену ($r_{21}=0,8$). Однако завышенные значения инвестиций в основные производственные фонды при низком уровне автоматизации производства могут привести к увеличению затрат и снижению рентабельности производства ($r_{42}= 0,28$). Указанные исходные отношения позволили определить связи между управляемыми параметрами объекта инноваций и состоянием внешней среды:

$$R^{A_0}_{B \rightarrow p} \times R^{D_0}_{p \rightarrow A} = \begin{pmatrix} 1 & 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,5 \\ 0,7 & 0,5 & 1 & 0,4 & 0,5 \\ 0,5 & 0,8 & 0,6 & 1 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & 0,9 & 0,7 & 0,6 \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} 0,5 & 1 & 0,6 & 0,7 \\ 0,5 & 0,8 & 0,7 & 0,9 \\ 0,8 & 0,7 & 1 & 0,5 \\ 1 & 0,5 & 0,6 & 4 \\ 0,5 & 0,6 & 0,5 & 1 \end{pmatrix} =$$

$$= R_{B \rightarrow A} = \begin{pmatrix} 0,7 & 1 & 0,7 & 0,8 \\ 0,8 & 0,7 & 1 & 0,7 \\ 1 & 0,8 & 0,7 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,9 & 0,6 \end{pmatrix}.$$

Отношения, связывающие нечеткие матрицы и векторы, в отличие от обычных матричных расчетов, не могут использовать операции сложения или произведения между соответствующими элементами, так как в этом случае не будут выполняться логические условия или процедуры получения объективных нечетких оценок того, в какой степени данный элемент принадлежит множеству A.

В связи с этим, для сохранения технико-экономического смысла проводимых вычислений, следует воспользоваться операцией максимальной композиции. В этом случае для определения некоторого элемента r_{ij} результирующей матрицы сначала должны быть определены попарные минимумы среди соответствующих элементов i -ой строки первой и j -го столбца второй матрицы. Технико-экономический смысл подобной операции можно определить, если уровень воздействия фактора элемента объекта на элемент микросреды низок, и тогда независимо от отношений этого параметра с другими параметрами объекта обеспечить более качественное воздействие на среду не удастся, и наоборот. Далее из найденных минимумов выбирается наибольший, так как разумно пред-

положить, что уровень взаимодействия между точкой входа объекта и точкой выхода внешней среды определяется наиболее сильной из существующих опосредованных связей.

Матрица $R_{B \rightarrow P}$ позволяет выявить неявные связи между управляемыми параметрами инновационного производства как объекта и состоянием внешней среды. В этом случае средний уровень оценок будет выше, чем в исходных отношениях, так как многие элементы объекта оказывают опосредованное влияние на элементы микросреды, прямые связи между которыми четким образом не проявляются.

Можно провести исследование результирующей матрицы по отдельным направлениям в качестве исследования стратегических воздействий. Например, технология и оборудование производства определяют ценовое преимущество ($r_{31} = 1$), что закономерно, так как в этом и состоит задача внедрения инноваций. Кроме того, она является наиболее важным фактором при проведении сертификации производства ($r_{34} = 1$), а также оказывает существенное воздействие на себестоимость высокотехнологичной продукции, когда технология производства является очень важной ($r_{32} = 0,8$). В данном примере указаны элементы отношений, дающих итоговую оценку r_{32} .

Максиминная композиция между вектором исходного состояния управляемых параметров (B_0) и матрицей $R_{B \rightarrow A}$ дает оценку текущего потенциала инновационного производства (A_0):

$$\begin{aligned} \dot{A}_0 &= (0,7 \ 0,6 \ 0,9 \ 0,4) \times \\ &\times \begin{pmatrix} 0,7 & 1 & 0,7 & 0,8 \\ 0,8 & 0,7 & 1 & 0,7 \\ 1 & 0,8 & 0,7 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,9 & 0,6 \end{pmatrix} = \\ &= (0,7 \ 0,7 \ 0,7 \ 0,7) \end{aligned}$$

Поэлементное сравнение полученного вектора экономических показателей производимой продукции $Ar = (0,7 \ 0,8 \ 0,6 \ 0,9)$ показало, что при текущем уровне развития невозможно достижение необходимых плановых показателей стратегии инноваций. Очевидно, что критическим с точки зрения указанных параметров производства является уровень конструкторско-технологического исполнения в производ-

стве изделий, так как только воздействуя на него, можно достичь оценки 0,9 по параметру цена-качество ($r_{34} = 1, r_{i4} \leq 0,9$ для $\forall j < i > 3$). Такое качественное изменение уровня производства оказывает влияние на оценку второго параметра среды – известное качество и надежность, который может достигать значения 1,0. При этом следует оценивать минимально возможное воздействие на объект, при котором требуемая стратегия может быть реализована. Состояние внешней среды (A) при данном уровне $B = (0,7 \ 0,6 \ 0,9 \ 0,4)$ будет следующим:

$$A = \Phi(B, RA) = (0,9 \ 0,8 \ 0,7 \ 0,9) \dots \geq Ar.$$

Как видно, результатом инновационного развития производства является повышение основных показателей производства практически на всех оцениваемых направлениях.

Для оценки содержания и качества стратегического управления инновационными преобразованиями и учитывая качественный характер используемых нечетких оценок, был применен следующий показатель:

$$D(B - B_0) = \max_j (b_j - b_i^0),$$

т.е. общий объем инвестиций оценивался при реализации стратегии. В нашем примере $D = 0,4$, т.е. ниже среднего.

Для принятия конкретных управленческих решений должны применяться шкалы, сопоставляющие качественный признак уровня управленческих воздействий и количестве (в натуральных или денежных измерителях), необходимых для этого ресурсов. Построение оценочных шкал – проблема, являющаяся неотъемлемой частью нечеткого поиска решений. Классические методы нечеткого построения шкал и другие вопросы, связанные с использованием лингвистических (качественно определенных) переменных при принятии решений, а также конкретные прикладные примеры по данному вопросу, подробно изложены в [1, 3].

При оценке проекта инновационного развития предприятия экспертами была создана соответствующая шкала оценок затрат по вариантам. Полученной нечеткой оценке (0,4), характеризующей уровень управляющих воздействий ниже среднего, соответствовала указанная ниже количественная оценка, определяемая нечетким числом (рисунок 1).

Определение необходимого объема финансирования по вариантам инновационного развития производства по данной шкале позволяет разрабатывать корректирующие воздействия и привлечение дополнительных ресурсов в случае, если планируемый уровень инноваций окажется более затратным по расчетным оценкам.

Таким образом, решение задачи стратегического управления с использованием нечетких оценок позволяет связать внешние и внутренние цели и условия простыми отношениями,

Признаки качества	Нечеткая оценка
Максимальный	1
Очень высокий	0,8
Выше среднего	0,7
Средний	0,5
Ниже среднего	
Удовлетворительный	0,3
Минимальный	0,2



Рис. 3. Соответствие нечеткой оценки экспертно определенной сумме затрат

учесть параметры с различной степенью определенности, получить количественные критерии развития на основе анализа качественных характеристик – экспертных оценок. Поиск решения не усложняется при увеличении рассматриваемого элементного набора и множества связей внутри объекта, объекта и внешней среды, растет лишь размерность используемых отношений (рисунок 1).

Методика позволяет объединить в единую процедуру работу с функциональными, управляющими стратегиями. Предложенный способ формализованного описания ситуации дает возможность учитывать эффект синергии. Определенные экспертами отношения могут использоваться в качестве имитационной модели при проведении сценарного стратегического планирования.

Учитывая теоретическую основу стратегического управления, следует отметить, что в процессе поиска стратегических инновационных решений производится оперирование главным образом с количественными данными, и, следовательно, результат такого поиска может быть подвергнут формальному анализу и количественно обоснован. На этапе выработки конкретных числовых ориентиров развития сформулировано представление о направлениях возможной коррекции инновационной стратегии. Предложенная методика формализации позволяет повысить достоверность и объективность принимаемых управленческих решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная формальная постановка общей задачи стратегического управления и математическая модель на основе нечетких оце-

нок является логической схемой, позволяющей упорядочить поиск решения, сделать его более оперативным и корректным в условиях высокой сложности объекта и внешних связей. Описанные в модели формы учета связей между параметрами, оценок уровня управляющих усилий и реакции среды могут быть модифицированы при решении конкретных задач текущего управления инновационной политикой на предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван, Хао. Аксиоматические системы теории множеств / Хао Ван, Р. Мак-Нотон. – М.: Мир, 2021. – 556 с.
2. Гаращенко, Н.Н. Инструментальная адаптация модели пяти сил отраслевой конкуренции М. Портера на основе теории нечетких множеств / Н.Н. Гаращенко. – М.: Синергия, 2013. – 305 с.
3. Демидова, Л.А. Алгоритмы и системы нечеткого вывода при решении задач диагно-стики городских инженерных коммуникаций в среде Matlab / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – М.: Радио и связь, Горячая Линия - Телеком, 2017. – 368 с.
4. Назаров, Д.М. Интеллектуальные системы: основы теории нечетких множеств. – 2-е изд., испр. и доп.: Учебное пособие для академического бакалавриата / Д.М. Назаров. – М.: Юрайт, 2017. – 799. С. 14.
5. Лавров, И. Задачи по теории множеств, математической логике и теории алгоритмов / Игорь Лавров. – М.: ИЛ, 2021. – 853 с.
6. Морозов, А.Д. Визуализация и анализ инвариантных множеств динамических систем / А.Д. Морозов, Т.Н. Драгунов. – М.: Институт компьютерных исследований, 2021. – 304 с.

**DEVELOPMENT AND STUDY OF METHODS
FOR BUILDING INNOVATIVE PRODUCTION IN AIRCRAFT CONSTRUCTION**

© 2023 S.F. Tluustenko

Samara National Research University named after S.P. Korolyov, Samara, Russia

The results of the development of methods for constructing a strategy of technological innovation, ways to substantiate the tasks of setting the goals of the scientific and technical development of enterprises in the conditions of ambiguity of the characteristics of the influence of external and internal factors are shown. Methods using the theory of unclear sets, fuzzy presentations of information for tasks operating with relevant information are shown, a significant part of which contains uncertainty. Analysis and methods for processing such information under the conditions for solving the problems of planning a strategy for the development of production are of considerable interest for making strategic decisions. The algorithm for the synthesis of the innovation system for the relationship of strategy and deterministic control influences containing clearly defined numerical values of the levels of influences and final results is proposed. The method of describing the initial data of strategic management tasks in an innovative environment containing uncertainty using fuzzy numerical values of the system parameters.

Key words: production efficiency, technological innovations, digital technologies, uncertainty, fuzzy assessments, innovative projects, systemic performances, vector variable.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-48-54

REFERENCES

1. *Van, Hao*. Aksiomaticheskie sistemy teorii mnozhestv / Hao Van, R. Mak-Noton. – M.: Mir, 2021. – 556 c.
2. *Garashchenko, N. N.* Instrumental'naya adaptaciya modeli pyati sil otraslevoj konkurencii M. Portera na osnove teorii nechetkih mnozhestv / N.N. Garashchenko. – M.: Sinergiya, 2013. – 305 c.
3. *Demidova, L. A.* Algoritmy i sistemy nechetkogo vyvoda pri reshenii zadach diagnostiki gorodskih inzhenernyh kommunikacij v srede Matlab / L.A. Demidova, V.V. Kirakovskij, A.N. Pyl'kin. – M.: Radio i svyaz', Goryachaya Liniya - Telekom, 2017. – 368 c.
4. *Nazarov, D.M.* Intellektual'nye sistemy: osnovy teorii nechetkih mnozhestv. – 2-e izd., ispr. i dop.: Uchebnoe posobie dlya akademicheskogo bakalavriata / D.M. Nazarov. – M.: Yurajt, 2017. – 799. C. 14.
5. *Lavrov, I.* Zadachi po teorii mnozhestv, matematicheskoy logike i teorii algoritmov / Igor' Lavrov. – M.: IL, 2021. – 853 c.
6. *Morozov, A. D.* Vizualizaciya i analiz invariantnyh mnozhestv dinamicheskikh sistem / A.D. Morozov, T.N. Dragunov. – M.: Institut komp'yuternyh issledovanij, 2021. – 304 c.

УДК 65.01

МЕЖСТРУКТУРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

© 2023 Е.С. Окуневич, В.Ю. Смелов, С.А. Шереметьева, В.Л. Шпер, Е.И. Хунузиди

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 15.11.2022

В статье представлены результаты анализа проблемы межструктурного взаимодействия в современных организациях, подробно рассмотрены теоретические основы и причины возникновения барьеров между подразделениями организации. Особое внимание уделено точке зрения доктора Э. Деминга на проблемы межфункционального взаимодействия, а также даны системно-статистические предложения по их устранению.

Ключевые слова: межструктурное взаимодействие, межфункциональное взаимодействие, системно-статистическое мышление, контрольные карты Шухарта, система глубинных знаний

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-55-66

«Анализ нашей организационной структуры в 1980-х гг. показал, что составившие её исходили из того, что сотрудники и сотрудницы: воры, лентяи, ненадежны, неумны».
Ж.-Ф. Зобрис

ВВЕДЕНИЕ

Межструктурное взаимодействие¹ – одна из основ эффективного функционирования организации как системы. Экономический эффект правильного управления различными подразделениями компаний без возникновения барьеров между отделами изучается исследователями, начиная с 1960-х гг. (например, в работах У.Э. Деминга [1], Э. Джея [2], П.Р. Лоуренса и Д.У. Лорша [3], М. Трайбуса [4]).

¹ Обычно применяется термин «межфункциональное взаимодействие», в том числе и в [1], однако авторы статьи считают, что в данном случае более корректно использовать термин «межструктурное взаимодействие». Вопрос принципиального отличия двух этих терминов – тема для отдельной статьи.

Окуневич Екатерина Сергеевна, студент 4 курса.

E-mail: m1903601@edu.misis.ru

Смелов Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Сертификация и аналитический контроль». E-mail: b.c.21@mail.ru

Шереметьева Светлана Алексеевна, аспирант кафедры «Сертификация и аналитический контроль».

E-mail: prosto_sveta92@mail.ru

Шпер Владимир Львович, кандидат технических наук, эксперт лаборатории гибридных аддитивных технологий. E-mail: vlad.shper@gmail.com

Хунузиди Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сертификация и аналитический контроль». E-mail: el_hun@mail.ru

Далеко не все руководители приветствуют тесное взаимодействие сотрудников своего подразделения с сотрудниками других структурных единиц этой же самой компании. У каждого коллектива есть свои маленькие и большие тайны, которые должны, по мнению таких руководителей, оставаться в них. В результате со временем у различных структурных подразделений организации появляются свои собственные цели, задачи, ценности. В итоге в той или иной степени возникает конкуренция с коллегами из смежных подразделений, поскольку их интересы не полностью совпадают или ущемляются.

Цель данной статьи – установление основных принципиальных причин сложности взаимодействия между различными подразделениями, и предложение вариантов решения данной проблемы. Статья основана на анализе классических работ зарубежных и российских авторов о проблемах взаимодействия между подразделениями в компаниях. Первый раздел статьи посвящен изучению теоретических основ межструктурного взаимодействия. Во втором и третьем разделах изложены мнения различных авторов по вопросу возникнове-

ния барьеров между структурными подразделениями компаний, а также описан взгляд доктора Деминга на проблему межфункционального взаимодействия. В следующих трех разделах сформулированы основные причины возникновения межструктурных барьеров в современных организациях и представлены возможные пути решения, а также приведена связь девятого пункта Деминга с системой глубинных знаний.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕЖСТРУКТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ОРГАНИЗАЦИИ

Одним из основополагающих подходов к проблеме взаимодействия между различными структурами служит её анализ с точки зрения более широкой концепции. Различные определения таких концепций достаточно близки и частично совпадают (таблица 1). Например, в статье П.Р. Лоуренса и Д.У. Лорша, понятие «межструктурное взаимодействие» трактуется как эквивалент понятия «интеграция», т.е. «процесс достижения единства усилий между различными подсистемами организации при выполнении поставленных ею задач» [3].

Трактовки понятия «межструктурное взаимодействие», приведённые в таблице 1, в работах К.Дж. Герсика и М.Л. Дэвис-Сакса [5], Д.К. Пинто, М.Б. Пинто и Д.И. Прескота [6], Х.М. Сонг, Дж.Б. Шмидта и М.М. Монтойя-Вайесса [7] частично совпадают, последние трактуют данное понятие шире и включают в его определение больше составляющих. Т.е. с их точки зрения межструктурное взаимодействие рассматривается с ориентацией на все уровни компании и включает в себя уровень коммуникации, эффективность обмена информацией, степень согласованности действий и степень вовлеченности сотрудников в рамках реализации проектов.

А. Энгелен, Г. Вист и М. Бреттель [8] рассматривают межструктурное взаимодействие как самостоятельное понятие, аналогичное понятию кроссфункциональное взаимодействие, и трактуют его как степень формализации отно-

шений между различными подразделениями организации. У.Э. Деминг [1] утверждает, что межструктурное взаимодействие – объединение в одну команду представителей разных подразделений организации для реализации проекта. Внутри такой команды возникает постоянный диалог, который помогает членам команды преодолеть профессиональные различия, а также учит их системному взгляду на процесс [9].

Таким образом, в одних работах «межструктурное взаимодействие» представляется как уровень взаимодействия и коммуникации, в других – как взаимозависимость и обмен информацией и в дальнейшем как самостоятельное понятие.

Итак, как и следовало ожидать, единого подхода к определению межструктурного взаимодействия не существует, однако, в основе всех трактовок лежат понимание и сущность проблем взаимодействия между различными подразделениями. Авторы, в большей или меньшей степени, выделяют прежде всего важность коммуникации как средства обмена информацией, а также межличностного взаимодействия.

2. ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ БАРЬЕРОВ МЕЖДУ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ ОРГАНИЗАЦИИ (МНЕНИЕ АВТОРОВ)

Гигантские корпорации – не застывшие системы металлокерамических зданий на бетонных основаниях. Сегодня деловой мир можно сравнить с пчелиным ульем бизнеса, опыляющими цветы компаний, или же с большим муравейником. Имеются немало примеров оригинальных подходов по созданию уникальных систем менеджмента, например [10, 11, 12]. Однако, на данный момент структура абсолютного большинства компаний подчиняется жестким законам иерархии, хотя нельзя сказать, что нет исключений (см. напр.: Ф. Лалу [13], Е. Щепин [14], В. Разгуляев [15], Р. Семлер [16]). Книги [14] и [15] удачно дополняют [17]. Стоит отметить и оригинальный способ изложения соеи теории Э. Голдратом [18].

Иерархическая структура требует жестких внутренних законов и устойчивых обычаев.

Таблица 1 – Межструктурное взаимодействие: основные определения

Авторы	Понятия	Определения
П.Р. Лоуренс, Д.У. Лорш [3]	Эквивалент понятия «интеграция»	Процесс достижения единства усилий между различными подсистемами организации при выполнении поставленных ею задач.
К.Дж. Герсик, М.Л. Дэвис-Сакс [5]	Самостоятельное понятие	Степень достижения согласия по комплексным программам действий и последующей реализации решений
Д. К. Пинто, М.Б. Пинто, Д.И. Прескотт [6]	Самостоятельное понятие	Взаимозависимость и обмен информацией, возникающие между членами команды
Х.М. Сонг, Дж.Б. Шмидт, М.М. Монтойя-Вайесс [7]	Самостоятельное понятие	Уровень коммуникации, эффективность обмена информацией, степень согласованности действий, а также степень вовлеченности сотрудников в рамках реализации проектов
А.Энгелен, М. Бреттель, Г. Вист [8]	Эквивалент понятия «кроссфункциональное взаимодействие»	Степень формализации отношений между различными подразделениями организации
У.Э. Деминг [1]	«Межфункциональное взаимодействие»	Объединение усилий всех специалистов, которые нужны для данного проекта

Стоит отметить, что такая структура создает бумажный поток, который бесконечно питается ливнями различных докладов, отчетов и служебных записок. Эта же структура приводит к возникновению барьеров между подразделениями. Есть правда, менеджеры, которые борются с возникновением межструктурных барьеров. Некоторые руководители организаций пытаются изменить положение. Но барьеры между подразделениями возникают естественно, никто к ним нарочно не стремится.

Этой проблеме посвящено достаточно много книг и статей в области менеджмента. Одна из таких книг – «Корпорация гениев. Как управлять командой творческих людей» Э. Кэтмелла [19]. В ней автор доказывает, что каждая организация

состоит из подразделений, которые сконцентрированы на выполнении тех задач, которые перед ними поставило руководство. Сотрудники уже привыкли к такому распорядку и более или менее представляют себе, как пройдет их рабочий день – им нужно выполнить свою часть работы, достичь поставленных показателей, а далее передать работу следующему подразделению организации. Вроде бы каждый пытается делать полезные вещи, которые увеличат выработку компании в целом, однако все они вместе тянут организацию в разные стороны. И если, так случится, что какое-то из этих подразделений выиграет, то проиграет вся организация в целом.

Ф. Лалу в своей книге «Открывая организацию будущего» [11] придерживается дру-

гой точки зрения касательно возникновения барьеров между отделами. Автор выдвигает несколько достаточно спорных признаков организаций будущего. К ним относятся: самоуправляемость, доверие между сотрудниками и отказ от конкуренции между подразделениями организации. Возможно, это и есть будущее, но для большинства сегодняшних компаний достаточно отдаленное.

В книге «ВкусВилл. Как совершить революцию в ритейле, делая все не так: (37 правил)» [14] Е. Щепин утверждает, что недоверие вынуждает руководителей компании делить сотрудников на избранных и прислуживающих, доверять лишь кругу приближенных лиц, а остальных оставлять за границей этого круга. Управляющий информацией в компании «ВкусВилл» В. Разгуляев в книге «Бирюзовое управление на практике: Опыт российских компаний» [15] трактует возникновение этой проблемы более широко. Автор придерживается точки зрения, что неправильная организация системы управления в компании приводит к тому, что никто не хочет брать на себя ответственность за решение возникающих проблем. Как следствие, начинает расти непонимание между сотрудниками организации, что приводит к возникновению межструктурных барьеров.

Р. Семлер высказывает некоторые похожие мысли касательно возникновения барьеров между подразделениями, которые уже упоминал Ф. Лалу. В своей книге «Маверик: история успеха самой необычной компании в мире» [16] автор утверждает, что иерархия служит основной причиной, порождающей межструктурные барьеры. Когда организация отказывается от всем привычной иерархической структуры, обычный порядок работы нарушается. Однако, сотрудники начинают работать в группах и командах, и сразу реализуют целые проекты, а не перекадывают полномочия из одного отдела в другой.

Таким образом, исследование работ зарубежных и российских авторов отражает крайне важную тенденцию пересмотра методов управления, применяемых в современных организациях, а также может рассматриваться как

постановка вопроса о дальнейшем, более масштабном анализе.

3. ВЗГЛЯД ДОКТОРА Э. ДЕМИНГА НА ПРОБЛЕМУ МЕЖСТРУКТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

В книге «Управление и Макиавелли» Э. Джей [2] убеждает читателей, что высшее руководство любой системы – политической, промышленной или военной – подразделяется на два типа: вельможи и придворные. При слабой государственной власти вельможи, имеющие схожие интересы, объединялись и оказывали серьезное влияние на формирование государственной политики. В свою очередь, такое правление постепенно приводило государство к упадку, т.к. основные ресурсы начинали распределяться неэффективно, власть использовалась в своих интересах, присутствовало жесткое разделение на своих и чужих. В результате, такие объединения рано или поздно распались, и на смену им приходил сильный монарх, окружая себя верными подданными. При такой власти уже придворные занимали ведущие позиции, а вельможи старались держаться в тени, ожидая своего часа. Они также обладали властью, но только на тех территориях, которые находились у них в подчинении. Прошли многие века, на смену раздробленным средневековым государствам пришли гигантские промышленные корпорации, но сущность функционирования таких систем сохранилась. Придворные в корпорации ответственны за кадры, рекламу, бухгалтерский учет. Вельможи управляют процессами в организациях. Успех придворного в компании зависит от благорасположенности первого лица этой организации. В свою очередь, успех вельможи определяется соотношением: какова прибыль компании относительно издержек? Эти базовые законы управления так же работают и сегодня, как и в средние века. Вельможи всегда стремились взять власть в свои руки, в то время как придворные рвались к централизации. Конфликт между ними, а следовательно, и между подразделениями организации, которые подчиняются им (рисунок 1), заложен еще с тех времен, и до сих пор его не удается никак разрешить.



Рисунок 1 – Барьеры, возникающие между подразделениями организации [20]

Что же делать организациям в таких условиях, когда и вельможи, и придворные вроде работают на благо компании, но каждый из них тянет организацию в свою сторону?

Вот тут-то и выступил Деминг. Он утверждает, что «функционирование любого составляющего системы подпроцесса должно оцениваться в терминах его вклада в цели всей системы, а не по его индивидуальной производительности и ни по какому другому соревновательному критерию» [1].

Ломайте барьеры между подразделениями – предложенное Демингом решение проблемы межструктурного взаимодействия. Деминг предлагает крупным корпорациям создавать межфункциональные команды, которые будут справляться с поставленным руководством целями и задачами более успешно. Когда люди из разных отделов компании попадают в одну команду для реализации проекта, то именно это и помогает организациям разрушить барьеры между подразделениями компании. Сотрудник, попавший в такую команду, подчиняется только лидеру команды, а руководители подразделений лишь изредка дают свои рекомендации, и только в случае надобности. В то же время сотрудники, решая одну и ту же проблему в команде, обмениваются знаниями и опытом, тем самым расширяя свой кругозор и приобретая новые знания, которые в дальнейшем могут быть полезны организации [21].

Однако, сегодняшние компании часто придерживаются более традиционных моделей управления. Каждый руководитель для своего подразделения пытается «выбить» у высшего руководства организации более легкие проекты и задачи, а после выполнения части своей работы переложить её на другое подразделение. Процесс такого «спихивания» работы плох тем, что каждый надеется на другого. Например, сотрудники конструкторского подразделения полагают, что руководство лучше знает и представляет конечный результат. Но те постоянно заняты и полагают, что вопрос тщательно изучен в подразделениях – там у людей больше времени для детальной проработки конкретной задачи. В результате работа выполняется плохо, а каждое подразделение организации утверждает, что выполнило свою часть работы хорошо, и эта часть была самой сложной из всего целого проекта. Таким образом, межструктурная борьба продолжается, а барьеры между подразделениями становятся все выше и прочнее.

4. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ

Давайте представим себе некий концерн «Х», который имеет филиалы по всей планете. Он образовался в результате большого количества слияний и поглощений, а его уставной капитал исчисляется миллиардами. Десятки тысяч

людей работают в нем, получая поддержку и ежемесячные средства к существованию.

Однако, эта крупная промышленная организация имеет тайный недуг, который постепенно «уничтожает» её изнутри. Борьба между подразделениями этого самого концерна становится настолько заметной, что это начинает влиять на качество производимой продукции. Управляющие подразделений, вместо грамотного распределения ответственности и полномочий, выясняют отношения друг с другом. И уж, конечно, в такой обстановки моральный климат ухудшается, а концерн попросту простаивает, теряя драгоценное время.

Почему же возникают такие принципиальные проблемы взаимодействия между различными подразделениями? Ответ на данный вопрос достаточно сложен. Ну, во-первых, это устойчивая иерархичность концерна. Любая рядовая организация имеет основание и вершину (рисунок 2).

Схема, приведенная на рисунке 2 достаточно упрощена. На самом же деле пирамида имеет еще более продолговатую форму. На верхушке компании происходит распределение задач между подразделениями. В свою очередь, каждый управляющий этой организации пытается получить для своего подразделения как можно более легкие задачи с минимальной ответственностью и с максимальным воз-

награждением, и как можно большее время на их выполнение. Такое отношение к работе постепенно приводит к тому, что руководители подразделений вместо реализации поставленных целей и задач, стараются просто-напросто поддерживать нужные межличностные связи с первыми лицами компании.

После того, как все задачи наконец распределены между подразделениями, дело на этом не заканчивается. Начальники цехов убеждены, что эти «типы» в верхушке компании совсем свихнулись. Им намного проще отдавать приказы подчиненным, они же штаны просидели в своих кабинетах, переключая бумагу из одного подразделения в другое, и не имеют представления, что делается в организации на местах. Прислали план, который нужно выполнить за такой короткий срок. Пусть на этот раз этим занимается другое подразделение организации, которое в прошлый раз получил премию. Таким образом, люди перестают взаимодействовать друг с другом, помогать друг другу и приходят к решению возникшей проблемы вместе, что, в конечном счете, неизбежно снижает качество принимаемых решений. У каждого подразделения организации появляются свои собственные цели и ожидания, оно начинает действовать не во благо всей компании, а в соответствии с собственными аппетитами. В таких условиях каждый управляющий искренне верит, что компа-

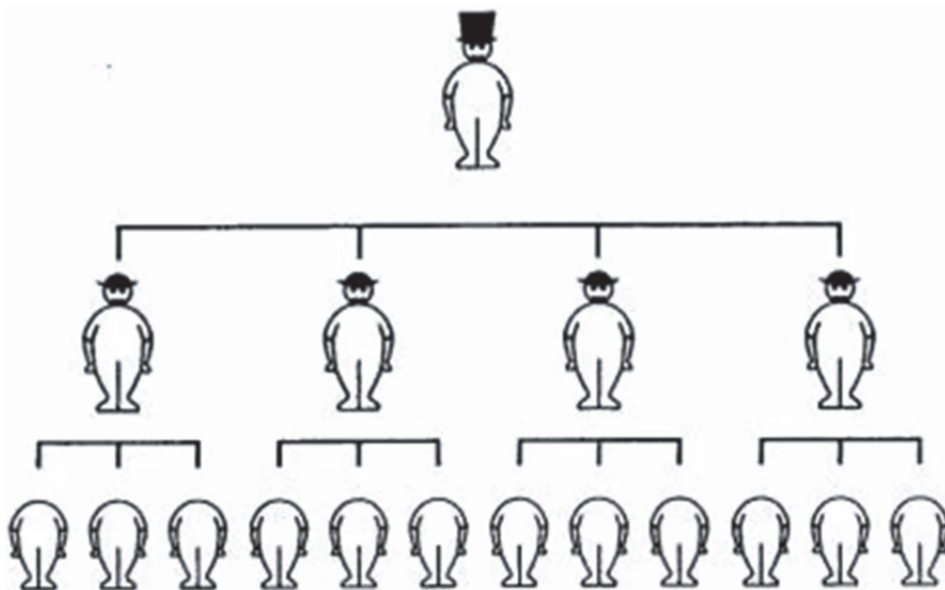


Рисунок 2 – Карикатурный вариант иерархической структуры (MANS Association) [21]

нии будет только лучше, если его цели возьмут вверх над целями других подразделений. Из-за этого центральное управление компании, даже очень сильное, очень часто не может сделать свое управление организацией эффективным.

Во-вторых, административно-управленческие процессы в крупных организациях недостаточно организованы и часто неэффективны. Для всех крупных компаний типичен низкий уровень регламентации межструктурного взаимодействия, т.е. очень слабо определены ответственность и контроль за внутренние переходы между подразделениями в ходе реализации процессов. В результате это приводит к «передаче фишки» из одного подразделения компании в другое, т.е. перекалывание ответственности, особенно тех решений, от которых зависит дальнейшая карьера руководителя данного конкретного подразделения.

И наконец, в-третьих, даже если в некоторых корпорациях и существуют регламенты межструктурного взаимодействия (что встречается очень редко), то чаще всего они представляют собой застывшие документы, которые практически не применяются. Такие документы успешно разработали, а затем благополучно отправились на полку.

Таким образом, все вышеприведенные проблемы взаимодействия между различными подразделениями постепенно обрекают наш концерн «Х» на гибель, но сотрудники данной организации этого пока никак не могут осмыслить.

5. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

Имеются работы, в которых предлагаются решения проблем межструктурного взаимодействия [22, 23, 24]. Их, а также исходя из всей вышеприведенной информации об основных принципиальных проблемах взаимодействия между различными подразделениями дополним предложениями о том, как следует перестроить деятельность организаций.

Регламентация межструктурного взаимодействия. В этой связи регламенты межструктурного взаимодействия должны стать начальным этапом для устранения данной проблемы. При этом регламентация межструктурного

взаимодействия должна заключаться в четко определенных процедурах с отчетливым разделением ответственности при реализации проектов. Но конечно же одной регламентации межструктурного взаимодействия будет недостаточно.

Автоматизация контроля качества. Цель автоматизации контроля качества внутри организации состоит в улучшении качества выхода каждого подпроцесса. Т.е. после каждого процесса следует разместить автоматизированную систему контроля качества. Это вовсе не означает, что организациям придется увеличивать штатную численность контролеров по качеству. Количество контролёров по качеству останется таким же (возможно даже уменьшится), а сам процесс контроля качества параметров определенных величин будет занимать меньше времени и станет гораздо эффективнее.

При всем при этом, каждое подразделение такой организации будет прекрасно знать, что контроль качества осуществляет автоматизированная система, и в случае попытки передачи незавершенной работы из одного подразделения в другое, система такую работу дальше не пропустит. Таким образом, обвинять другое подразделение организации в передаче незавершенной работы станет просто бессмысленно.

Создание среды, в которой люди будут доверять друг другу. В любой организации должно существовать подразделение, в круг обязанностей которого должно входить создание для творческих и талантливых сотрудников благоприятного климата работы, распределение их по проектам, а также контроль их взаимодействия друг с другом. Также при передаче проекта от одного подразделения организации другому, задача менеджеров подразделения эффективной организации работы сотрудников компании будет заключаться в следующем: четкий контроль проекта без «спихивания» работы на другое подразделение организации. Т.е. можно сказать, что такие менеджеры будут выступать связующим звеном между двумя подразделениями.

Работают ли предложенные решения покажет только практика. Однако, уже сегодня можно утверждать, что талантливый сотрудник

вряд ли захочет работать в компании, где руководители привыкли делить с кем-то ответственность, статистическое управление процессами (SPC) на основе анализа реальных данных не применяется, а подразделения организации эффективной работы сотрудников отсутствуют.

6. СВЯЗЬ ДЕВЯТОГО ПУНКТА ДЕМИНГА «ЛОМАЙТЕ БАРЬЕРЫ» С СИСТЕМОЙ ГЛУБИННЫХ ЗНАНИЙ

Давайте теперь предположим, если руководители учтут все выше предложенные решения и «правильно» начнут распределять полномочия и ответственность в организациях (как и должно быть по рекомендациям У.Э. Деминга), то что-нибудь изменится? Перед тем как дать ответ на данный вопрос необходимо сначала понять: «А что значит «правильное» распределение полномочий и ответственности в крупных компаниях?» Деминг под этим подразумевал, что «люди из разных областей, таких, например, как Исследования, Конструирование, Продажи, Администрация и Производство должны работать в одной команде, решая проблемы, с которыми может столкнуться продукция или услуги» [21].

Итак, возвращаясь к нашему вопросу – «если руководители «правильно» начнут распределять полномочия и ответственность в организациях, то что-нибудь изменится?», ответ на него – безусловно «да». Организации начнут работать как системы (первая часть системы глубинных знаний – далее СГЗ) для достижения общей цели. Все элементы такой системы будут использовать стратегию «выиграл/выиграл» [25], т.е. находить такое решение проблемы, которое будет удовлетворять все заинтересованные стороны, признавать важность баланса между конкурирующими целями и задачами. Конечно же, люди эгоистичны и все хотят быть услышанными, но для этого вовсе необязательно устраивать гонки идей и предложений, соревноваться друг с другом за право быть лучшими внутри одной и той же компании. Нужное равновесие создастся в результате сотрудничества подразделений организации друг с другом – когда талантливым сотрудникам задают единые и ясные цели, и они

достигают этих целей вместе, не добиваясь выигрыша за счет проигрыша других сотрудников организации. Таким образом, когда люди наконец осознают важность правильного использования стратегии «выиграл/выиграл» и начнут работать, не разделяя коллег на «своих» и «чужих», то проблема межструктурного взаимодействия исчезнет сама собой.

Однако, важно помнить, что люди хотят придерживаться того, что работает на протяжении долгих лет. В создавшихся ранее организациях успех и процветание были достигнуты при устоявшихся подходах к управлению, поэтому сотрудники начинают еще сильнее противиться изменениям. Постепенно они осознают, что те методы руководства, которые работали раньше, оказываются неэффективными сегодня и приводят организацию к разорению. Почему же так происходит? Ответ прост – наш мир переменчив и для того, чтобы оставаться конкурентоспособными организации должны постоянно перестраиваться, проводить диагностику состояния системы, а также изменений, происходящих в ней с помощью контрольных карт Шухарта (вторая часть СГЗ). Сегодня контрольные карты Шухарта считаются одним из самых эффективных инструментов для определения вариативности практически любых процессов, который наряду с этим, остается достаточно простым для использования. Использование контрольных карт Шухарта объединяет усилия всех сотрудников организации над решением системных проблем [26], позволяет добиться целостного взгляда на всю систему и принимать соответствующие решения относительно всей системы, а не каждого отдельного подразделения организации.

В настоящее время уже разработан алгоритм управления производственным процессом (рисунок 3), который предполагает тесное взаимодействие всех заинтересованных сторон, а также обеспечивает принятие лучшего решения из всех возможных. Обновленный алгоритм к построению контрольных карт Шухарта, учитывающий влияние асимметрии данных на величину контрольных пределов карты изложен в работе [27].

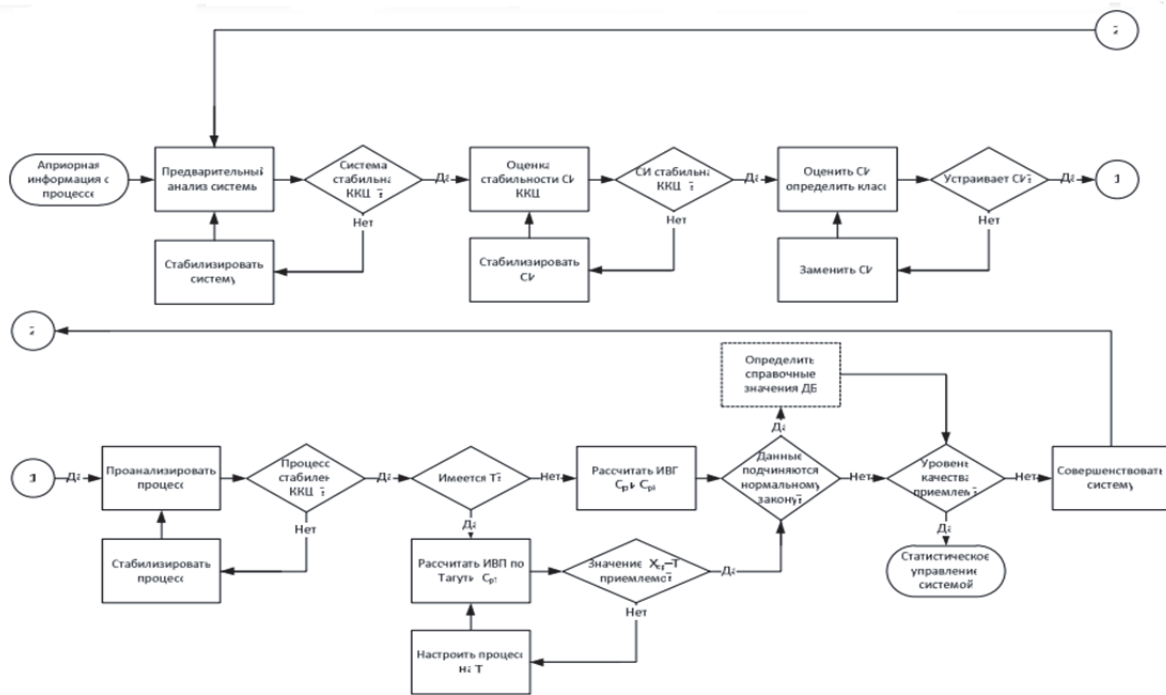


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма системно-статистического подхода к совершенствованию производственной системы [26]

Важно отметить, что при таком объединении усилий всех подразделений компании происходит рост знаний в организации (третья часть СГЗ). Сотрудники расширяют свое видение и мышление, обмениваются знаниями и опытом в процессе решения возникшей проблемы, не только среди «своих» коллег, но также среди других сотрудников организации. В свою очередь, это влияет на изменение климата в коллективах, создается позитивная энергия сотрудничества, возникают дружеские, а не враждебные отношения между подразделениями (четвертая часть СГЗ).

Таким образом, такая трансформация всей системы поможет создать базу для изменений в корпорациях, разрешит проблему конкуренции между людьми, между подразделениями и, как следствие, приведет к достижению синергетического эффекта.

На сегодняшний день практически все организации стоят перед неизбежностью преобразований. От постоянной конкуренции между подразделениями одной и той же компании, в которой действует правило «я выиграл, а ты проиграл», подразделениям организации нужно перейти к поиску взаимной выгоды в процессе межличностного взаимодействия и руковод-

ствоваться стратегией «выиграл/выиграл». Т.е. сотрудники должны эффективно сотрудничать, а не соперничать друг с другом, изменяться осознанно, руководствуясь системой глубинных знаний. Однако, сегодня это дело выбора каждого, а не принуждение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе анализа статей и книг было выяснено, что единый подход к определению межструктурного взаимодействия отсутствует. Также выявлены проблемы взаимодействия подразделений в современных организациях. К таким основным проблемам относятся:

- каждое подразделение компании действует в своих собственных интересах, и его совершенно не волнует, как то или иное решение повлияет на другие подразделения этой же самой компании;
- взаимное недоверие представляет собой одну из главных составляющих возникновения межструктурных барьеров;
- устойчивая иерархическая структура организаций не позволяет им эффективно выполнять поставленные задачи, быть более гибкими к тенденциям современного мира и поддержи-

вать качество продукции на необходимом высоком уровне.

Предложены возможные решения проблемы возникновения барьеров между подразделениями, которые включают в себя: регламентацию межструктурного взаимодействия с четким разделением ответственности, автоматизацию контроля качества в организациях, а также создание среды, в которой люди будут эффективно взаимодействовать. Для эффективного осуществления всех этих предложений очень важно внедрить в организации методы SPC, и использовать при анализе всех данных компании контрольные карты Шухарта.

Конечно же, при реализации предлагаемых решений может возникнуть проблема перераспределения власти. Кроме того, руководители крупных компаний не хотят ничего менять, ссылаясь на то, что такие модели руководства работали в прошлом, а значит будут работать и сегодня. Однако, повторение никуда нас не ведет.

До тех пор, пока существуют барьеры между подразделениями в организациях, вероятность долгосрочной конкурентоспособности современных компаний остается очень маленькой. Сегодняшним организациям нужно изменяться постепенно, а самое главное сознательно, руководствуясь системой глубинных знаний, которая служит картой на дороге будущих преобразований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деминг, Э. Менеджмент нового времени: Простые механизмы, ведущие к росту, инновациям и доминированию на рынке / Э. Деминг. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 182 с.
2. Jay, A. Management and Machiavelli: Discovering a New Science of Management in the Timeless Principles of Statecraft. N.Y.: Pfeiffer, 1994. 273 p.
3. Lawrence, P.R., Lorsch J.W. Differentiation and Integration in Complex Organizations // Sage Publications. – 1967. – pp. 1-47.
4. Tribus, M. The germ theory of management// SPC Press – 1992. – pp. 1-22.
5. Gersick, C.J.C. and M.L. Davis-Sacks, “Summary: Task Forces” in J.R. Hackman (Ed.), Groups That Work (and Those That Don’t)// Jossey-Bass. – 1990. – pp. 146-154.
6. Pinto, M.B., Pinto J.K., Prescott J.E. Antecedents and Consequences of Project Team Cross-Functional Cooperation // Management Science. – 1993. – pp. 1281-1297.
7. X.M. Song, M.M. Montoya-Weiss, J.B. Schmidt. Antecedents and Consequences of Cross-Functional Cooperation: A Comparison of R&D, Manufacturing and Marketing Perspectives// J. Prod.Innov.Manag. – 1997. – №1. – pp. 35-47.
8. A. Engelen, M.Brettel, G.Wiest. Cross-functional Integration and New Product Performance – The Impact of National and Corporate Culture// J.Int. Manag. – 2012. – №1 – pp. 52-65.
9. Адлер, Ю.П. Учение доктора Деминга и его судьба / Ю.П. Адлер, В.Л. Шпер. – М.: Издательский дом НИТУ МИСиС, 2021. – 350 с.
10. Фидельман, Г.Н. Альтернативный менеджмент. Опыт построения фанки-фирмы в России. 18 / Г.Н. Фидельман, С.В. Дедиков, Ю.П. Адлер – М.: Альпина Бизнес Букс, 2010. – 186 с.
11. Lashinsky, A. Inside Apple. How America’s most admired and secretive company really works. N.Y.: Business Plus: 1st edition, 2012. – 240 p.
12. Saunders R. Business the Amazon.com way: secrets of the world’s most astonishing web business. N.Y.: Capstone; 1st edition, 1999. – 213 p.
13. Лалу, Ф. Открывая организации будущего / Ф. Лалу. – М.: Манн, 2016. – 432 с.
14. Щепин, Е. ВкусВилл. Как совершить революцию в ритейле, делая все не так: (37 правил) / Е. Щепин. – М.: Альпина Паблишер, 2021. – 210 с.
15. Разгуляев, В. Бирюзовое управление на практике: Опыт российских компаний / В. Разгуляев. – М.: Альпина Паблишер, 2020. – 210 с.
16. Семлер, Р. Маверик. История успеха самой необычной компании в мире / Р. Семлер. – М.: Добрая книга, 2007. – 400 с.
17. Безручко, П. Практики регулярного менеджмента: управление исполнением, управление командой: практ. Рекомендации / П. Безручко. – М.: Альпина Паблишер, 2020. – 368 с.
18. Голдратт, Э.М. Цель. Процесс непрерывного совершенствования / Э.М. Голдратт. – М.: Альпина Диджитал, 2004. – 480 с.
19. Кэтмелл, Э. Корпорация гениев: Как управлять

- командой творческих людей / Э. Кэтмелл. – М.: Альпина Паблишер, 2014. – 342 с.
20. *Brown J.* Silo Mentality: What Are Organizational Silos and Their Impact. URL: <https://helpjuice.com/blog/organizational-silos> (дата обращения 15.02.2023).
 21. *Нив, Г.* Организация как система. Принципы построения устойчивого бизнеса Эдварса Деминга / Г. Нив. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 370 с.
 22. *Sinickas A.* Breaking down departmental barriers// Strategic Communication Management – 2008. – Volume 12. – p. 1.
 23. *Longenecker C.O., Neubert M.* Barriers and gateways to management cooperation and team-work // Business Horizons – 2000. – pp. 1-8.
 24. *Vantrappen H., Wirtz F.* Making Silos Work for Your Organization // Harvard Business Re-view – 2021.
 25. *Кови, С.* 7 навыков высокоэффективных людей / С. Кови. – М.: Альпина Паблишер, 2015. – 457 с.
 26. *Смелов, В.* Контрольные карты Шухарта как инструмент повышения качества управленческих решений в условиях реального производства / В. Смелов, Е. Хунузиди, В. Шпер // 13th DQM International Conference Life Cycle Engineering and Management DQM-POLYTECH-2022 – 2022. – С. 94-101.
 27. *Shper, V.L.* The Impact of non-normality on the control limits of Shewhart's charts / V.L. Shper, S.A. Sheremetyeva // Тяжелое машиностроение. – 2022. № 1-2. – С. 15 – 28.

CROSS-STRUCTURAL INTERACTION IN MODERN ORGANIZATIONS

© 2023 E.S. Okunevich, V.Yu. Smelov, S.A. Sheremetyeva, V.L. Shper, E.I. Khunuzidi

National Research Technological University “MISiS”, Moscow, Russia

The article presents the results of a cross-structural interaction study in modern organizations. The theoretical foundations and reasons for the between-department-barrier emergence are discussed in details. Particular attention is paid to the viewpoint of Dr. E. Deming on the problem of cross-structural interaction, as well as the system-statistical proposals how to eliminate this problem are given.

Key words: cross-structural interaction, cross-functional interaction, system-statistical thinking, Shewhart control charts, the system of profound knowledge

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-55-66

REFERENCES

1. *Deming, E.* Menedzhment novogo vremeni: Prostye mekhanizmy, vedushchie k rostu, innovaciyam i dominirovaniyu na rynke / E. Deming. – М.: Al'pina Pablisher, 2019. – 182 s.
2. *Jay, A.* Management and Machiavelli: Discovering a New Science of Management in the Timeless Principles of Statecraft. N.Y.: Pfeiffer, 1994. 273 p.
3. *Lawrence, P.R., Lorsch J.W.* Differentiation and Integration in Complex Organizations // Sage Publications. – 1967. – pp. 1-47.
4. *Tribus, M.* The germ theory of management// SPC Press – 1992. – Pp. 1-22.
5. *Gersick, C.J.C. and M.L. Davis-Sacks,* “Summary: Task Forces” in J.R. Hackman (Ed.), Groups That Work (and Those That Don't)// Jossey-Bass. – 1990. – Pp. 146-154.
6. *Pinto, M.B., Pinto J.K., Prescott J.E.* Antecedents and Consequences of Project Team Cross-Functional Cooperation // Management Science. – 1993. – Pp. 1281-1297.
7. *X.M. Song, M.M. Montoya-Weiss, J.B. Schmidt.* Antecedents and Consequences of Cross-Functional Cooperation: A Comparison of R&D, Manufacturing and Marketing Perspectives// J. Prod.Innov.Manag. – 1997. – №1. – Pp. 35-47.
8. *A. Engelen, M.Brettel, G.Wiest.* Cross-functional Integration and New Product Performance – The Impact of National and Corporate Culture// J.Int. Manag. – 2012. – №1 – pp. 52-65.
9. *Adler, Yu.P.* Uchenie doktora Deminga i ego sud'ba / YU.P. Adler, V.L. SHper. – М.: Izdatel'skij dom NITU MISiS, 2021. – 350 s.
10. *Fidel'man, G.N.* Al'ternativnyj menedzhment. Opyt postroeniya fanki-firmy v Ros-sii. 18 / G.N. Fidel'man,

- S.V. Dedikov, Yu.P. Adler – M.: Al'pina Biznes Buks, 2010. – 186 s.
11. *Lashinsky A.* Inside Apple. How America's most admired and secretive company really works. N.Y.: Business Plus: 1st edition, 2012. – 240 p.
 12. *Saunders R.* Business the Amazon.com way: secrets of the world's most astonishing web business. N.Y.: Capstone; 1st edition, 1999. – 213 p.
 13. *Lalu, F.* Otkryvaya organizacii budushchego / F. Lalu. – M.: Mann, 2016. – 432 s.
 14. *Shchepin, E.* VkusVill. Kak sovershit' revolyuciyu v ritejle, delaya vse ne tak: (37 pravil) / E. SHCHepin. – M.: Al'pina Pablsher, 2021. – 210 s.
 15. *Razgulyaev, V.* Biryuzovoe upravlenie na praktike: Opyt rossijskih kompanij / V. Razgulyaev. – M: Al'pina Pablsher, 2020. – 210 s.
 16. *Semler, R.* Maverik. Istoriya uspekha samoj neobychnoj kompanii v mire / R. Semler. – M.: Dobraya kniga, 2007. – 400 s.
 17. *Bezruchko, P.* Praktiki regul'yarnogo menedzhmenta: upravlenie ispolnieniem, upravlenie komandoy: prakt. Rekomendacii / P. Bezruchko. – M.: Al'pina Pablsher, 2020. – 368 s.
 18. *Goldratt, E.M.* Cel'. Process nepreryvnogo sovershenstvovaniya / E.M. Goldratt. – M: Al'pina Didzhital, 2004. – 480 s.
 19. *Ketmell, E.* Korporaciya geniev: Kak upravlyat' komandoy tvorcheskih lyudej / E. Ketmell. – M.: Al'pina Pablsher, 2014. – 342 s.
 20. *Brown J.* Silo Mentality: What Are Organizational Silos and Their Impact. URL: <https://helpjuice.com/blog/organizational-silos> (data obrashcheniya 15.02.2023).
 21. *Niv, G.* Organizaciya kak sistema. Principy postroeniya ustojchivogo biznesa Edvarsa Deminga / G. Niv. – M.: Al'pina Pablsher, 2019. – 370 s.
 22. *Sinickas A.* Breaking down departmental barriers // Strategic Communication Management – 2008. – Volume 12. – p. 1.
 23. *Longenecker C.O., Neubert M.* Barriers and gateways to management cooperation and team-work // Business Horizons – 2000. – pp. 1-8.
 24. *Vantrappen H., Wirtz F.* Making Silos Work for Your Organization // Harvard Business Re-view – 2021.
 25. *Kovi, S.* 7 navykov vysokoeffektivnyh lyudej / S. Kovi. – M.: Al'pina Pablsher, 2015. – 457 s.
 26. *Smelov V., Hunuzidi E., Shper V.* Kontrol'nye karty Shewharta kak instrument povysheniya kachestva upravlencheskih reshenij v usloviyah real'nogo proizvodstva / V. Smelov, E. Hunuzidi, V. Shper // 13th DQM International Conference Life Cycle Engineering and Management DQM-POLYTECH-2022 – 2022. – S. 94-101.
 27. *Shper, V.L.* The Impact of non-normality on the control limits of Shewhart's charts / V.L. Shper, S.A. Sheremetyeva // Tyazheloe mashinostroenie. 2022. № 1-2. C. 15 – 28.

Ekaterina Okunevich, Student.

E-mail: m1903601@edu.misis.ru

Vladimir Smelov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Certification and Analytical Control. E-mail: b.c.21@mail.ru

Svetlana Sheremetyeva, Graduate Student of the Department of Certification and Analytical Control.

E-mail: prosto_sveta92@mail.ru

Vladimir Shper, Candidate of Sciences, Leading Expert of the Laboratory of Hybrid Additive Technologies.

E-mail: vlad.shper@gmail.com

Elena Khunuzidi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Certification and Analytical Control. E-mail: el_hun@mail.ru

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ РАСЧЁТА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ
В СЕРВИСЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ. ЧАСТЬ 2

© 2023 П.О. Скобелев^{1,2}, А.С. Табачинский^{1,2}, Е.В. Симонова³, Ю.Н. Журавель⁴, Г.Н. Мятков¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

² Самарский федеральный исследовательский центр РАН, г. Самара, Россия

³ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

⁴ АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

В статье представлена концепция цифрового двойника растений – системы поддержки принятия агрономических решений для внедрения технологий точного земледелия. Цифровой двойник растений позволяет на основе климатических и почвенных данных с полей прогнозировать и моделировать состояние растений и выдавать рекомендации по обработке посевов. Цифровой двойник растений разработан с применением мультиагентных технологий и онтологического подхода к описанию предметной области.

Ключевые слова: цифровой двойник растений, точное земледелие, система поддержки принятия решений, мультиагентные технологии, модель роста растений

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-67-75

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья описывает вторую часть исследования методов, разработанных для цифрового двойника растений на основе предложенной модели роста и развития растений по стадиям [раздел 3, часть 1].

Разработка методов определения сроков стадий развития растений в последние годы является актуальной темой научных исследований.

В патенте [1] описывается система для прогнозирования параметров растений в требуемый момент времени на основе метода расчета

средней нормы внесения удобрений для целевой урожайности различных культур на поле на основе предварительно рассчитанной средней нормы внесения удобрений по нескольким предыдущим сезонам.

В патенте [2] рассматривается система и метод планирования и мониторинга стадий развития посевов растений в сопоставлении с ростом реальных растений. Реализуется эмпирический метод формирования до посева плана из наиболее и наименее благоприятных временных интервалов для выполнения агротехнологических операций на каждом поле по данным о географическом положении поля, культуре, фазах роста и развития, механическом составе почвы, практиках выращивания (засев, обработка, орошение, уборка урожая, внесение удобрений и средств защиты).

Решение [3] представляет метод и устройство для обеспечения роста урожая сельскохозяйственных культур на основе обработки больших сельскохозяйственных данных с применением кластерной архитектуры для параллельных вычислений.

Посадочное оборудование генерирует большой объем данных о растениях, эти данные регулярно обновляются. Если контроль осуществляется с точностью до каждого растения, можно рассчитать прогресс роста каждого растения. Система может работать с разными культурами, имеющими различные циклы роста и развития, которые должны быть связаны с кон-

Скобелев Петр Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники растений» СамНЦ РАН, заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» СамГТУ. E-mail: petr.skobelev@gmail.com

Табачинский Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Цифровые двойники растений» СамНЦ РАН, доцент и научный сотрудник кафедры «Теоретическая и общая электротехника» СамГТУ. E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru

Симонова Елена Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского университета. E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

Журавель Юлия Николаевна, ведущий специалист АО «РКЦ «Прогресс». E-mail: ntsomz_5@mail.ru

Мятков Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрический привод и автоматика» СамГТУ. E-mail: miatov@mail.ru

кретными культурами для последующих расчетов. Весь период роста делится на этапы для оценки прогресса роста культуры. Пользователь может просматривать данные о посеве каждый день или каждую неделю.

В патенте [4] описывается высокоточный метод динамического мониторинга роста сельскохозяйственных культур и оценки урожайности на основе данных спутникового дистанционного зондирования с высоким разрешением и модели урожая. Метод предусматривает проектирование множества сцен моделирования роста растений с учетом различных метеорологических факторов за весь период роста; построение уравнения регрессии на весь период и на каждый день периода роста. С помощью уравнения регрессии и с учетом метеорологических данных можно смоделировать развитие растений в любой день периода роста культуры.

В патенте [5] представлена система оценивания и прогнозирования процесса выращивания сельскохозяйственных культур. Вычисляется количество потребляемых ресурсов, которое требуется культуре в соответствии с агротехнологическим процессом. На основе разности необходимого и фактически потребляемого выращиваемой культурой количества ресурсов, оценивается степень риска снижения урожая рассматриваемой культуры. В процессе работы системы формируется график полива и внесения удобрений. Фермеру предоставляется график выращивания его целевой культуры с указанием сроков и объема полива, сроков и количества внесения удобрений от момента начала до момента окончания процесса выращивания.

На основании анализа разработок можно сделать следующие выводы:

- модели, используемые для оценки параметров растений на различных этапах их роста и развития, часто строятся на основе одного параметра, например, индекса NDVI, при этом не учитывается тип почвы, температура и влажность почвы, количество осадков, температура и влажность воздуха и другие параметры;

- большая часть моделей ограничивается одним аспектом управления процессом выращивания культур, например, поливом или внесением удобрений / СЗР, а также краткосрочным прогнозом погоды;

- известные на сегодня автоматизированные системы для растениеводства в основном реализуют функции учета, мониторинга и контроля, но лишь в малой степени используют экспертные знания агрономов для поддержки принятия решений на основе данных о ходе роста растений.

Поэтому для разработки математических моделей и методов расчета стадий роста и раз-

вития растений в цифровом двойнике растений (ЦДР) целесообразно использовать детальное формализованное представление знаний о каждой стадии развития растений для вычисления правил перехода между стадиями в зависимости от параметров внешней среды и текущего состояния растения.

Данная статья имеет следующую структуру. Во введении обосновывается актуальность разработки методов определения сроков стадий развития растений в ЦДР. В первом разделе рассматривается графический метод расчета длительности стадии развития растения и метод расчета длительности стадии развития растения на основании долгосрочного прогноза. Во втором разделе предлагается модель ЦДР, учитывающая совокупное влияние на сроки стадий и урожайность культур группы факторов, таких как температура, влажность, гидротермический коэффициент, содержание азота, фосфора, калия в почве. В третьем разделе описывается архитектура и функциональность прототипа ЦДР. В выводах обсуждаются результаты разработки и проведенных исследований, а также намечаются планы дальнейших разработок.

1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАДИЙ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ

1.1. Графический метод расчета длительности стадии развития растения

В [п. 3.1, часть 1] представлена модель «тубок» для моделирования процессов роста и развития растения по стадиям. На основании предложенной гипотезы требуется разработать методику расчета дат начала и окончания стадии в зависимости от действия различных факторов.

Базовые основы представленных в статье методов и первые версии их реализации описаны в [6-8]. Дальнейшее развитие методов с учетом климатических и почвенных факторов выполнено в кооперации с Самарским НИИСХ им. Тулайкова [9].

Покажем предлагаемую методику расчета длительности стадии развития растения на примере накопленной активной температуры воздуха, т.к. это один из основных факторов, влияющих на длительности стадий роста и развития растения, принципиально разработанная методика расчета будет той же для других факторов.

Как было предложено выше, примем для каждой стадии гипотезу линейности связи ее длительности с температурой, которая является весной восходящей, а осенью нисходящей.

Считаем, что ведется календарь наблюдений (или данные поступают с внешнего сервиса, или

доступен прогноз погоды), в котором отмечается время и дневная температура воздуха в начале стадии t_1 и температура воздуха на каждый день t_j . Используя эти данные, а также статистические (идеальные) данные по стадиям, в частности, длительность стадии (день идеального окончания стадии y_1) и пороговую сумму активных температур воздуха T_1 на конец стадии, возможно построить прямую, отражающую идеальный $f_{\text{идеал}}(t)$ рост растения на конкретной стадии развития. Покажем, что, используя построенную прямую $f_{\text{идеал}}(t)$ и полученные данные календарных наблюдений, графическим способом можно определить реальную дату окончания стадии y' , построив прямую $f_{\text{календ}}(t)$, отражающую фактический рост растения на стадии.

В качестве примера в таблице 1 приведены некоторые календарные наблюдения и статистические данные по трем первым стадиям для посевов озимой пшеницы в 2019-2020 гг. в Среднем Поволжье.

Алгоритм определения реального срока окончания стадии с учётом данных таблицы 3 состоит из следующих этапов:

1. Строим прямую линию, отражающую идеальный $f_{\text{идеал}}(t)$ рост растения.

1.1 Из календарных наблюдений получаем дату начала стадии y_1 . Например, начало стадии C_0 приходится на 2 сентября. С учётом сдвига начала координат принимаем $y_1=0$.

1.2 Из календарных наблюдений получаем сумму активных температур воздуха в начале стадии, например, для стадии C_0 $t_1=14,1^\circ\text{C}$.

1.3 Из справочных данных выбираем идеальную длительность стадии в сутках, например, для стадии C_0 $y_2=6$.

1.4 Из справочных данных выбираем идеальную пороговую сумму активных температур на дату окончания стадии, например, для стадии C_0 $T_2=110^\circ\text{C}$.

1.5 Получаем две точки в декартовой системе координат: начальную точку $(0;14,1)$ и вторую точку $A(6;110)$. Проводим через эти две точки прямую $f_{\text{идеал}}(t)$, которая характеризу-

ет идеальные условия роста растения в данном случае для стадии C_0 .

2. Строим прямую линию $f_{\text{календ}}(t)$, отражающую календарный рост растения на стадии.

2.1 Из календарных наблюдений берём дневную календарную температуру воздуха в начале стадии, например, для стадии C_0 $t'_1=14,1^\circ\text{C}$.

2.2 Из календарных наблюдений выбираем календарную сумму активных температур на момент идеального окончания стадии, например, для стадии C_0 на шестые сутки $T'_2=91,2^\circ\text{C}$.

2.3 Получаем две точки в декартовой системе координат: начальную точку $(0;14,1)$ и вторую точку $B(6;91,2)$. Проводим через эти две точки прямую $f_{\text{календ}}(t)$, которая характеризует календарный рост растения в данном случае для стадии C_0 .

3. Из точки A проводим прямую линию, параллельную оси абсцисс (дни) до пересечения с прямой $f_{\text{календ}}(x)$. Получаем точку пересечения C . Из точки C проводим прямую, параллельную оси ординат (температура) до пересечения с осью абсцисс. Точка пересечения определяет реальный срок окончания стадии развития растения. Например, для стадии C_0 $y'_2=7,2$ суток. Округляя до целого значения в меньшую сторону, получим реальную длительность стадии C_0 $y'_2=7$ суток.

Графически алгоритм проиллюстрирован на рисунке 1.

Датой окончания стадии следует считать дату, когда $T'_2=T_2$. Срок смещается относительно y_2 вправо, если сумма календарных активных температур $T'_2 < T_2$, и влево, если $T'_2 > T_2$.

1.2. Метод расчета длительности стадии развития растения на основании долгосрочного прогноза

В целом при расчёте дат начала и окончания стадий необходимо оценить по прогнозу на длительный срок возможный ход температуры в данной местности, чтобы сформировать плановую траекторию развития растений. Для это-

Таблица 1 – Некоторые календарные и статистические данные по двум первым стадиям

Стадия	Дата начала/окончания стадии	Сумма активных температур в начале стадии, $^\circ\text{C}$	Идеальная/календарная средняя температура, $^\circ\text{C}$	Идеальная/календарная сумма активных температур на окончание стадии, $^\circ\text{C}$	Идеальная/календарная длительность стадии, сутки
C_0	02.09.2019/ 08.09.2019	13,4	14/13,4	110/91,2	6/7
C_1	09.09.2019/ 27.09.2019	91,2	11/7,7	300/248,6	17/19

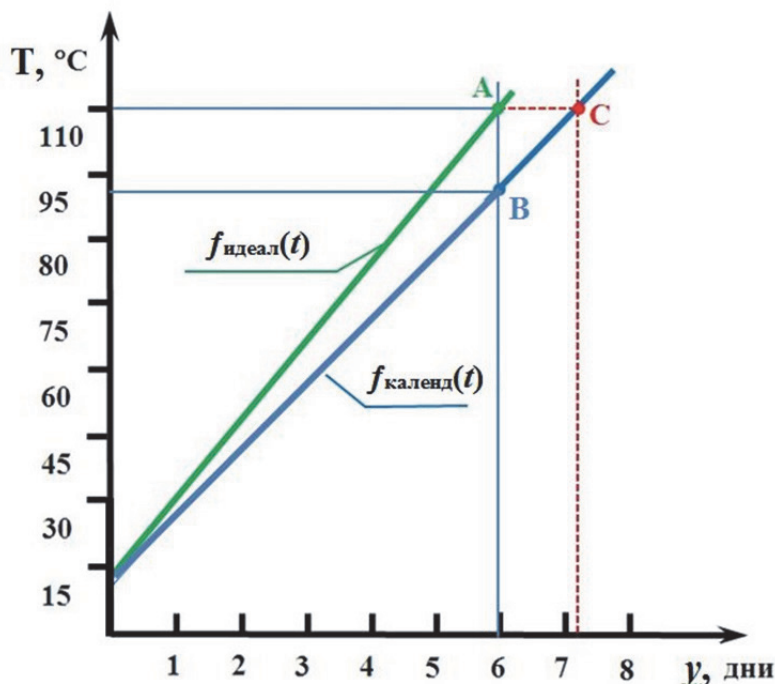


Рисунок 1 – Графический способ определения длительности стадии развития растения

го используются статистические данные по температуре в месте посева в сочетании с оценками метеорологов и агрономов на предстоящий сезон, которые будут давать предполагаемые отклонения от среднестатистических данных. Проведенные исследования источников показывают, что можно использовать статистические данные и возможные диапазоны отклонений температуры от средних значений [10].

В простейшем случае можно на сезон задать 12 (или более) точек температуры по месяцам, причем промежуточные точки линейно интерполируются.

В общем виде способ вычисления даты окончания стадии выглядит следующим образом. Если из каких-либо источников известны статистические (среднеголетние) значения температуры t_1 и t_2 на предполагаемые идеальные даты начала y_1 и окончания y_2 стадии, и они находятся в пределах критических границ «трубки» температуры, при которых траектория развития растения подчиняется линейному закону, то номинальную температуру t в текущий день стадии можно вычислять по формуле

$$t = ky + b,$$

где y – день от начала стадии, $k = (t_2 - t_1) / (y_2 - y_1)$, $b = t_1 - ky_1$, т.е.

$$t = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)}{y_2 - y_1} (y - y_1).$$

Дата окончания стадии по статистическим данным y_2 определяется исходя из имеющейся оценки длительности стадии по накопленным активным температурам T_0 .

Подход к вычислению срока окончания стадии в длительном прогнозе проиллюстрирован на рисунке 2.

Считаем, что известны прогнозные значения температуры t_{1f} и t_{2f} на даты номинальных начала и окончания стадии.

Поскольку все значения температуры от t_1 до t_2 находятся выше 10° , то можно рассматривать сумму активных температур T_0 как площадь трапеции ABCD:

$$T_0 = \frac{t_1 + t_2}{2} (y_2 - y_1).$$

Тогда для определения даты окончания стадии по прогнозным данным составим соотношение:

$$\frac{t_1 + t_2}{2} (y_2 - y_1) = \frac{t_{1f} + t_{2f}}{2} (y_2 + \Delta y),$$

где $\Delta y = y_{2f} - y_2$ – смещение срока окончания стадии,

$$\Delta y = y_2 \cdot \left(\frac{t_1 + t_2}{t_{1f} + t_{2f}} - 1 \right).$$

Кроме сроков длительности стадий, в качестве ключевого выходного параметра выбран прогноз урожайности. При составлении прогноза урожайности предлагается использовать штраф (вычет из потенциала сорта) за отклонение от оптимальной «трубки» $[x_2; x_3]$ для каждого фактора. За такое отклонение из потенциальной урожайности сорта вычитается установленное агрономом значение штрафа, а в случае выхода значений параметра за границы $[x_1; x_4]$ используются дополнительные правила, например, урожай не формируется или растение с высокой вероятностью погибает.

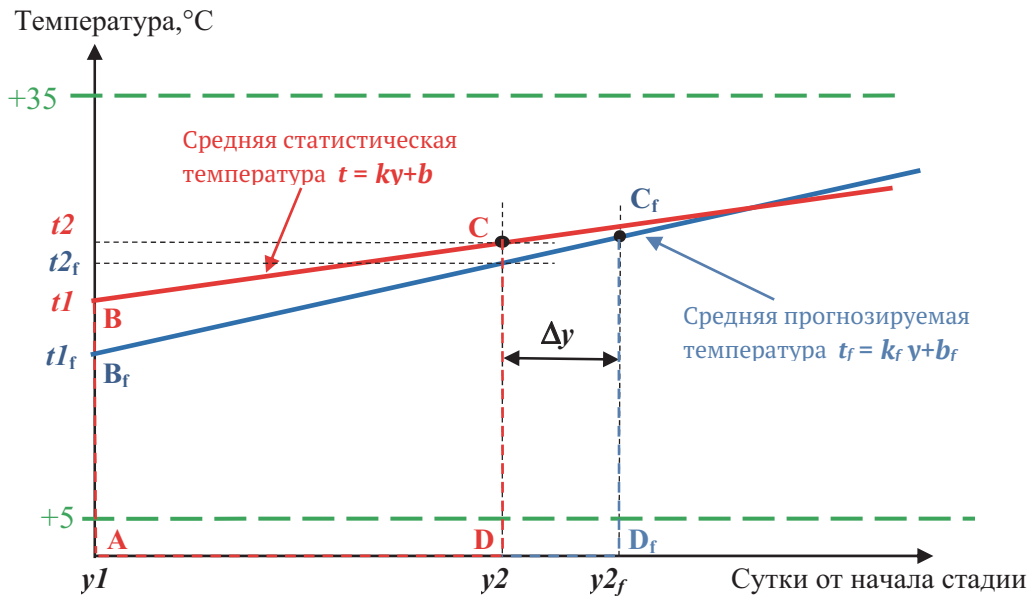


Рисунок 2 – Вычисление срока окончания стадии в длительном прогнозе

Таким образом, пошаговый подход к построению траектории развития растения на основе предлагаемых в модели соотношений и графического способа определения реальной длительности стадии позволяет вводить события отклонений внешних факторов и оперативно пересчитывать оценки начала и длительности стадий и прогноз урожайности.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЦДР НА ОСНОВАНИИ ГРУППЫ ФАКТОРОВ

При наличии группы факторов (температура, влажность, гидротермический коэффициент, содержание азота, фосфора, калия в почве) необходимо учитывать их совокупное действие.

В этом случае получаемую модель посевов растения можно записать в виде:

$$\vec{Y}_i = \vec{F}_i(\vec{x}_i, t_{ij}),$$

где \vec{Y}_i – вектор длительности стадий, оценки урожайности и других выходных параметров;

\vec{x}_i – вектор внешних условий (температура, влажность, содержание минеральных веществ и т.д.);

t_{ji} – номер дня j на стадии i ;

i – номер стадии.

Функцию модели ЦДР определим следующим образом:

$$\vec{F}_i = \begin{cases} \text{Nomin}_i(\vec{x}_i, t_{ij}), & \text{если } \vec{x}_i \in [\vec{x}_i(\varepsilon)] \\ a_i(t_{ij})\vec{x}_i + \vec{b}_i, & \text{если } \vec{x}_i < \vec{x}_i(C) \\ \text{Rules}_i(\vec{x}_i, t_{ij}), & \text{если } \vec{x}_i > \vec{x}_i(C), \end{cases}$$

где $\text{Nomin}_i(\vec{x}_i, t_{ij})$ номинальная траектория роста и развития растений по стадиям i в оптимальных условиях внешней среды (\vec{x}_i) по результатам многолетних наблюдений;

$\vec{x}_i(\varepsilon)$ – ε -окрестность параметров внешней среды вокруг идеального значения,

$\vec{x}_i(C)$ – критические для развития растений значения параметров внешней среды,

$a_i(t_{ij})$ и \vec{b}_i – линейная аппроксимация развития для параметров среды внутри «трубки» критических значений,

$\text{Rules}_i(\vec{x}_i, t_{ij})$ – множество правил развития растения, применяемых при выходе одного или нескольких параметров за критические значения по логическим правилам на основе экспертных знаний агронома (например, прекращение роста и развития или гибель растения при определенных параметрах внешней среды).

На первой стадии исследований была предложена наиболее простая модель, когда из нескольких альтернативных оценок выбранного выходного параметра по разным факторам, например, длительности текущей стадии или прогноза урожайности, выбирается средний или худший вариант.

Если каждый из входных параметров x_i дает собственную оценку выходных параметров Y_i , то сводная характеристика \tilde{Y}_i по каждому выходному параметру задается по одной из следующих предлагаемых процедур:

1. \tilde{Y}_i может рассматриваться как среднее значение по всем полученным оценкам:

$$\tilde{Y}_i = \frac{\sum_k Y_i^k}{N},$$

где k – индекс суммирования, N – количество оценок.

2. \tilde{Y}_i – минимальное или максимальное значение из всех полученных значений Y_i .

3. $\tilde{Y}_i = \text{External}(Y_i)$, где External – внешняя процедура для выбора значений Y_i , которая может

подключаться пользователями-агрономами для учета специфики региона или выращивания культур растений.

Таким образом, на основе рассмотренной выше модели роста и развития растения по стадиям можно сформировать модель посева сорта растения для каждого поля в следующем виде:

Посев = {Дата посева, Поле, Сорт растения, Параметры посева, План-график роста и развития посева, Факт и прогноз погоды, Прогноз урожайности посева, Рекомендации по возделыванию, Коррекция прогноза},

где Дата посева – день и час посева семян на поле;

Поле = {GPS координата центра поля, Границы поля, Состав почвы, Запас влаги} – параметры поля для посева растений;

Сорт растения – ссылка на описание сорта растения;

Параметры посева – глубина закладки семян, норма высева и др.;

План-график роста и развития посева – планируемые сроки начала и завершения каждой стадии роста и развития растения;

Факт и прогноз погоды – фактические данные и прогноз температуры воздуха и почвы на 12.00 каждого дня и прогнозируемый вид и объем осадков с локальной метеостанции;

Прогноз урожайности посева – прогноз средней урожайности растений на поле;

Рекомендации по возделыванию – формируемые рекомендации по каждой стадии роста и развития растений;

Коррекция прогноза – вводимая на границах стадий коррекция длительности стадий и прогноза урожая.

Отметим, что разработанная методика построения модели позволяет расширять число факторов, используемых для моделирования стадий роста и развития растений.

3 ФУНКЦИИ И АРХИТЕКТУРА ПРОТОТИПА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ

Для экспериментального исследования моделей и методов расчета длительности стадий роста и развития растений был разработан прототип ЦДР.

В состав прототипа ЦДР входят клиентская и серверная части.

Клиентская часть предназначена для формирования запросов от пользователей на создание ЦДР посева и взаимодействия с ним через мобильное приложение.

Серверная часть предназначена для обеспечения функционирования клиентской части и взаимодействия с внешними сервисами.

В состав серверной части входят следующие подсистемы и модули:

- подсистема конструктора онтологий и базы знаний по культурам;
- мультиагентная подсистема для планирования и моделирования роста и развития растений, а также прогноза урожая и выработки рекомендаций;
- подсистема визуализации данных;
- подсистема хранения данных (база данных);
- подсистема коммуникации с пользователями;
- подсистема интеграции.

Основные элементы функционала прототипа ЦДР представлены на рисунке 3.

Функционирование прототипа ЦДР можно описать следующим образом:

1. Пользователь выбирает из базы знаний сорт растения, задаёт дату и географическую точку (поле) его посева. Для посева создаётся экземпляр ЦДР.

2. В соответствии с выбранной датой посева запускается экземпляр ЦДР, для которого определены значения параметров внешней среды на момент посева, их среднесезонные значения и прогноз значений на некоторый выбранный период. Формируется исходная траектория развития посева.

3. В ходе своей работы ЦДР с некоторым шагом дискретизации осуществляет загрузку данных с сервиса погоды, а также в любой момент имеет возможность получить обратную связь от пользователя для синхронизации своего состояния с реальным посевом. При переходе на следующую стадию синхронизация является обязательной.

4. При получении данных о фактическом состоянии внешней среды или регистрации изменений любого из параметров растения осуществляется автоматический пересчет выходных параметров текущей стадии. Её новые выходные параметры передаются на вход следующей стадии и т.д. В результате происходит полный адаптивный пересчет сроков завершения текущей и наступления следующих стадий, а также прогноза урожайности посевов растений.

5. В соответствии с информацией из базы знаний о конкретном сорте пользователь получает рекомендации о необходимости выполнения тех или иных агротехнологических мероприятий на определённых стадиях. Факт выполнения мероприятия передаётся в ЦДР через форму обратной связи.

6. При получении информации о выполнении мероприятия аналогично запускается пересчет результатов продукционного процесса растений.

7. Сведения о рассчитанных результатах будущих стадий передаются обратным ходом на предшествующие стадии, т.к. предпо-

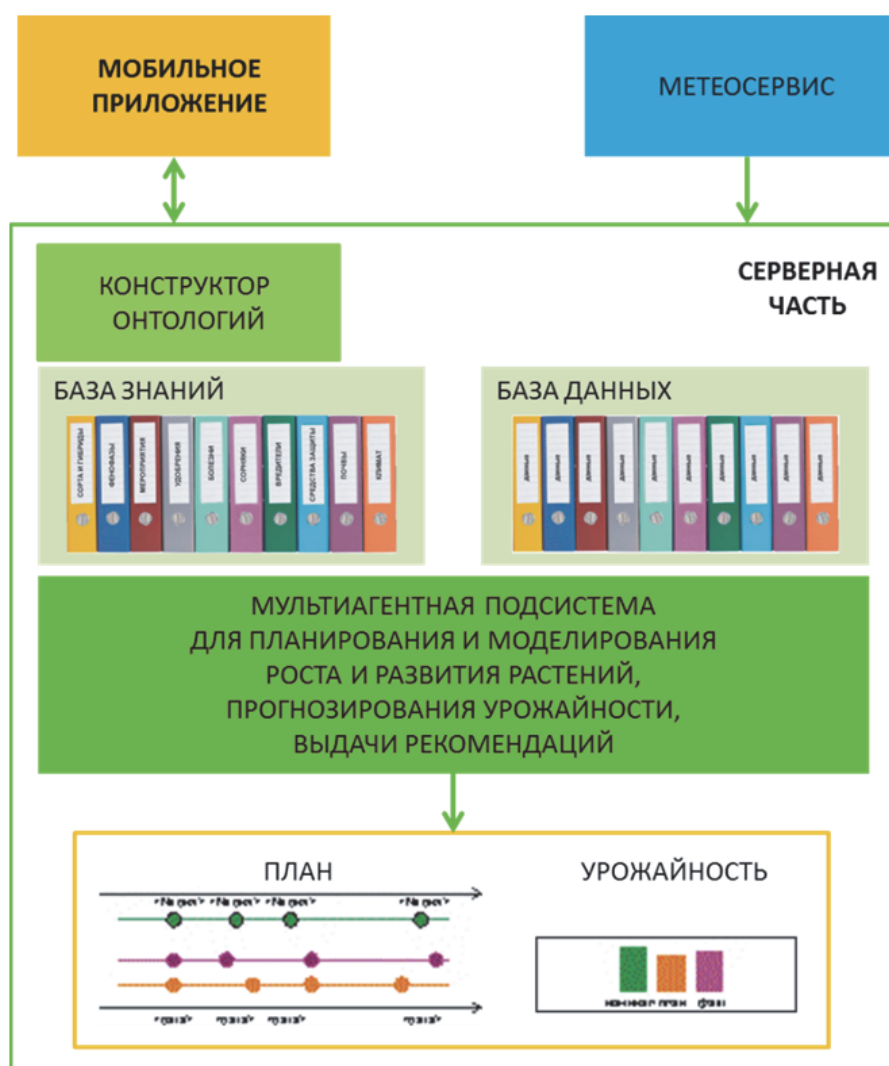


Рисунок 3 – Обобщённая схема функционала прототипа ЦДР

лагаемое критическое падение урожайности должно приводить к отмене рекомендаций по внесению удобрений во избежание лишних расходов.

8. Пользователь имеет возможность в любой момент времени создать клоны запущенного экземпляра ЦДР и промоделировать на них виртуальные события в режиме «что будет, если ...», чтобы оценить влияние на посев различных изменений погоды или выполнения / невыполнения тех или иных рекомендаций.

9. После сбора урожая реального посева и внесения данных о результатах ЦДР выгружает все данные в базу данных для последующей аналитики и завершает свою работу.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

В ходе исследований и разработок, описанных в статье, предложены новые математические модели и методы. расчета стадий роста и развития растений, в том числе, учитывающие

совокупное влияние множества факторов погоды, почвы и внешней среды.

Для реализации предложенной методологии разработаны принципы и подходы к созданию ЦДР, выбраны основные значимые параметры внешней среды и разработана математическая модель стадий роста и развития растений на основе нормальной и критической «трубки» параметров траектории развития усредненного растения, предложены методы расчета длительности стадий роста и развития растений и оценки урожайности.

Цифровой двойник растений должен оценивать факторы, влияющие на урожайность культур, включая влажность и температуру воздуха и почвы, содержание в почве азота, углерода, калия, фосфора и других элементов, и на этой основе планировать и моделировать стадии роста и развития растений, а также прогнозировать урожайность. Наличие в ЦДР модели растения помогает аграриям принимать решения о сортах и сроках посева культур, объемах и сроках внесения удобрений и средств

защиты растений, о сроках проведения агротехнологических мероприятий, которые должны соответствовать основным стадиям роста и развития растений.

Разработанные при этом математические модели «трубки» диапазонов изменения параметров нормального и критического развития растения на каждой стадии, а также методы расчета плана роста и развития растений и прогноза урожайности выгодно отличаются от математических моделей на основе дифференциальных уравнений, для использования которых нужны сложные и детальные индивидуальные настройки и данные по каждому полю, и нейронных сетей, требующих больших обучающих выборок данных, а также переобучения при изменениях климата. Относительным недостатком разработанных моделей и методов можно считать эмпирический характер экспертных знаний агрономов, закладываемых в ЦДР, что компенсируется открытостью базы знаний для расширения или уточнения предметных знаний для каждого предприятия и каждого поля, а также постоянной синхронизацией цифровых двойников посевов с реальными растениями посредством осмотров агрономами.

Для планирования и моделирования стадий роста и развития растений разработан прототип мультиагентной системы ЦДР, позволяющий проводить экспериментальные исследования предложенных моделей и методов расчета стадий роста и развития растений.

Среди направлений дальнейшего развития ЦД растения можно выделить следующие:

- развитие моделей и методов планирования роста и развития растений как сложных адаптивных систем с эмерджентным интеллектом;
- расширение базы знаний библиотекой онтологических моделей культур;
- развитие сервиса выдачи рекомендаций для проведения агротехнических мероприятий по стадиям роста и развития растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zahn, M.* Systems to prescribe and deliver fertilizer over agricultural fields and related methods, 2019, US Patent 20190043142.
2. *Bittner, P.* Devices and methods for planning and monitoring agricultural crop growing, 2017, WO Patent 2017/148818.
3. *Wang, G.* Agricultural-big-data-based method and apparatus for generating growing progress of crops, 2016, CN Patent 106530107.
4. *Zhang, C.* 2019, Cross-scale high-precision dynamic crop growth monitoring and yield assessment method based on high-resolution remote sensing data and a crop model, Patent № CN109829234.
5. *Fujiama, K.* Information processing device, information processing method, and recording medium on which information processing program is recorded, 2018, WO Patent 2018/131480.
6. *Budaev, D., Lada, A., Simonova, E., Skobelev, P., Travin, V., Yalovenko, O., Voshchuk, G., Zhilyaev, A.* Conceptual design of smart farming solution for precise agriculture // Rzevski, G., Syngellakis, S. (Eds.). Management and Applications of Complex Systems. – WIT Press. 2019. – P. 139-146.
7. *Скобелев, П.О.* Реализация цифрового двойника растений для адаптивного расчета длительности стадий развития и прогнозирования урожайности культур в кибер-физической системе управления точным земледелием / П.О. Скобелев, И.В. Майоров, Е.В. Симонова, О.И. Горянин, А.А. Жилияев, А.С. Табачинский, В.В. Яловенко // Сборник трудов XXXIII Международной научной конференции Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-33, 14-18 сентября, 2020, Казань. – Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 12 часть 3 / под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2020. – С. 133-136.
8. *Petr Skobelev, Vladimir Larukhin, Elena Simonova, Oleg Goryanin, Olga Yalovenko, Vladimir Yalovenko.* Developing a smart cyber-physical system based on digital twins of plants // Proceedings of the Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WORLDS4 2020), 27-28 July, 2020, London, United Kingdom. – IEEE, IEEE Xplore® Digital Library. – P. 522 – 527. – <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9203790/proceeding>.
9. *Горянин О.И.* Климат и его влияние на продуктивность полевых культур в среднем Заволжье. Рекомендации / О.И. Горянин – Самарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.М. Тулайкова. – Самара, 2018. – 28 с.
10. *Skobelev, P., Mayorov, I., Simonova, E., Goryanin, O., Zhilyaev, A., Tabachinskiy, A., Yalovenko, V.* Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management. J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1703, 012022.

**REGARDING SOME OF THE METHODS
FOR CROP STATE CALCULATION IN DIGITAL TWIN OF PLANT. PART 2**

© 2023 P.O. Skobelev^{1,2}, A.S. Tabachinskiy^{1,2}, E.V. Simonova³, Yu.N. Zhuravel⁴, G.N. Miatov¹

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

³ Samara National Research University, Samara, Russia

⁴ Rocket Space Center “Progress”, Samara, Russia

In this paper, a concept of digital twin of plant, which is a decision support system to implement precise farming technologies. Digital twin of plant allows to forecast and simulate real crop state and suggest agricultural measures to the fields based on weather and soil data. Digital twin of plant is developed with the use of multi-agent technologies and ontology-based domain formalization.

Key words: digital twin of plant, precise farming, decision support, multi-agent technologies, crop growth model.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-67-75

Petr Skobelev, D.T.Sc., Chief Researcher of “Digital Twins of Plants” Lab at Samara Federal Research Center of RAS, Head of Department “Electronical Systems and Information Security” at Samara State Technical University.

E-mail: petr.skobelev@gmail.com

Aleksey Tabachinskiy, PhD, Head of “Digital Twins of Plants” Lab at Samara Federal Research Center of RAS, Associate Professor and Researcher of “Theoretical and Basic Electrical Engineering” Department at Samara State Technical University. E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru

Elena Simonova, PhD, Associate Professor of Information Systems and Technologies Department at Samara University. E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

Yulia Zhuravel, Lead Specialist at Rocket Space Center “Progress”. E-mail: ntsomz_5@mail.ru

Gennady Myatov, D.T.Sc, Professor of Electrical Drives and Automation Department at Samara State Technical University. E-mail: miatov@mail.ru

УДК 621.3.037.3

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛЬНЫХ СООБЩЕНИЙ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

© 2023 А.В. Жаринов

Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, г. Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 11.02.2023

В данной статье рассмотрена проблема передачи сигнальных текстовых сообщений в бортовых вычислительных сетях летательного аппарата. В статье приведен краткий обзор перспективных направлений в проектировании современной авионики, таких как: интегрированная модульная авионика и Avionics Full Duplex Ethernet. В тексте статьи приведен протокол позволяющий формировать текст сигнальной зоны на многофункциональном индикаторе в кабине пилота, а так же осуществить передачу закодированного текста посредством применения протокола Arinc 664 (AFDX). Применение данного протокола позволяет передавать на многофункциональный индикатор в кабине пилота полностью сформированную в вычислительном блоке зону сигнальных сообщений. Преимуществом данного подхода является отсутствие фрагментирования информации, а следовательно увеличение частоты обновления информации на экране индикатора.

Ключевые слова: интегрированная модульная авионика, комплексное бортовое оборудование, бортовые сети, комплексная информационная система сигнализации, Arinc 429, Avionics Full Duplex Ethernet (AFDX).

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-76-82

ВВЕДЕНИЕ

При разработке авионики современных отечественных пассажирских лайнеров начиная с 2000-х годов начала применяться интегрированная комплексная архитектура (ИМА)[1]. Интегрированное комплексное бортовое оборудование имеет такую архитектуру, при которой замена любого блока не требует существенных изменений и модернизаций всей системы, перепайки контактов или реконфигурации сети. Поскольку в ИМА вычислительные процессы распределены между функциональными приложениями в оборудовании.

По сравнению с федеративной архитектурой переход к концепции ИМА позволяет существенно снизить весовые и стоимостные характеристики бортового оборудования ВС. Переход к ИМА обусловлен экономическими и организационно-техническими предпосылками. С одной стороны, наблюдаются все возрастающие потребности в расширении и удобстве наращивания функциональности оборудования с одновременным стремлением к снижению его стоимости и уменьшению эксплуатационных расходов. С другой стороны, существующий и прогнозируемый уровень развития технологий и элементной базы позволяет осуществлять все более глубокую интеграцию на аппаратном и алгоритмическом уровнях [6].

Применение ИМА во многом основано на новом подходе в построении вычислительных

*Жаринов Андрей Валерьевич, инженер-исследователь.
E-mail: Jaa111200@mail.ru*

сетей. Современные вычислительные сети ЛА спроектированы в соответствии со стандартом Avionics Full Duplex Ethernet (AFDX) [3]. Отличительной особенностью применения AFDX в бортовых сетях обмена является переход от сетей построенных на каналах точка-точка (ARINC 429 или RTM 1495-75) [8] и каналом множественного доступа с центральным управлением к сетям на основе пакетной коммутации.

Уведомления и предупреждения об отказах или нештатных ситуациях на борту передаются пилоту в следующем виде [5]:

- Звуковая сигнализация;
- Центральный сигнальный огонь;
- Информационные кадры по общесамолетным системам на многофункциональном индикаторе(МФИ);
- Зона сигнальных текстовых сообщений на МФИ.

В данной работе будет рассмотрен способ передачи текстовых сообщений в сети AFDX между вычислительным блоком концентратором (ВБ) и МФИ.

СТРУКТУРА КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СИГНАЛИЗАЦИИ ЛА

Комплексная информационная система сигнализации (КИСС) отвечает за предупреждение пилота о наступлении определенных событий на борту (штатных или нештатных). Современная система авионики выстроена так, что комплексы бортового оборудования отвечающие за

определенную самолетную систему, могут сами выявлять наступление тех или иных событий, в том числе и отказов оборудования. Затем сообщения об этих событиях поступают в вычислительный блок, где формируется информация для пилота. В вычислительном блоке формируется, какой текст, каким цветом и т.д. должен отобразиться на экране МФИ в кабине пилота.

МФИ представляет собой ЖК-монитор, который содержит ряд функциональных приложений для приема-вывода информации по различным каналам передачи данных (КЛС, AFDX, РК и др.), для формирования изображений на экране, проведению контроля и других функций. Пилот сам способен выбирать какую информацию хочет видеть на экране, посредством применения специального пульта с трекболом, напоминающий шариковую компьютерную мышь. Таким образом современные кабины авиалайнеров практически не содержат аналоговых приборов, а приборная панель состоит из большого количества различных мониторов (рис. 1).

Но перед тем, как сигнальное сообщение попадет на экран МФИ, система, отвечающая за те или иные происходящие события, должна отправить соответствующий сигнал на ВБ, которой в свою очередь, соединит сообщения, отправленные с других систем, и выдаст на экран пилоту.

В вычислительном блоке содержатся правила определения приоритета индикации одних сообщений над другими. Например, гораздо важнее показать пилоту информацию о том, что отказала система шасси, чем сообщение о том, что не работает принтер.

Количество индикаторов и вычислительных блоков определяется разработчиком ЛА на этапе проектирования самолетных систем (рис. 2) в зависимости от размеров ЛА, размера кабины и сложности КБО. Однако исходя из высоких требований к безопасности и отказоустойчивости, используется дублирование, как каналов передачи данных, так и самих функциональных модулей в системе.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С AFDX

Стандарт AFDX описывает управление передачей сообщений в бортовых сетях на основе традиционного стандарта Ethernet 802.3. Согласно стандарту AFDX, бортовая сеть состоит из следующих компонентов[2]:

- абоненты, передающие сообщения;
- оконечные системы – системы, обеспечивающие интерфейс между абонентами и сетью;
- пакетные коммутаторы, соединяемые линиями передачи данных.

Шесть основных аспектов сети передачи данных AFDX включают полный дуплекс, резервирование, детерминизм, высокую скорость работы, коммутируемую и профилированную сеть.

На канальном уровне модели OSI [4] передача информации в сетях AFDX основывается на применении виртуальных каналов (Virtual Links) в организации общения между абонентами. Каждый виртуальный канал имеет адрес отправителя и адрес получателя, называемый MAC-адресом виртуального канала, но в зависимости от традиционного понимания MAC-адреса в стеке TCP/IP, в AFDX MAC-адрес не



Рисунок 1. Кабина современного пассажирского лайнера

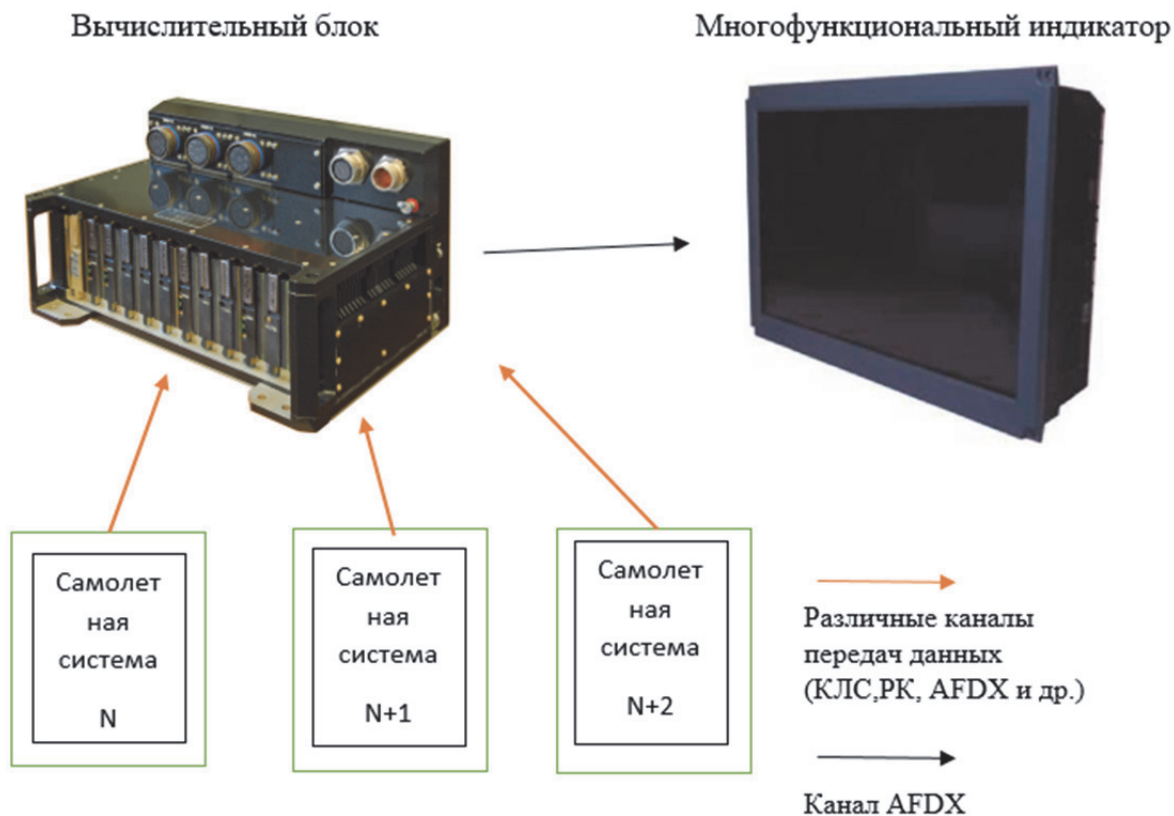


Рисунок 2. Структурная схема системы оповещения экипажа

закрепляется за сетевой картой абонента, а является идентификатором канала. Таким образом мы можем менять MAC-адрес при конфигурации сети. В остальном же используется протокол Ethernet (дуплекс, передача информации кадрами и т.д.) [7].

На сетевом уровне используется протокол IP, однако маршрутизация на этом уровне не производится, так как функция маршрутизации переключается на канальный уровень. На транспортном уровне используется протокол UDP (выборочно TCP). Таким образом сети AFDX используют стек основанный на семействе протоколов TCP/IP, на которых строится современный интернет.

Применение виртуальных каналов позволяет разделить пропускную способность сети, а также разграничить отправку сообщений по времени между различными абонентами. Порт

отправитель может посылать информацию в несколько портов получателей, но принимать информацию порт способен только из одного источника (рис. 3).

На уровне приложения порты (Application port) разделяются на порты отправители (Source port) и порты получатели (Destination port) [9]. Конфигурация портов, а также их размеры определяются заранее, при проектировании оконечной системы (ОС). В случае с комплексной информационной системой сигнализации ОС являются Вычислительный блок и МФИ. Так же при проектировании КБО, нужно заранее предусмотреть сколько портов понадобится в том или ином блоке.

В данной статье будет рассмотрен способ передачи информации с применением одного Source port в Вычислительном блоке и одного Destination port в МФИ. Максимальный размер

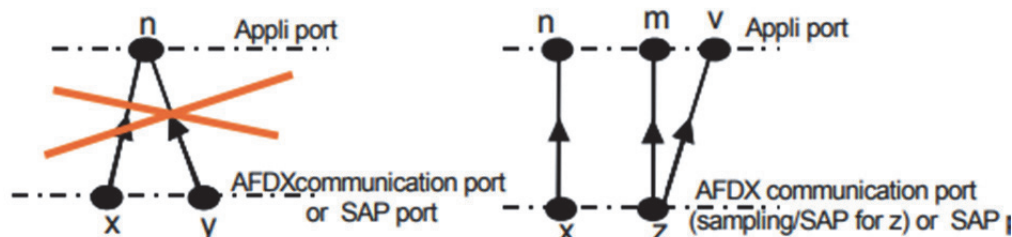


Рисунок 3. API-порты AFDX

полезной информации в одном сообщении в соответствии со спецификацией Atinc 664 1471 байт. Это накладывает ограничения на способы передачи текстовой информации.

Применение AFDX в современных авиалайнерах позволяет сократить количество проводов, а следовательно вес ЛА. Помимо этого упрощается процедура проектирования, сборки и обслуживания вычислительных сетей. Если в сетях типа «точка-точка» реконфигурация сети сопровождалась физическим переключением информационных кабелей, то в коммутируемых сетях AFDX реконфигурация может производиться путем загрузки конфигурационных файлов.

ПЕРЕДАЧА СИГНАЛЬНЫХ ТЕКСТОВЫХ СООБЩЕНИЙ В СЕТЯХ AFDX

Передача текстовой информации на МФИ с применением протокола AFDX накладывает ограничения на объем передаваемого сообщения. Как было сказано в предыдущем разделе, максимальным размер «полезной нагрузки» составляет 1471 байт (таблица 1). Это означает, что при разработке комплексной информационной системы сигнализации желательно уместить весь текст отображаемой страницы в эти 1471 байт для избегания фрагментирования информации, а следовательно уменьшения пропускной способности сети.

В зависимости от приоритета происходящего события сигнальные сообщения делят на 4 группы [10]:

- Warning (индицируются красным цветом);
- Caution (индицируются желтым цветом);
- Advisory (индицируются белым цветом);
- Memo (индицируются зеленым цветом).

В выделенной зоне на МФИ сигнальные текстовые сообщения могут находиться в следующих состояниях:

- Мигание;
- Подчеркивание (используется для выделения не подтвержденных пилотом сообщений);
- Инверсия (зона вокруг сообщения выделяется цветом приоритета, а сам текст остается черным. Используется для выделения новых сообщений);

- Скрытое сообщение (пилот имеет возможность скрыть сообщение с экрана МФИ. Вместо скрытых сообщений на экране индицируется спец. символ).

- Сфокусированное сообщение (индицируется рамка фокуса вокруг сообщения. Используется для того, чтобы пилот понимал с каким сообщением работает при подтверждении или скрытии сообщения).

Также в выделенной зоне на МФИ могут индицироваться такие символы как: символы переполнения сигнальной зоны (стрелка вверх или вниз).

Таким образом для каждой индицируемой строки необходимо помимо самого текста закодировать и передать выше перечисленные характеристики и специальные символы.

Признак пустой строки в Таблице 2 указывает на то, что строка под данным номером, не имеет текстового сообщения. Этот признак необходимо передавать для разделения строк между собой либо при условии когда k-количество сигнальных сообщений меньше n – количество строк в выделенной зоне на экране МФИ.

В зависимости от размеров сигнальной зоны на экране МФИ может уместиться разное n количество строк. В статье разобран пример, когда зона сигнальных сообщений вмещает 14 строк (n=14).

Теперь, когда определен характер передаваемой информации, необходимо определить кодировку полезных данных AFDX, при условии ограничения в 1471 байт [7].

Номер строки можно закодировать в двоичном коде, как обычное число. Под это достаточно выделить один байт.

Для передачи цвета строки достаточно передать заранее определенный номер цвета. Для этого будет достаточно одного байта согласно таблице 3.

Характеристики передаваемого сообщения имеют значение True/False. Поэтому коды их наличия можно разместить в одном байте.

Для кодировки текста можно воспользоваться стандартной кодировкой ASCII в части кодирования букв на латинице в этом случае для каждого символа или пробела будет достаточно одного байта.

Таблица 1. Общий вид сообщения AFDX

		64 – 1518 байт						
7 байт	1 байт	14 байт	20 байт	8 байт	17-1471 байт	1 байт	4 байта	12 байт
Преамбула	Начальный ограничитель	MAC Заголовков	IP Заголовков	UDP Заголовков	AFDX данные (Payload)	Порядковый номер AFDX-кадра	Контрольная сумма MAC – кадра	Межкадровый интервал

Таблица 2. Информация, необходимая для индикации текстовых сообщений

Номер строки	Номер в двоичном коде	Для каждой строки
Текст	Не более 42 символов. В соответствии с кодировкой.	Для каждой строки
Цвет	Красный, Желтый, Белый, Зеленый. В соответствии с кодировкой.	Для каждой строки
Инверсия	Да / Нет	Для каждой строки
Подчеркивание	Да / Нет	Для каждой строки
Мигание	Да / Нет	Для каждой строки
Рамка фокуса	Да / Нет	Для каждой строки
Признак скрытого текста	Да / Нет	Для каждой строки
признак переполнения страницы сверху (стрелка ввверх)	Да / Нет	Для каждой строки
признак переполнения страницы снизу (стрелка вниз)	Да / Нет	Для каждой строки
Признак пустой строки	Да / Нет	Для каждой строки

Таблица 3. Кодировка цвета текстового сообщения

Цвет	Кодировка
Красный	00000001
Янтарный	00000010
Зеленый	00000011
Белый	00000100

Таким образом кодировка одной строки будет иметь следующий вид:

Резерв (табл. 5) можно использовать для увеличения количества текстовых символов либо для передачи служебной информации при необходимости.

В итоге для передачи одной строки нам нужно 52 байта. Передача полностью сигнальной строки составит $n \cdot 52$ байт. На примере

МФИ пассажирского авиалайнера (рис.4), где сигнальная зона составляет 14 строк, нам понадобится 728 байт. Т.е. в выделенный диапазон уместились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концепция ИМА и применение протокола AFDX позволило разработчикам комплексного бортового оборудования значительно упростить решение многих задач, в том числе и передача сигнальных сообщений на экран МФИ. С применением технологии AFDX стало возможным передавать полностью сформированный текст сигнальной зоны одним файлом, а не набором сообщений, как в ARINC 429.

Предложенный в статье протокол позволяет передавать до 28 сигнальных сообщений ($1471/52 = 28$), если МФИ располагает большой

Таблица 4. Кодировка хар-ик текстового сообщения

Переменная	Кодировка		Разряд
	True	False	
Инверсия	1	0	1 бит
Подчеркивание	1	0	2 бит
Мигание	1	0	3 бит
Рамка фокуса	1	0	4 бит
Временная рамка	1	0	5 бит
Признак пустой строки	1	0	6 бит
Признак переполнения сверху	1	0	7 бит
Признак переполнения снизу	1	0	8 бит

Таблица 5. Структура кодировки строки

Номер байта	1 байт	2 байт	3 байт	4-10 байт	11-52 байт
Закодированная информация	Номер	Цвет	Характеристики и спец. символы	Резерв	Текст



Рисунок 4. Сигнальная зона текстовых сообщений на МФИ пассажирского авиалайнера

сигнальной зоной. К тому же мы избежали фрагментирования информации по разным пакетам, что позволит обеспечить высокую скорость обновления информации на экране.

Данная статья может быть полезной разработчикам комплексных систем индикации

и сигнализации, построенных в соответствии с концепцией ИМА и применением AFDX в качестве шины передачи данных. Предложенный протокол можно адаптировать под различные ЛА, увеличив или уменьшив количество строк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaska T., Watkins C., and Chen Y., "Integrated Modular Avionics — Past, present, and future", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 30:9 (2015), 12–23.
2. Балашов, В. В. Построение бортовых сетей реального времени на основе технологии ПКС, б. д. / В.В. Балашов, В.А. Костенко, Т.И. Ермакова - URL: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-1-23-38> (дата обращения 14.01.2023).
3. Костенко, В. А. Построение бортовых коммутируемых сетей минимальной сложности / В. А. Костенко, А. А. Морквин // Программирование, вып. 4 (2021 г.): 14–19. URL: <https://doi.org/10.31857/S013234742104004X> (дата обращения 14.01.2023).
4. Balashov, Vasily V., Valery A. Kostenko, u Tatiana I. Ermakova. «Design of Onboard Real-Time Networks Based on SDN Technology». Modeling and Analysis of Information Systems 26, вып. 1 (15 март 2019 г.): 23–38. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-1-23-38>.
5. Воробьев, В.Г. Основные принципы построения базового комплекса стандартного цифрового пилотажно-навигационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, В.П. Зыль, С.В. Кузнецов. - М.: МИИГА, 1988..
6. Федосов, Е.А. Интегрированная модульная авионика / Е.А. Федосов, В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк // Радиоэлектронные технологии. - 2015. - № 1. - С. 66-71.
7. Aircraft Data Network. Part 7. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network, Aeronautical Radio, 2012.
8. Руководящий технический материал авиационной техники РТМ 1495-75. Обмен информацией двухполярным кодом в оборудовании летательных аппаратов. Дата введения в действие 01.07.1975 г.
9. ARINC Specification 653. Airlines Electronic Engineering Committee. [PDF] (<http://www.arinc.com>).
10. Руководство по летной эксплуатации самолет RRJ-95В. «Гражданские самолеты Сухого», 2011.

ORGANIZATION OF THE TRANSMISSION OF SIGNALING MESSAGES IN THE COMPUTER NETWORKS OF THE AIRCRAFT

© 2023 A.V. Zharinov

Ulyanovsk Instrument Design Bureau, Ulyanovsk, Russia

This article considers the problem of transmitting signal text messages in the onboard computer networks of an aircraft. The article provides a brief overview of promising areas in the design of modern avionics, such as integrated modular avionics and Avionics Full Duplex Ethernet. The text of the article provides a protocol that allows you to generate the text of the signal zone on the multifunctional indicator in the cockpit, as well as to transmit the encoded text using the Arinc 664 (AFDX) protocol. The use of this protocol makes it possible to transmit to the multifunctional indicator in the cockpit the zone of signal messages completely formed in the computing unit. The advantage of this approach is the absence of information fragmentation, and therefore an increase in the frequency of updating information on the indicator screen.

Keywords: integrated modular avionics, integrated airborne equipment, onboard networks, integrated signaling information system, Arinc 429, Avionics Full Duplex Ethernet (AFDX).

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-76-82

REFERENCES

1. Gaska T., Watkins C., and Chen Y., "Integrated Modular Avionics — Past, present, and future", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 30:9 (2015), 12–23.
2. Balashov, V. V. Postroenie bortovyh setej real'nogo vremeni na osnove tekhnologii PKS, b. d. / V.V. Balashov, V.A. Kostenko, T.I. Ermakova - URL: <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-1-23-38> (data obrashcheniya 14.01.2023).
3. Kostenko, V. A. Postroenie bortovyh kommutiruemyh setej minimal'noj slozhnosti / V. A. Kostenko, A. A. Morkvin // Programmirovanie, vyp. 4 (2021 g.): 14–19. URL: <https://doi.org/10.31857/S013234742104004X> (data obrashcheniya 14.01.2023).
4. Balashov, Vasily V., Valery A. Kostenko, i Tatiana I. Ermakova. «Design of Onboard Real-Time Networks Based on SDN Technology». Modeling and Analysis of Information Systems 26, вып. 1 (15 март 2019 г.): 23–38. <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2019-1-23-38>.
5. Vorob'ev, V.G. Osnovnye principy postroeniya bazovogo kompleksa standartnogo cifrovogo pilotazhno-navigacionnogo oborudovaniya / V.G. Vorob'ev, V.V. Gluhov, V.P. Zyl', S.V. Kuznecov. - М.: МИИГА, 1988..
6. Fedosov E.A., Kos'yanchuk V.V., Sel'vesyuk N.I. Integrirovannaya modul'naya avionika / E.A. Fedosov, V.V. Kos'yanchuk, N.I. Sel'vesyuk // Radioelektronnye tekhnologii. - 2015. - № 1. - S. 66-71.
7. Aircraft Data Network. Part 7. Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network, Aeronautical Radio, 2012.
8. Rukovodyashchij tekhnicheskij material aviacionnoj tekhniki RTM 1495-75. Obmen informaciej duhpolyarnym kodom v oborudovanii letatel'nyh apparatov. Data vvedeniya v dejstvie 01.07.1975 g.
9. ARINC Specification 653. Airlines Electronic Engineering Committee. [PDF] (<http://www.arinc.com>).
10. Rukovodstvo po letnoj ekspluatatsii samolet RRJ-95B. «Grazhdanskije samolety Suhogo», 2011.

Andrey Zharinov, Research Engineer.
E-mail: Jaa111200@mail.ru

ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ВУЗОВСКОЙ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ РАБОТЫ С СОВРЕМЕННЫМИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

© 2023 С.А. Сарычева¹, В.А. Надежкин¹, А.Л. Золкин²

¹Самарский государственный университет путей сообщения

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 28.11.2022

В статье рассматриваются основные тенденции развития социально-экономической жизни людей, связанные с активным внедрением и совершенствованием цифровой экономики. Рассмотрены положительные стороны разработанной Концепции развития материально-технической базы Самарского государственного университета путей сообщения по специальности «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта».

Ключевые слова: системы передачи информации, устойчивость сетей, телекоммуникационные системы, цифровая экономика, системы коммутации, лабораторное оборудование, базовые характеристики маршрутизаторов, конфигурирование устройств, передача информационных данных.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-83-91

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время передача обширной информации обеспечивается благодаря сети Интернет. Интернет представляет собой глобальную информационную сеть, которая функционирует с помощью IP-технологий. IP-технологии используются для передачи данных (аудио и видеoinформации), для связи компьютеров друг с другом. TCP/IP (протокол управления передачей) обеспечивает передачу данных по сети Интернет. Этот протокол состоит из правил, которые позволяют пользоваться ресурсами сети Интернет.

Коммутаторы и маршрутизаторы компании Cisco являются оборудованием, благодаря которому реализуется протокол TCP/IP. Они позволяют выстраивать сети передачи данных.

Глобальные и локальные вычислительные сети. Компьютерные сети подразделяются на глобальные и локальные. Локальной сетью называется сеть, которая расположена на ограниченной территории, к примеру, в аудитории, в помещении и на станции. Данная сеть на железной дороге формируется благодаря технологиям FastEthernet, GigabitEthernet [1,3].

Глобальной вычислительной сетью (WideAreaNetwork-WAN) называется сеть, которая расположена на широком пространстве, к примеру, на нескольких станциях. Данная сеть используется для применения совместных информационных данных о перевозочных процессах. Сеть internet является составной, т.е. состоит из совокупности нескольких сетей. Составная сеть формируется с использованием подсетей различных технологий, таких как локальная и глобальная.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Большие компании формируют собственные сети, используя глобальные и локальные сети. ОАО «РЖД» применяет сеть internet и является ведомственной сетью, так как использует WAN и LAN-технологий [2,3].

Глобальная сеть формируется с использованием разнообразных сетевых технологий, к примеру, таких как аналоговые сети с применением модемов и с коммутацией каналов, а также цифровые сети интегральных служб.

Технологии PDH, SDH являются высокоскоростными. Технология PDH передает данные со скоростью до 34 Мбит/с на железнодорожном транспорте; а технология SDH имеет скорость от 155 Мбит/с до 2,488 Гбит/с. Мультиплексоры являются средствами технологий PDH, SDH.

Технологии виртуальной реальности (X.25, FrameRelay) используются в глобальных вычислительных сетях. Однако технология X.25 имеет низкую скорость передачи информации, так как применяет ненадежные аналоговые линии свя-

Сарычева Снежана Андреевна, техник кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». E-mail: snezhana.sarycheva.97@mail.ru
Надежкин Вадим Александрович, преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». E-mail: vadim_nadezhkin@mail.ru
Золкин Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника». E-mail: alzolkin@list.ru

зи. Эта технология применяется и в настоящее время, потому как аналоговые сети используются во всей железной дороге.

В отличие от вышеописанной технологии, FrameRelay имеет относительно высокую скорость передачи данных до 2 Мбит/с. Самую большую скорость передачи информации имеет сеть АТМ, но она не широко распространена, так как имеет высокую стоимость. Самым выгодным решением в использовании сетей для передачи данных является применение IP-сетей, потому как они имеют относительно недорогую стоимость и высокую скорость передачи информации [4].

Важная особенность современного оборудования для сетей - обеспечение бесперебойного соединения для того, чтобы информация (количество светофоров работающих, какие стрелки переключены, какие реле вышли из строя) передавалась непрерывно [3,5]. В этом случае допускается периодическое ухудшение качества связи в момент установления соединения, а также периодические технические неполадки (внешние помехи, молнии, магнитные бури, плохая погода, и т.д.)

Современные телекоммуникационные системы группируются из некоторых главных признаков, которые выделяют каждую систему друг от друга.

Системы связи можно систематизировать по типу среды распространения информации, т.е. пути передачи данных. Например, распространённые и дешёвые медные кабели, которые обходятся довольно дорого в связи с большой протяжённостью прокладки волокон, или более современное – оптоволокно, которое позволяет передавать данные с намного большей скоростью, чем все остальные пути передачи информации. Но и стоят такие кабели очень дорого, ведь технологический процесс получения оптоволокна ещё тяжёл в обработке [6,11].

Информацию подразделяют на аналоговую и цифровую, или “цифру” как говорят на сленге профессиональные радиоинженеры. Цифровая сеть является наиболее прогрессирующей связью, так как её наиболее качественно и четко можно передавать на расстояния с возможностью её редактирования путем применения модуляций в каналообразующих устройствах.

Методы исследования. Задача современных телекоммуникационных систем связи в том, чтобы согласовать трафик большого количества пакета данных от пункта А до пункта Б самым быстрым способом, наиболее дешёвым методом, а также соблюдать качественным приемом этой информации. Поэтому ведется активная разработка технических средств передачи пакетов данных [7].

Если говорить о масштабных системах передачи данных, то хочется рассказать про самую

востребованную сеть, в которой по данным сайта Wikipedia около 4 миллиардов человек, находящихся буквально в одном пространстве в глобальном смысле. Ежесекундный обмен данными производят Коммутаторы и Маршрутизаторы, которые позволяют наладить грамотную авторизованную работу по обмену так называемых IP адресов [8].

Инженеры по связи производят конфигурацию маршрутизаторам и коммутаторам, задают им алгоритмы выполнения работ по распределению серверов между активными и неактивными, чтобы общая сеть не нагружалась и освобождала места для работоспособных каналов [9]. Сети представляют собой комплекс аппаратных и программных средств, выполняющих передачу информации с заданными параметрами качества. По сетям передаются телефонные сообщения фиксированной и мобильной связи, видеoinформация, цифровые данные компьютеров. Для разных видов сообщений задаются различные параметры качества [10].

Сообщение – это форма представления информации, удобная для передачи на расстояние. Сигнал, с помощью которого передается сообщение, представляет собой потоки электрического тока, модулируемых с помощью кодирующих устройств [10]. Отображение сообщения обеспечивается изменением какого-либо параметра информационного сигнала, который представляет собой определенный физический процесс. В сетях для передачи сообщений используются электромагнитные сигналы, передача и прием которых производится по направляющей среде:

- медным проводам;
- оптическому волокну;
- беспроводной среде (радиоканалам).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Сеть передачи информации (инфокоммуникационную сеть) образуют множество источников и приемников сообщений (абонентов), соединенных между собой аппаратными средствами и средой передачи сигналов – линиями связи (рисунок 1).

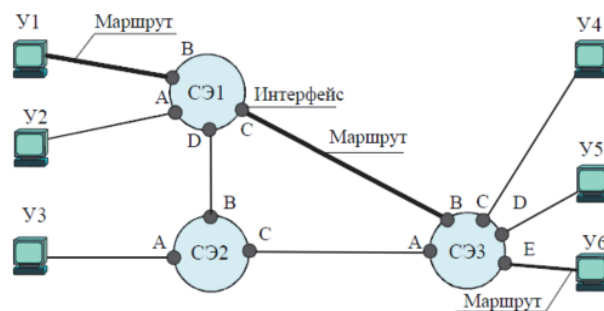


Рисунок 1 - Простейшая сеть передачи сообщений

Люди, которые пользуются услугами операторов компаний связи (Мегафон, Билайн, Теле 2 и т.д.) называются абонентами. Они заключают договор с компаниями связи о предоставлении доступа к сети Интернет, используя мобильный (телефоны, модемы, wi-fi и т.д.) или проводной (оптоволоконная сеть, домашняя сеть и т.д.) трафики [1, 4].

Благодаря развитию доступности и выбора сети Интернет, в глобальную сеть можно выходить с любого устройства, поддерживающего связь с беспроводной сетью.

Оборудование коммутации и передачи информации. Сетевые устройства делятся на конечные и промежуточные. Конечные устройства создают и принимают передаваемые по сети сообщения. Конечные узлы всех видов условно представлены в виде компьютеров. Чтобы передача сообщений была адресной, всем узлам в сетях с коммутацией пакетов должны быть присвоены сетевые IP-адреса. Промежуточные устройства осуществляют грамотную переадресацию, проверяют работу соседних устройств, а также фильтруют большой объем данных.

К промежуточным устройствам относят коммутаторы и маршрутизаторы. Коммутатор осуществляют подключение множества абонентов (ПК) с одним устройством, которое переадресовывается в маршрутизатор.

Коммутатор (или switch) представляет собой устройство, предназначенное для соединения нескольких узлов компьютерной сети в пределах одного или нескольких сегментов сети (2960 использует до 24 портов входа). Коммутатор работает на канальном (втором) уровне сетевой модели OSI. Коммутаторы были разработаны с использованием мостовых технологий и часто рассматриваются как многопортовые мосты. Для соединения нескольких сетей на основе сетевого уровня служат маршрутизаторы (3 уровень OSI).

В симуляторе Cisco Packet Tracer коммутатор выглядит как коробка, которую конфигурируют под нужды серверов и определенных типов сетей. Например, при виртуальных сетях Vlan используются коммутаторы как соединительный элемент. В лабораторной работе используется коммутаторы производства Cisco модели 2960.

Маршрутизатор (роутер или route) — это устройство, которое проводит оптимальный выбор наиболее выгодного пути от одного ПК-пользователя к другому через независимые локальные сети [2,4]. Маршрутизаторы являются маяком в миллионах каналах, который за секунды может осуществлять коммутацию одной сети с другой. В 70-х годах работу маршрутизаторов делали вручную.

С помощью устройств (маршрутизаторов) и протоколов сетевого уровня 3 семиуровневой эталонной модели OSI или уровня межсетевого взаимодействия модели TCP/IP происходит со-

единение локальных сетей LAN различных технологий (Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, Token Ring и др.) в глобальную (распределенную) WAN-сеть. При пересылке пакетов адресату назначения маршрутизатор реализует две основные функции [4]:

- выбирает наилучший (оптимальный) путь к адресату, анализируя логический адрес назначения передаваемого пакета данных;

- производит коммутацию принятого пакета с входного интерфейса на выходной для пересылки адресату.

Процесс выбора наилучшего пути получил название маршрутизация. Маршрутизаторы принимают решения, базируясь на сетевых логических адресах (IP-адресах), находящихся в заголовке пакета. Для определения наилучшего пути передачи данных через связываемые сети, маршрутизаторы строят таблицы маршрутизации и обмениваются сетевой маршрутной информацией с другими сетевыми устройствами [5, 6].

Все маршрутизаторы Cisco ISR серии 2900 поддерживают встроенные средства аппаратного ускорения шифрования, слоты цифровых сигнальных процессоров (DSP) для обработки голоса и видео, дополнительный межсетевой экран, систему предотвращения вторжений, систему обработки вызовов, средства голосовой почты и сервисы приложений. Кроме того, платформы поддерживают широчайший спектр проводных и беспроводных интерфейсов, таких как T1/E1, T3/E3, xDSL, медный и оптоволоконный GE [6].

Перечисленные выше устройства формируют возможность передачи данных в больших нагруженных сетях, они нужны для взаимодействия между собой оконечных устройств (Компьютеров, ноутбуков, и т.д.), иначе говоря, устройства, поддерживающие установку операционной системы. Выбор ПК для лабораторной работы идет в пользу минимальности, т.е. по минимальной стоимости.

Деятельность людей непосредственно связана с производством и распределением благ: материальных и нематериальных. Она оказывает воздействие на автоматизированную сферу управления средствами труда. Если раньше цифровая экономика изменяла собственные тенденции в течение длительного периода времени, то теперь современные методы и инструменты труда, которые основаны на цифровых технологических средствах, значительно упростились в своем управлении. Трансформация высшего образования в условиях цифровизации – вот что позволяет развивать профессиональные компетенции специалистов, обеспечивать высокий уровень подготовки квалифицированных кадров в высших учебных заведениях, оснащать рабочий процесс обучающихся обновленной и модернизированной материально-технической базой [7].

Именно поэтому первостепенной целью работы является выявление особенностей инновационного развития вузовского учебно-лабораторного комплекса.

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

- определение уровня востребованности инновационной деятельности в настоящее время;
- анализ этапов развития и становления образовательного пространства в связи с внедрением современных телекоммуникационных систем.

Актуальность темы обусловлена стремительным развитием цифровой экономики, которая представляет собой инновационную ступень модернизации и трансформации телекоммуникационных технологий, а также информатизацию систем образования.

В современных условиях, при которых востребованность информационных технологий выходит на первый план, цифровая трансформация неизбежна. Она подразумевает собой качественное изменение сферы производства и образования. Благодаря активному внедрению инновационных технологий в учебный процесс, повышается уровень доступности и качества образования, студенты повышают собственный интеллектуальный потенциал и практические навыки при работе с сетевым оборудованием и коммуникационными технологиями. С этой целью в 2021 году кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» (АТС) СамГУПС и Самарской дирекцией связи разработана Концепция развития учебно-научной лабораторной базы по специальности «Телекоммуникационные системы и сети железнодорожного транспорта» (ТКС). Согласно этой программе к настоящему времени оборудованы две лаборатории 1201 – Лаборатория «Системы коммутации в сетях связи» - и 1211 – Лаборатория «Современные технологии построения многоканальных инфотелекоммуникационных систем» (рисунок 2).



Рисунок 2 – Лаборатория 1211

Учебно-лабораторный комплекс дает возможности обучающимся выполнять методический материал на реальной аппаратуре, которым оснащены учебные аудитории (рисунок 2). Таким образом, студенты закрепляют практические навыки в области пакетной коммутации, телефонии, сетевых технологий, учатся принципу работы IP-сетей и настройке механизмов безопасности сетевой инфраструктуры. Это позволяет им развивать профессиональные компетенции в области телекоммуникационных систем.

В лабораториях 1201 и 1211 располагаются цифровые комбинационные центры, цифровые коммутационные центры. С их помощью студенты могут проводить анализ компьютерных сетей, понять принципы работы локальных сетей и маршрутизация между ними. Также в лаборатории 1211 располагается компьютерное оборудование для того, чтобы обучающиеся рассмотрели возможности программного пакета Cisco Packet Tracer (рисунок 3).

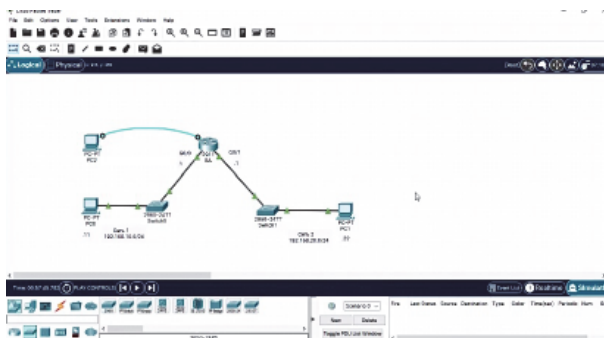


Рисунок 3 – Программный симулятор сетевых средств

Проведение лабораторных и практических работ в учебных лабораториях связано с настройкой сетевого оборудования: коммутаторов, маршрутизаторов, - ознакомлением с многоканальным телекоммуникационным оборудованием, цифровыми системами передачи информации и т.д.

Инновационное развитие учебно-научной лабораторной базы на кафедре «АТС» связано с дальнейшим продолжением её модернизации. В 2022 году производится ремонт и обслуживание сетевого оборудования. Реализацией совершенствования материально-технической базы кафедры занимаются не только заведующий лабораториями кафедры, её сотрудники, но и специалисты дирекции.

Расчет экономической эффективности покупки сетевого оборудования Cisco на программных и физических носителях.

Задача заключается в определении инвестиций, вкладываемых на приобретение оборудования для модернизации лабораторного стенда «Моделирование протокола прикладного уровня»; определение разовых затрат на оборудова-

ние; сравнение экономической эффективности использования в лабораторном классе физического и программного оборудования.

Реализация задачи может быть выполнена следующим образом: в ходе работы высчитывается себестоимость всего оборудования на физических носителях, затем учитываются дополнительные расходы (затраты на запасные детали, монтажные работы, энергопотребление и т.д.). Далее идет подсчет по такому же плану, но с учетом программного носителя, под ПН принимается комплект персональных компьютеров на один лабораторный класс.

Для расчета физических устройств в лабораторной работе используются приборы на рисунке 4.

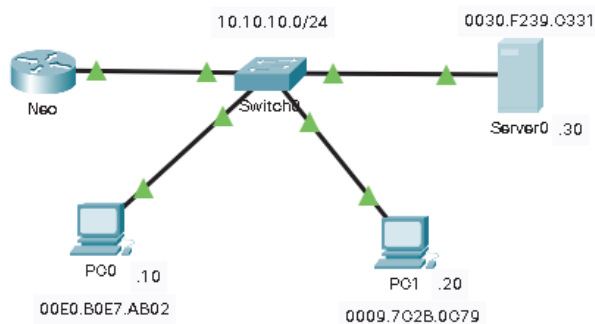


Рисунок 4 – Устройства лабораторной работы в симуляторе

Из рисунка 4 видно, что для расчета себестоимости оборудования на физических носителях необходимо закупить: 1 маршрутизатор модели 2911, 1 коммутатор модели 2960, 2 персональных компьютера, сервер Server0, а также кабели.

Стоимость одного маршрутизатора 2911: 74824 руб.

Стоимость одного коммутатора 2960: 28 504 руб.

Стоимость кабеля типа copper straight-through за одно соединение: 1 129 руб.

Стоимость одного сервера: 81 460 руб.

В лабораторной работе используются 4 кабеля CST. Следовательно, стоимость кабелей рассчитывается по формуле:

$$K = 1129 * 4 = 4 516 \text{ руб.}$$

Устройства выше предоставляются по фиксированной сумме с учетом всех экономических издержек. Для расчета персонального компьютера можно ограничиться лишь монитором, клавиатурой, компьютерной мыши, а также системным блоком. Звуковое оборудование можно убрать из комплекта, сэкономив на результате. Так же можно ограничиться маломощным системным блоком.

Стоимость одного монитора: 8 990 руб.

Стоимость одной компьютерной мыши: 290 руб.

Стоимость одной клавиатуры: 344 руб.

Стоимость кабелей: 800 руб.

Расчет стоимости полного комплекта одного персонального компьютера

$$ПК = 30714 + 8990 + 290 + 344 + 800 = 47 634 \text{ руб.}$$

Дополнительные расходы включают: расходы на запасные части, таможенные расходы, расходы за электропотребление, заготовительно-складские работы, расходы на запасные части.

Ремонтные (монтажные) работы РР составляют 5% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 1:

$$РР = 284 572 * 0,05 = 14 229 \text{ руб.} \quad (1)$$

Транспортно-заготовительные расходы ТЗР составляют 4% от стоимости и оборудования рассчитываются по формуле 2:

$$ТЗР = 284 572 * 0,04 = 11 383 \text{ руб.} \quad (2)$$

Заготовительно-складские расходы ЗСР составляют 2% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 3:

$$ЗСР = 284 572 * 0,02 = 5 691 \text{ руб.} \quad (3)$$

Расходы на запасные части РЗЧ составляют 1% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 4:

$$РЗЧ = 284 572 * 0,01 = 2 846 \text{ руб.} \quad (4)$$

Для расчета сметной стоимости оборудования необходимо суммировать расходы на закупку оборудования с дополнительными, за исключением расходов на ремонт и рассчитываются по формуле 5:

$$СС = 284 572 + 11 383 + 5 691 + 2 846 = 304 492 \text{ руб.} \quad (5)$$

Расчет общих затрат на закупку оборудования учитывает сметную стоимость оборудования и расходы на ремонтные работы и рассчитываются по формуле 6:

$$КВ = 304 492 + 14 229 = 318 721 \text{ руб.} \quad (6)$$

Далее необходимо рассчитать расходы на электроэнергию всего оборудования.

Расчет расхода на электроэнергию и рассчитывают по формуле 7:

$$Эоб = Роб * Цэ * тоб, \quad (7)$$

где Эоб это расходы на электропотребление оборудования за 60 минут, измеряется в Вт;

тоб = время работы оборудования;

Цэ – тариф на 1 кВт.час.

Допустим, в один день приходится по 4 занятия, каждый по 1.5 часа (90 минут), соответственно всего тоб = 6 часов в день. За это время происходит активная работа ПК, это значит, что он потребляет около 300 Вт/час, маршрутизатор около 40 Вт/час, коммутатор около 20 Вт/час. В Самарской области коэффициент тарифного плана составляет 8,47. Соответственно, затраты на электроэнергию лаборатории за 1 день и рассчитываются по формулам 8 и 9:

$$Роб = 4 * 6 * 300 + 40 * 6 * 4 + 20 * 6 * 5 = 8760 \text{ Вт/час,} \quad (8)$$

$$Эоб = 8760 * 8,47 * 10^{-3} * 6 = 445,18 \text{ рублей/сутки.} \quad (9)$$

За один месяц затраты на электроэнергию лаборатории рассчитываются по формуле 10:

$$Эоб \text{ в мес.} = 445,18 * 30 = 13 355 \text{ руб.} \quad (10)$$

Из расчетов видно, что расходы на закупку физического оборудования для лаборатории обойдется в 318 721 руб. с переменными расхо-

дами в 13 355 рублей/месяц. Из-за дорогостоящего оборудования Cisco маршрутизаторов и коммутаторов, а так же достаточно мощные ПК обходятся в такую немаленькую сумму. Суммарные расходы на закупку физического оборудования с учетом годового использования и рассчитываются по формуле 11:

$$CP = 318\,721 + (13\,355 \cdot 12) = 478\,981 \text{ руб.} \quad (11)$$

Теперь нужно посчитать расходы на программное оборудование лаборатории. Это второй экономически выгодный вариант подразумевает замещение физического оборудования на программное, то есть на лабораторию с преимущественно лишь ПК оборудованием. Для расчета будем иметь ввиду, что компьютерный класс для лаборатории имеет 12 мест. Тогда суммарные затраты на компьютеры рассчитываются по формуле 12:

$$ПК = 12 \cdot 47\,634 = 571\,608 \text{ руб.} \quad (12)$$

Методика расчета дополнительных затрат аналогично расчету физическому оборудованию и рассчитываются по формуле 13:

$$PP = 571\,608 \cdot 0,05 = 28\,580 \text{ руб.} \quad (13)$$

Транспортно-заготовительные расходы ТЗР составляют 4% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 14:

$$ТЗР = 571\,608 \cdot 0,04 = 22\,864 \text{ руб.} \quad (14)$$

Заготовительно-складские расходы ЗСР составляют 2% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 15:

$$ЗСР = 571\,608 \cdot 0,02 = 11\,432 \text{ руб.} \quad (15)$$

Расходы на запасные части РЗЧ составляют 1% от стоимости оборудования и рассчитываются по формуле 16:

$$РЗЧ = 571\,608 \cdot 0,01 = 5\,716 \text{ руб.} \quad (16)$$

Для расчета сметной стоимости оборудования необходимо суммировать расходы на себестоимость оборудования с дополнительными, за исключением расходов на ремонт и рассчитываются по формуле 17:

$$СС = 571\,608 + 22\,864 + 11\,432 + 5\,716 = 611\,620 \text{ руб.} \quad (17)$$

Расчет общих затрат на закупку оборудования учитывает сметную стоимость оборудования и расходы на ремонтные работы и рассчитываются по формуле 18:

$$КВ = 611\,620 + 28\,580 = 640\,201 \text{ руб.} \quad (18)$$

Расчет затрат на электроэнергию оборудования за 1 сутки и рассчитываются по формулам 19 и 20:

$$Роб = 12 \cdot 300 \cdot 6 = 21\,600 \text{ Вт/час;} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Сэл.об.} &= 7\,560 \cdot 4,5 \cdot 8,47 \cdot 10^{-3} = \\ &= 288,15 \text{ рублей/сутки.} \end{aligned} \quad (20)$$

Из расчетов видно, что расходы на закупку программного оборудования для лаборатории обойдется в 640 201 руб. с переменными расходами в 16 796 рублей/месяц. Суммарные расходы на энергопотребление в год и инвестиционные затраты и рассчитываются по формуле 21:

$$CP = 640\,201 + (16\,796 \cdot 12) = 841\,793. \quad (21)$$

На рисунке 5 показан график инвестиций в 2 вида закупок.

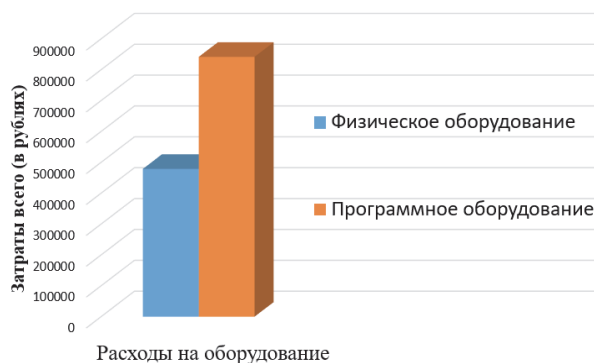


Рисунок 5 – Диаграмма расходов себестоимости оборудования

Исходя из вышеуказанных расчетов, можно привести оценку двух методик проведения закупки оборудования.

На рисунке 5 показан график сравнения затрат на энергопотребление за 12 месяцев при использовании чисто компьютерного класса (программное оборудование), или физического.

Исходя из рисунка 5 можно сделать вывод: затраты на энергопотребление в год программное оборудование тратит меньше, чем физическое. Это связано с большой выделительной мощностью ПК и их количеством. Для повышения экономической эффективности следует уменьшить мощность ПК, что уменьшит затраты на электричество.

Итог: расчет экономической эффективности использования программного и физического оборудования, необходимого для лаборатории и введения лабораторных работ показал, что при выборе типа закупки физического оборудования экономическая эффективность будет больше в связи с меньшими затратами по сравнению с программным оборудованием, так $FO < PO = 478981 < 841793$. Хотя для изучения и самой сути обучения лучше изучать технику вживую, экономически выгодно изучать лабораторную работу на ПК, используя средства виртуальной симуляции пакет телекоммуникационных сетей Cisco Packet Tracer.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведен анализ основных принципов построения инфокоммуникационных систем, подробно рассмотрена классификация сетей передачи информации. На базе этого можно сделать вывод, что настройка сетевого оборудования, знание общих сведений о построении рабочих сетей является актуальным на сегодняшний день.

По итогу, на основе предлагаемого инновационного развития учебно-лабораторного

комплекса СамГУПС обучающиеся имеют возможность приобретения знаний в области современных информационно-телекоммуникационных систем, основ пакетной коммутации и сетевых технологий. Это обеспечивает должный уровень развития их профессиональных компетенций, позволяет им спокойно ориентироваться в системе обеспечения защищенности от угроз конфиденциальности компьютерных сетей, а также функционировании сетевой инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарычева, С.А. Разработка комплекса лабораторных работ по технологиям компьютерных сетей для изучения передачи пакетной коммутации / С. А. Сарычева, А. О. Кочетова, А. Е. Тарасова // Дни студенческой науки: Сборник материалов 49-й научной конференции обучающихся СамГУПС, Самара, 05-16 апреля 2022 года. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2022. – 166 с.
2. Кочетова, А.О. Рассмотрение цепей с взаимной индуктивностью / А. О. Кочетова, С. А. Сарычева // Научная статья года 2022: Сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 мая 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 17-21. – EDN QRCNEU.
3. Чистяков, М.С. Цифровая экономика как катализатор постиндустриального информационного развития / М.С. Чистяков // Общество, культура, человек в цифровую эпоху: Медиаэкономика, медиаполитика, медиакультура: сборник научных статей / под ред. О. В. Архиповой и А. И. Климина; Ассоциация «НИЦ «Пересвет». – Санкт-Петербург: Форапринт, 2020. – С. 7-12.
4. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации: Учебник / Н.Н. Васин. – М.: ИНТУИТ. 2017. – 408 с.
5. Надежкин, В.А. К вопросу использования возможностей системы АПК-ДК при проведении технического обслуживания устройств ЖАТ / В.А. Надежкин, К.А. Грядкина, С.Н. Походай // Образование - Наука - Производство: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 декабря 2020 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский университет путей сообщения», 2020. – С. 165-169. – EDN SKAANJ.
6. Мунистер, В.Д. Управление информационными процессами информационно-аналитической системы с применением граничных вычислений / Мунистер, В.Д., Золкин, А.Л., Тормозов, В.С., Стригин, Б.С. // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2022. – № 2. – С. 31-42.
7. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации: Учебник / Н.Н. Васин. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 284 с.
8. Yumashev, A., Koneva, E., Borodina, M., Lipson, D., Nedosugova, A. (2019). Electronic apps in assessing risk and monitoring of patients with arterial hypertension. La Prensa Medica Argentina, 105(4): 235-245.
9. Кораблев, А.В. Современный подход к формированию информационного обеспечения системы управления предприятием / А.В. Кораблев, М.В. Петрушова, А.Л. Золкин, Ю.В. Скибин // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 10-1. – С. 41-46.
10. Васин Н.Н. Основы построения сетей пакетной коммутации [Электронный ресурс]. Учебное пособие. М.: ИНТУИТ <https://intuit.ru/studies/courses/3645/887/info> (Дата обращения: 21.11.2022).
11. Надежкин, В.А. Анализ новых систем интервального регулирования движения поездов / В. А. Надежкин, А. С. Хохрин, В. Б. Тепляков // Образование - Наука - Производство : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 декабря 2020 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Иркутский университет путей сообщения», 2020. – С. 169-173.

INNOVATIVE DEVELOPMENT OF UNIVERSITY EDUCATIONAL AND LABORATORY FACILITIES FOR WORKING WITH MODERN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF DIGITAL ECONOMY

© 2023 S.A. Sarycheva¹, V.A. Nadezhkin¹, A.L. Zolkin²

¹Samara State Transport University

²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
Samara, Russia

The article discusses the main trends in the development of the socio-economic life of people associated with the active introduction and improvement of the digital economy. The positive aspects of the developed Concept for the development of the material and technical base of the Samara State University of Railway Transport in the specialty "Telecommunication systems and networks of railway transport" are considered.

Keywords: information transmission systems, network stability, telecommunication systems, digital economy, switching systems, laboratory equipment, basic characteristics of routers, device configuration, information data transmission.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-83-91

REFERENCES

1. *Sarycheva, S.A.* Razrabotka kompleksa laboratornykh rabot po tekhnologiyam komp'yuternykh setey dlya izucheniya peredachi paketnoy kommutatsii / S. A. Sarycheva, A. O. Kochetova, A. E. Tarasova // Dni studencheskoy nauki: Sbornik materialov 49-y nauchnoy konferentsii obuchayushchikhsya SamGUPS, Samara, 05-16 aprelya 2022 goda. – Samara: Samarskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2022. – 166 p.
2. *Kochetova, A.O.* Rassmotreniye tsepey s vzaimnoy induktivnost'yu / A. O. Kochetova, S. A. Sarycheva // Nauchnaya stat'ya goda 2022: Sbornik statey II Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa, Penza, 30 maya 2022 goda. – Penza: Nauka i Prosveshcheniye (IP Gulyayev G.Yu.), 2022. – p. 17-21. – EDN QRCNEU.
3. *Chistyakov, M.S.* Tsifrovaya ekonomika kak katalizator postindustrial'nogo informatsionnogo razvitiya / M.S. Chistyakov // Obshchestvo, kul'tura, chelovek v tsifrovuyu epokhu: Mediaekonomika, mediapolitika, mediakul'tura: sbornik nauchnykh statey / pod red. O. V. Arkhipovoy i A. I. Klimina; Assotsiatsiya «NITS «Peresvet». – Sankt-Peterburg: Foraprint, 2020. – P. 7-12.
4. *Vasin, N.N.* Tekhnologii paketnoy kommutatsii: Uchebnik / N.N. Vasin. – Moscow: INTUIT. 2017. – 408 p.
5. *Nadezhkin, V.A.* K voprosu ispol'zovaniya vozmozhnostey sistemy APK-DK pri provedenii tekhnicheskogo obsluzhivaniya ustroystv ZHAT / V. A. Nadezhkin, K. A. Gryadkina, S. N. Pokhoday // Obrazovaniye - Nauka - Proizvodstvo: Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Chita, 24 dekabrya 2020 goda. – Chita: Zabaykal'skiy institut zheleznodo-rozhnogo transporta - filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego profesional'nogo obrazovaniya "Irkutskiy universitet putey soobshcheniya", 2020. – P. 165-169. – EDN SKAANJ.
6. *Munister, V.D.* Upravleniye informatsionnymi protsessami informatsionno-analiticheskoy sistemy s primeneniye granichnykh vychisleniy / V.D. Munister, A.L. Zolkin, V.S. Tormozov, B.S. Strigin, // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnyye sistemy: modeli, analiz i upravleniye. – 2022. – № 2. – P. 31-42.
7. *Vasin N.N.* Packet switching technologies: Textbook / N.N. Vasin. – St. Petersburg: Lan, 2019. – 284 p.
8. *Yumashev, A., Koneva, E., Borodina, M., Lipson, D., Nedosugova, A.* (2019). Electronic apps in assessing risk and monitoring of patients with arterial hypertension. *La Prensa Medica Argentina*, 105(4): 235-245.
9. *Korablev, A.V., Petrushova, M.V., Zolkin, A.L., Skibin, Yu.V.* Sovremennyy podkhod k formirovaniyu informatsionnogo obespecheniya sistemy upravleniya predpriyatiem / A.V. Korablev, M.V. Petrushova, A.L. Zolkin, Yu.V. Skibin // Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava. – 2021. – № 10-1. – P. 41-46.

10. *Vasin, N.N.* Osnovy postroyeniya setey paketnoy kommutatsii [Elektronnyy resurs]. Uchebnoye posobiye / N.N. Vasin. – Moscow: INTUIT <https://intuit.ru/studies/courses/3645/887/info> (Data obrashcheniya: 21.11.2022).
11. *Nadezhkin, V.A.* Analiz novykh sistem interval'nogo regulirovaniya dvizheniya poyezdov/V.A.Nadezhkin, A. S. Khokhrin, V. B. Teplyakov // *Obrazovaniye - Nauka - Proizvodstvo : Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Chita, 24 dekabrya 2020 goda. – Chita: Zabaykal'skiy institut zheleznodorozhnogo transporta - filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhethnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Irkutskiy universitet putey soobshcheniya", 2020. – P. 169-173.*

Snezhana Sarycheva, Technician of the Department "Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport". E-mail: snezhana.sarycheva.97@mail.ru
Vadim A. Nadezhkin, Lecturer of the Department "Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport". E-mail: vadim_nadezhkin@mail.ru
Alexander L. Zolkin, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science and Computer Engineering. E-mail: alzolkin@list.ru

УДК 656.254

К ВОПРОСУ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В СФЕРЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

© 2023 А.О. Кочетова¹, В.А. Надежкин¹, А.Л. Золкин²

¹Самарский государственный университет путей сообщения

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 25.12.2022

Эффективность работы железнодорожного транспорта напрямую связана с обновлением инфраструктуры, в том числе устройств связи, отвечающих за обеспечение безопасного перевозочного процесса. Для безотказного функционирования железнодорожного комплекса необходимо внедрять новейшие разработки в области сетевых технологий. Для достижения такой цели следует автоматизировать соответствующие процессы систем обеспечения движения поездов. Однако, это возможно при работе в железнодорожном комплексе специалистов высшего уровня квалификации, практические и профессиональные навыки которых приобретаются в высших учебных заведениях. Поэтому в работе рассматриваются такие аспекты, как необходимость в новейших разработках на основе сетевых технологий, потребность в специалистах в области пакетной коммутации, а также особенности воспитания обучающихся в качестве специалистов в сфере телекоммуникаций.

Ключевые слова: телекоммуникационные системы, железнодорожный транспорт, информационные технологии, транспортная система, сетевые технологии, безопасность движения поездов, модернизация систем связи, железнодорожная инфраструктура, коммутация пакетов, технология коммутации каналов.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-92-98

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является главной транспортной системой, которая отвечает за безопасность движения поездов, качественное обслуживание пассажиров, перевозку грузов на разные расстояния [1].

Эффективная деятельность холдинга ОАО «РЖД» зависит от реализации и внедрения новых разработок в инфраструктуру железнодорожного комплекса, а также оборудование связи, являющимся приоритетной технологией в обеспечении безопасной системы движения поездов [2]. Обеспечение безопасности движения поездных составов содержит в себе совокупность технических и организационных методов, которые направлены на уменьшение уровня вероятности появления внештатных ситуаций, таких как угроза здоровью пассажиров, повреждение перевозимых товаров и подвижного состава. Одним из главных

критериев для эффективного управления перевозочным процессом является надёжность оборудования связи.

Сетевые технологии – программно-аппаратные средства, которые поддерживают работоспособную сеть при минимальном наборе стандартных протоколов. Сетевые технологии позволяют повысить эффективность применения поездного состава и производительность трудовой деятельности сотрудников железнодорожного комплекса при минимальных затратах [3].

История вопроса. Важность применения сетевых технологий в холдинге ОАО «Российские Железные Дороги» обуславливается масштабной протяжённостью территорий, обеспечивающих перевозочный процесс, в которых необходимо обеспечивать взаимодействие со всеми типами транспорта, а также с соответствующими государственными организациями [4]. Для обеспечения взаимодействия необходимо применение технологии оперативной передачи информации, быстрого обмена данными, совместного использования соответствующих ресурсов. Кроме того, сетевые технологии позволяют оперативно принимать технические и организационные решения в области управления железнодорожным комплексом, от уровня линейных структурных подразделений до сетевых задач. Таким образом, развитие сетевых технологий

Кочетова Алена Олеговна, техник кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». E-mail: alyona_kochetova@mail.ru

Надежкин Вадим Александрович, преподаватель кафедры, «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте». E-mail: vadim_nadezhkin@mail.ru

Золкин Александр Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и вычислительная техника». E-mail: alzolkin@list.ru

является одной из главных задач в железнодорожном комплексе [5].

В настоящее время стратегия развития железнодорожного комплекса заключается в применении систем радиосвязи. В проектах, которые направлены на развитие ОАО «РЖД», а именно соответствующих станций и участков железнодорожного комплекса, рассматривается применение проектных идей с целью модернизации систем радиосвязи.

Основными задачами реализации и внедрения систем радиосвязи являются:

- формирование общенациональной беспроводной технологической сети с широкой полосой пропускаемых частот, учитывая стратегическую значимость комплекса железных дорог для развития страны;
- реализация и внедрение современных технологий управления в холдинге ОАО «Российские Железные Дороги»;
- развитие высокоскоростных железных дорог;
- внедрение проекта «цифровая железная дорога».

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модернизация сетевых технологий обуславливается развитием телекоммуникационных сетей и вычислительного оборудования. Сетевые технологии позволяют передавать необходимые данные на большие расстояния, благодаря кодированию и мультиплексированию информации.

Пакетная коммутация передаёт необходимую информацию путем передачи данных в небольших пакетах. Данные пакеты передаются по различным маршрутам [6]. Главной целью маршрутизации трафика является определение наиболее оптимального маршрута и оперативной доставки данных. Кроме того, маршрутизация трафика даёт возможность передавать объем данных с различной скоростью, в виде последовательной передачи пакетов по сети, распределяющей данные с применением динамического распределения и статического мультиплексирования. При передаче данных через оборудование сети, таких как маршрутизатор и коммутатор, пакеты с необходимой информацией принимаются, отправляются в буфер и ожидают повторной передачи, которая приводит к переменным задержкам в соответствии с пропускной способностью сети и нагрузки трафика в канале. В обычном режиме пакеты пересылаются асинхронно через промежуточные сетевые узлы с применением буфера [7,17].

Пакетная коммутация выделяет соответствующую полосу частот пропускания в зависимости от вида связи, который имеет определённую скорость и задержку между сетевыми

узлами. К примеру, при применении услуг содовой связи, коммутация необходимых каналов определяется оплатой за единицу времени соединения [8,9]. Однако, коммутация пакетов обуславливается оплатой за единицу передаваемых данных, таких как символы, сообщения.

Пакетная коммутация является способом решения задач передачи информации в различных сетевых технологиях [10]. Совокупность решений обобщенной задачи передачи необходимой информации включает в себя частные задачи сетей.

Примеры частных задач передачи данных:

- распознавание совокупности данных и передача информации между интерфейсами соответствующего устройства;
- определение потоков информации и выделение оптимальных маршрутных путей;
- фиксирование маршрута в показателях конфигурации и таблиц соответствующих устройств;
- мультиплексирование и демultipлексирование сетевых потоков [11].

Метод коммутации соответствующих каналов направлен на снижение количества случайных происшествий в сети [12]. Именно по этой причине обмен необходимой информации формируется до начала процесса передачи данных. На первом этапе происходит проверка доступности соответствующих каналов от отправителя до получателя по заданному адресу.

В пакетной коммутации одной из главных характеристик является указание адреса в пакетах, поскольку каждый отдельный пакет проходит обработку коммутатором в независимости от остальных пакетов, которые составляют сетевой трафик [13].

Все вышесказанное приводит к тому, что востребованность сетевых технологий возрастает с каждым днем. Именно поэтому важно формировать кадры с целью повышения качества специалистов в области телекоммуникации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполним расчет себестоимости оборудования и программного обеспечения для развития профессиональных компетенций обучающегося в сфере сетевых технологий.

Для обучения студента основам пакетной коммутации необходимо учитывать множество факторов. С целью изучения работы сетевых устройств важно отталкиваться от нужных расходов на закупку оборудования, в них входят:

- затраты на необходимое оборудование;
- затраты на транспортные расходы;
- затраты на установку и монтаж необходимого оборудования;

- затраты на оплату труда сетевого системного администратора;
- затраты на электроэнергию.

Для начала необходимо произвести расчет затрат на сетевое оборудование, поскольку именно с него начинается знакомство студента с базовыми настройками и принципами работы устройств.

Проведем расчет затрат на оборудование. Пересылку необходимо осуществить между четырьмя виртуальными локальными сетями. В каждую виртуальную локальную сеть входит по одному или два компьютера. Необходимо использование 4 коммутаторов и 4 маршрутизаторов. Расчет затрат на оборудование производится по формуле:

$$C_{об} = N_K \cdot S_K + N_M \cdot S_M + N_{ПК} \cdot S_{ПК}, \quad (1)$$

где $N_{ПК}$, N_K , N_M – необходимое количество компьютеров, коммутаторов, маршрутизаторов соответственно;

$S_{ПК}$, S_K , S_M – средняя стоимость компьютеров, коммутаторов, маршрутизаторов соответственно.

Подставив найденные значения в выражение (1), получаем:

$$C_{об} = 6 \cdot 25000 + 4 \cdot 228579 + 4 \cdot 42548 = 150000 + 914316 + 170192 = 1234508 \text{ рублей.}$$

На основе изучения особенностей современного рынка была получена таблица 1 для наглядного представления финансового расчета стоимости оборудования.

Рассчитаем дополнительные затраты, такие как монтажные работы ($C_{уст}$), транспортные расходы ($C_{тр}$).

Капитальные вложения определяются по формуле:

$$K = C_{об} + C_{уст} + C_{тр}, \quad (2)$$

где K – капиталовложения;

$C_{об}$ – затраты на оборудование;

$C_{тр}$ – затраты на транспортные расходы;
 $C_{уст}$ – затраты на установку и монтаж оборудования.

Транспортные расходы рассчитываются в размере 3% от рыночной стоимости оборудования, таким образом, транспортные расходы рассчитываются по формуле:

$$C_{тр} = 3\% \cdot C_{об}, \quad (3)$$

Подставив значения в выражение 3, получаем:

$$C_{тр} = 3\% \cdot 1234 \cdot 508 = 37036 \text{ рублей.}$$

Затраты на установку и монтаж оборудования рассчитываются в размере 5% от рыночной стоимости оборудования:

$$C_{уст} = 5\% \cdot C_{об}, \quad (4)$$

Подставив значения в выражение 4, получим:

$$C_{уст} = 5\% \cdot 1234 \cdot 508 = 61726 \text{ рублей.}$$

Таким образом, капитальные вложения, согласно формуле 2, составляют:

$$K = 1234508 + 37036 + 61726 = 1333270 \text{ рублей.}$$

Необходимо учесть затраты на оплату труда сетевого системного администратора.

Фонд заработной платы рассчитывается по формуле:

$$\Phi_{зн} = H_{пл} \cdot Ч \cdot З_{пл}, \quad (5)$$

где $H_{пл}$ – количество месяцев в планируемом периоде;

$Ч$ – количество работников;

$З_{пл}$ – заработная плата одного работника.

Согласно бирже труда, средняя заработная плата системного администратора составляет 25 000 рублей.

Подставив значения в выражение (5), получим:

$$\Phi_{зн} = 12 \cdot 1 \cdot 25000 = 300000 \text{ рублей.}$$

Рассчитаем так же премиальные выплаты работнику ($П_p$), страховые взносы ($СВ$), амортизационные отчисления ($АО$), непредвиденные расходы ($НР$).

Премия для работника составляет 20% от месячной заработной платы:

Таблица 1 – Финансовый расчет стоимости оборудования

Наименование оборудования	Количество	Сметная стоимость, рублей	
		За единицу товара	Общая
Персональный компьютер	6	25 000	150 000
Коммутатор Cisco WS-C2960X-24PD-L	4	228 579	914 316
Маршрутизатор CISCO 2911 модульный LAN	4	42 548	170 192
Итого:	14	296 127	1 234 508

$$P_p = 25000 \cdot 20\% = 5000 \text{ рублей.}$$

Страховые взносы в размере 30,2% от фонда оплаты труда:

$$CB = 30,2\% \cdot 300000 = 90600 \text{ рублей.}$$

Расходы на амортизационные отчисления (АО) принимаем равными 3,6% от рыночной стоимости оборудования:

$$AO = 1234508 \cdot 3,6\% = 44442,288 \text{ рублей.}$$

Рассчитаем затраты на непредвиденные расходы (принимаются равными 3% от стоимости оборудования):

$$HP = 1234508 \cdot 3\% = 37035,24 \text{ рублей.}$$

Определим расходы на электроэнергию, потребляемую лабораторным оборудованием:

$$C_{\text{л}} = (C \cdot P_{\text{об}} \cdot T \cdot \Phi_{\text{э}}) / 1000, \quad (6)$$

где C – стоимость электроэнергии 1 кВт·час;

$P_{\text{об}}$ – потребляемая мощность оборудования в час, Вт;

T – время работы в сутки, час;

$\Phi_{\text{э}}$ – годовой фонд энергии, сутки.

Тарифный план электроэнергии на территории города Самара составляет 8,74 руб./кВт·час. Средняя мощность одного компьютера приблизительно 420 Вт/час, маршрутизатор потребляет примерно 35 Вт/час, а мощность коммутатора составляет 250 Вт/час.

Подставив значения в выражение (6), получим:

$$C_{\text{л}} = 8,74 \cdot 365 \cdot 24 \cdot (6 \cdot 420 + 4 \cdot 250 + 4 \cdot 35) / 1000 = 280218,384 \text{ рублей.}$$

Эксплуатационные расходы составляют:

$$C = 300000 + 90600 + 44442 + 37035 + 280218 = 752295 \text{ рублей.}$$

Для того, чтобы оценить экономический эффект от внедрения сетевого оборудования в образовательный процесс необходимо рассчитать минимум приведенных затрат. Данный параметр рассчитывается по формуле:

$$P_p = C + E_n \cdot K, \quad (7)$$

где K – капиталовложения;

C – эксплуатационные расходы;

E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (принимается равным 0,15).

Подставив значения в формулу 1.7, получим:

$$P_p = 0,15 \cdot 1333270 + 752295 = 199990 + 752295 = 952285 \text{ рублей.}$$

Таким образом, для внедрения сетевого оборудования в образовательный процесс с целью развития профессиональных компетенций обучающегося в качестве специалиста в области сетевых технологий в реальных условиях необходимо потратить 952 285 рублей. Стоимость оборудования слишком высока, поэтому, чтобы

снизить эти затраты, нужно проводить занятия в программе Packet Tracer. Это наиболее практично и удобно, к тому же, каждый студент сможет попробовать ознакомиться с работой любого оборудования, а именно изменить состояние сети, количество устройств, их вид и, конечно же, количество устройств, которые нужны для использования в лабораторных работах.

Важно рассмотреть ситуацию, в которой разработка лабораторной работы будет производиться посредством программы – Cisco Packet Tracer.

Для выполнения этой задачи, необходимо рассчитать:

- затраты на электроэнергию;
- затраты на оплату труда работника.

Тарифный план электроэнергии на территории города Самара составляет 8,74 руб./кВт·час. Средняя мощность одного компьютера приблизительно 420 Вт/час.

Подставив значения в выражение (6), получим:

$$C_{\text{л}} = 8,74 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 1 \cdot 400 / 100 = 30624,96 \text{ рублей.}$$

Согласно бирже труда, средняя заработная плата системного администратора составляет 25 000 рублей.

Подставив значения в выражение 5, получим:

$$\Phi_{\text{зн}} = 12 \cdot 1 \cdot 25000 = 300000 \text{ рублей.}$$

Рассчитаем так же премиальные выплаты работнику (P_p), страховые взносы (CB).

Премия для работника составляет 20% от месячной заработной платы:

$$P_p = 25000 \cdot 20\% = 5000 \text{ рублей.}$$

Страховые взносы в размере 30,2% от фонда оплаты труда:

$$CB = 30,2\% \cdot 300000 = 90600 \text{ рублей.}$$

К указанным выше расчетам мы добавляем стоимость компьютера, с которого проводится вся работа, цена самого дешевого компьютера составляет 25 000 р. Операционная система Windows 10, цена активации которой составляет 15 000 р, тоже принимается во внимание.

Программа Packet Tracer оказалась бесплатной, поэтому расходов на нее не предвидится.

Итого считаем все вышеуказанные суммы:

$$P_{\text{д}} = 30624 + 300000 + 5000 + 90600 + 15000 + 25000 = 466224 \text{ рубля.}$$

После проведения расчетов, можно увидеть, что работа с применением виртуальных технологий обойдется выгоднее, также работа в программе Packet Tracer будет более эффективна в плане обучения, чем работа на оборудовании.

ВЫВОДЫ

Железнодорожный транспорт является основной транспортной системы страны, поскольку

ку железнодорожная сеть востребована для большинства людей, а также компаний в плане доступности и скорости перевозки грузов и пассажиров из одного места в другое на различные расстояния. Современные экономические требования и ограниченность в ресурсах для осуществления масштабных задач в области железнодорожного транспорта приводят к необходимости использования сетевых технологий.

Современное развитие телекоммуникаций и компьютерных технологий позволяет передавать информацию на большие расстояния с высокой надежностью [14,15,16]. А надежность средств связи, в свою очередь, является важным критерием автоматизации и эффективного управления транспортным процессом.

С целью повышения эффективности управления транспортными потоками, увеличения уровня защиты среды передачи данных на железнодорожном транспорте не менее важно развитие профессиональных компетенций в области сетевых технологий. Необходимо внедрение телекоммуникационных оборудований в образовательный процесс для формирования специалистов в области пакетной коммутации.

Таким образом, на основе расчета себестоимости оборудования и программного обеспечения для развития профессиональных компетенций обучающегося в сфере сетевых технологий, и подведения итогов о востребованности специалистов в работе железнодорожного транспорта, приходим к выводу, что процесс модернизации образовательного процесса необходим. Студентам важно знать базовые настройки сети пакетной коммутации, уметь находить ошибки в построении сети, устранять неполадки. Для этого нужно внедрение сетевых устройств, а также установка программных эмуляторов сети для формирования профессиональных навыков в области телекоммуникации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарычева, С.А. Особенности обеспечения экономической безопасности железнодорожного транспорта / С.А. Сарычева, В.А. Надежкин // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы XII Международной научно-практической конференции, посвященной 160-летию Белорусской железной дороги. В 2-х частях, Гомель, 24–25 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.И. Кулаженко. – Гомель: Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2022. – С. 348-350. – EDN QIRBUB.
2. Надежкин, В.А. К вопросу инновационных технологий интервального регулирования движения поездов на примере системы управления движением на Московском Центральном кольце / В.А. Надежкин, С.А. Сарычева // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2022. – Т. 1. – С. 133-136. – EDN QNQTTH.
3. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации: Учебник / Н.Н. Васин – М.: ИНТУИТ, 2017. – 408 с.
4. Сарычева, С.А. Особенности Европейской системы управления железнодорожным движением (ERTMS) в развитии инновационной инфраструктуры / С.А. Сарычева, В.А. Надежкин, А.О. Кочетова // Тенденции развития логистики и управления цепями поставок : Сборник статей III Международной научно-практической конференции, Казань, 21–24 сентября 2022 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022.
5. Сарычева, С.А. Разработка комплекса лабораторных работ по технологиям компьютерных сетей для изучения передачи пакетной информации / С.А. Сарычева, А.О. Кочетова, А.Е. Тарасова // Дни студенческой науки: Сборник материалов 49-й научной конференции обучающихся СамГУПС, Самара, 05–16 апреля 2022 года. – Самара: Самарский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 141-145.
6. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации: Учебник / Н.Н. Васин. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 284 с.
7. Васин, Н.Н. Основы построения сетей пакетной коммутации [Электронный ресурс]. Учебное пособие / Н.Н. Васин. – М.: ИНТУИТ <https://intuit.ru/studies/courses/3645/887/info>
8. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер – СПб: Издательство «Питер», 2011. – 944 с.
9. Назаров, А.Н. АТМ: технические решения создания сетей / А.Н. Назаров, И.А. Разживин, М.В. Симонов – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 216 с.
10. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации: Часть 2. Маршрутизация и коммутация: Учебное пособие. – Самара: ПГУТИ, 2015. – 261 с.
11. Васин, Н.Н. Технологии пакетной коммутации [Электронный ресурс]: учебное пособие. Ч. 2. Маршрутизация и коммутация / Н. Н. Васин; ПГУТИ, Каф. СС. - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2,8 Мб). – Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2015. – Загл. с титул. экрана. - Электрон. версия печ. издания 2015 г.
12. Нейман В.И. Новое поколение систем коммутации / В.И. Нейман// Электросвязь. – №1. – 2001. – С. 32-34.
13. Васин, Н.Н. Основы сетевых технологий на базе коммутаторов и маршрутизаторов / Н.Н. Васин. – Москва: Машиностроение, 2017. – 272 с.
14. Чистяков, М.С. Цифровая экономика как катализатор постиндустриального информационного развития / М.С. Чистяков // Общество, культура, человек в цифровую эпоху: Медиаэкономика, медиаполитика, медиакультура: сборник научных статей / под ред. О. В. Архиповой и А. И. Климина; Ассоциация «НИЦ «Пересвет». – Санкт-Петербург: Форапринт, 2020. – С. 7-12.
15. Мунистер, В.Д. Управление информационными процессами информационно-аналитической системы с применением граничных вычислений / В.Д. Мунистер, А.Л. Золкин, В.С. Тормозов, Б.С. Стригин // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2022. – № 2. – С.31-42.
16. Кораблев, А.В. Современный подход к формированию информационного обеспечения системы управления предприятием / А.В. Кораблев //

Вестник Алтайской академии экономики и права.
– 2021. – № 10-1. – С. 41-46.

17. *Delfani F., Samanipour H., Beiki H., Yumashev A., Akhmetshin E.M.* A robust fuzzy optimisation for a

multi-objective pharmaceutical supply chain network design problem considering reliability and delivery time // *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics.* 2022; 9(2): 155-179.

TO THE ISSUE OF TRAINING OF SPECIALISTS IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES IN THE RAILWAY TRANSPORT

© 2023 A. O. Kochetova¹, V.A. Nadezhkin¹, A.L. Zolkin²

¹Samara State Transport University

²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
Samara, Russia

The efficiency of railway transport is directly related to the renewal of infrastructure, including communication devices responsible for ensuring a safe transportation process. For reliable operation of the railway complex, it is necessary to introduce the latest developments in the field of network technologies. To achieve such a goal, the relevant processes of train traffic systems should be automated. However, this is possible when working in the railway complex of specialists of the highest level of qualifications, the practical and professional skills of which are acquired in higher educational institutions. Therefore, the work considers such aspects as the need for the latest developments based on network technologies, the need for specialists in the field of packet switching, as well as the peculiarities of educating students as specialists in the field of telecommunications.

Keywords: telecommunication systems, railway transport, information technologies, transport system, network technologies, train traffic safety, communication systems modernization, railway infrastructure, packet switching, channel switching technology.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-92-98

REFERENCES

1. *Sarycheva, S.A.* Features of ensuring the economic security of railway transport/ *S.A. Sarycheva, V.A. Nadezhkin*// *Transport safety problems: Materials of the XII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 160th anniversary of the Belarusian Railway.* In 2 parts, Gomel, November 24-25, 2022/ Under the general editorship of Yu.I. Kulazhenko. – Gomel: Educational institution «Belarusian State University of Transport,» 2022. – P. 348-350. – EDN QIRBUB.
2. *Nadezhkin, V.A.* On the issue of innovative technologies for interval regulation of train traffic using the example of the traffic control system on the Moscow Central Ring /*V.A. Nadezhkin, S.A. Sarycheva*// *Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the 21st century.* – 2022. – V. 1. – P. 133-136. – EDN QNQTTH.
3. *Vasin, N.N.* Packet switching technologies: Textbook / *N.N. Vasin.* – Moscow: INTUIT, 2017. – 408 p.
4. *Sarycheva, S.A.* Features of the European Railway Traffic Management System (ERTMS) in the development of innovation infrastructure/ *S.A. Sarycheva, V.A. Nadezhkin, A.O. Kochetova*// *Trends in the development of logistics and supply chain management: Collection of articles of the III International Scientific and Practical Conference, Kazan, September 21-24, 2022.* – Kursk: University Book CJSC, 2022.
5. *Sarycheva, S.A.* Development of a set of laboratory works on computer network technologies for studying the transmission of packet information/ *S.A. Sarycheva, A.O. Kochetova, A.E. Tarasova*// *Days of student science: Collection of materials of the 49th scientific conference of students SamGUPS, Samara, April 05-16, 2022.* – Samara: Samara State University of Railways, 2022. – p. 141-145.
6. *Vasin, N.N.* Packet switching technologies: Textbook / *N.N. Vasin.* – St. Petersburg.: Lan, 2019. – 284 p.
7. *Vasin, N.N.* Basics of packet switching networks construction [Electronic resource]. Tutorial / *N.N. Vasin.* – Moscow: INTUIT <https://intuit.ru/studies/courses/3645/887/info>.
8. *Olifer V.G.* Computer networks. Principles, technologies, protocols / *V.G. Olifer, N.A. Olifer*– St. Petersburg: Peter Publishing House, 2011. – 944 p.
9. *Nazarov, A.N.* ATM: technical solutions for creating networks / *A.N. Nazarov.* – Moscow: Hotline – Telecom, 2001. – 216 s.
10. *Vasin, N.N.* Packet switching technologies: Part 2. Routing and Switching: Tutorial / *N.N. Vasin.* – Samara: PGUTI, 2015. – 261 p.
11. *Vasin, N.N.* Packet switching technologies [Electronic resource]: tutorial. PART 2. Routing and Switching/ *N.N. Vasin; PGUTI, Kaf. SS.* – Electron. text data. (1 file: 2.8 MB). – Samara: INUL PGUTI, 2015. – The log. with the title. screen. – Electron. version of the pech. 2015 editions.
12. *Neiman V.I.* New generation of switching systems / *V.I. Neiman* // *Telecommunication.* – №1. – 2001. – P. 32-34.
13. *Vasin N.N.* Basics of network technologies based on switches and routers/ *N.N. Vasin.* – Moscow: «Engineering», 2017. – 272 p.
14. *Chistyakov, M.S.* Tsifrovaya ekonomika kak katalizator postindustrial'nogo informatsionnogo

- razvitiya / M.S. Chistyakov// Obshchestvo, kul'tura, chelovek v tsifrovuyu epokhu: Mediaekonomika, mediapolitika, mediakul'tura: sbornik nauchnykh statey / pod red. O.V. Arkhipovoy and A.I. Klimina; Assotsiatsiya «NITS «Peresvet». – Sankt-Peterburg: Foraprint, 2020. – P. 7-12.
15. Munster, V.D. Upravleniye informatsionnymi protsessami informatsionno-analiticheskoy sistemy s primeneniym granichnykh vychisleniy / V.D. Munster, A.L. Zolkin, V.S. Tormozov, B.S. Strigin // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya: Slozhnyye sistemy: modeli, analiz i upravleniye. 2022. № 2. P. 31-42.
16. Korablev, A.V. Sovremennyy podkhod k formirovaniyu informatsionnogo obespecheniya sistemy upravleniya predpriyatiyem / A.V. Korablev, M.V. Petrushova, A.L. Zolkin, Yu.V. Skibin // Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava. – 2021. – № 10-1. – P. 41-46.
17. Delfani F., Samanipour H., Beiki H., Yumashev A., Akhmetshin E.M. A robust fuzzy optimisation for a multi-objective pharmaceutical supply chain network design problem considering reliability and delivery time // International Journal of Systems Science: Operations and Logistics. 2022; 9(2): 155-179.

Alyona Kochetova, Technician of the Department "Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport". E-mail: alyona_kochetova@mail.ru

Vadim A. Nadezhkin, Lecturer of the Department "Automation, Telemechanics and Communication on Railway Transport". E-mail: vadim_nadezhkin@mail.ru

Alexander L. Zolkin, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Department of Computer Science and Computer Engineering. E-mail: alzolkin@list.ru

**ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТОЛЕТНОГО
ТУРБОВАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

© 2023 В.П. Кажаяев, Д.Ю. Киселев, Ю.В. Киселев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 14.02.2023

В статье представлена качественная оценка влияния на характеристики узлов появления неисправностей в проточной части авиационных ГТД, которые приводят к изменениям ее геометрии. На примере компрессора показано, что при появлении в нем дефектов происходит деформация двух его характеристик: КПД и напорной характеристики (что подтверждается значительным количеством исследований). Сделан вывод, что для достоверного диагностирования авиационных ГТД по термогазодинамическим параметрам математическая модель должна учитывать изменение двух характеристик для каждого узла проточной части (а не только изменение характеристик КПД узлов). Представлена линейная математическая модель вертолетного турбовального ГТД и приводятся результаты расчета коэффициентов взаимного влияния для заданного закона регулирования. Особенностью представленной модели является то, что состояние каждого узла характеризуется двумя параметрами состояния: для компрессоров – это напорная характеристика и характеристика КПД, для турбин – характеристики производительности и КПД.

Ключевые слова: диагностическая модель, турбовальный двигатель, проточная часть, компрессор, турбина, напорная характеристика, математическая модель, закон регулирования, характеристика производительности.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-99-106

Из опыта эксплуатации известно, что значительная часть отказов и неисправностей ГТД возникают в проточной части [1]. Широкое применение для выявления этих отказов и неисправностей нашел визуально-оптический метод контроля, который дает наиболее общую информацию о состоянии ответственных узлов и деталей двигателя, таких, как лопатки и диски компрессора и турбины, камеры сгорания [2].

Однако применение этого метода возможно только на неработающем двигателе, что существенно снижает оперативность получения информации о состоянии проточной части ГТД. Контроль и диагностирование ГТД по термогазодинамическим параметрам является одним из наиболее распространенных и эффективных методов оценки технического состояния проточной части, реализуемого непосредственно в процессе использования ГТД по назначению [3].

Кроме того, в процессе ремонта двигателей часто возникает задача по определению дополнительных мероприятий по восстановлению

элементов проточной части в случае выхода термогазодинамических параметров за пределы ремонтных допусков. Проведение этих мероприятий осуществляется, как правило, методом проб и ошибок.

Поэтому разработка методов, позволяющих определять непосредственно в процессе использования ГТД по назначению техническое состояние элементов проточной части двигателя, или в процессе послеремонтных испытаний выявлять элементы проточной части, вызывающих выход за пределы допуска термогазодинамических параметров, является важной и актуальной задачей.

Для решения подобных задач необходимо установить зависимость между изменениями первичных переменных и поддающихся измерению зависимых (вторичных) параметров. Задача эта решается составлением и решением математической модели изделия. Чаще всего в сложных алгоритмах диагностики и при выборе оптимальных параметров двигателя используются универсальные математические модели в [3, 4]. Такие модели состоят из ряда модулей, каждый из которых описывает один из узлов двигателя. Характеристики всех узлов (компрессоров, турбин) задаются.

В основу представленной модели положены известные представления о влиянии изменений геометрии в проточной части (в том числе и в результате неисправностей) на изменения ха-

Кажаяев Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: kazhaev.vp@ssau.ru

Киселев Денис Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@inbox.ru

Киселев Юрий Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники. E-mail: zamivt@ssau.ru

рактических узлов двигателя: производительности компрессоров, степени повышения давления воздуха, степени понижения давления в турбинах, эффективных площадей сопловых аппаратов, КПД узлов и т.д.

Особенностью представленной модели является то, что состояние каждого узла характеризуется двумя параметрами состояния: для компрессоров – это напорная характеристика и характеристика КПД, для турбин – характеристики производительности и КПД.

Рассмотрим, на примере компрессора, как влияют неисправности на его характеристики и каким образом в математическую модель включены параметры состояния компрессора.

Экспериментально подтверждено [5, 7, 8], что при неисправностях в компрессоре (абразивный износ, загрязнения и др.) происходит снижение напора ступеней, что приводит к смещению напорных характеристик (зависимости степени повышения давления от расхода воздуха $\pi_k^* = f(G_{в пр})$ при $n_{к пр} = \text{const}$) в сторону меньших расходов воздуха (рис. 1). Это смещение происходит по характеристике сети, которой в двига-

теле является линия рабочих режимов (кривая 10-10 → 1-1, точка А0 → А1). Одновременно с изменением геометрии лопаток происходит ухудшение состояния их поверхности, увеличиваются радиальные зазоры над лопатками, что приводит к снижению КПД процесса сжатия при $n_{к пр} = \text{const}$ (кривая 30-30 → 3-3, точка В0 → В1).

Снижение КПД компрессора требует увеличения температуры газа перед турбиной компрессора, что приводит к смещению линии рабочих режимов в сторону больших температур (кривые 20-20 → 2-2, точка А1 → А на рис. 1).

В конечном итоге при смещении напорной характеристики ($\Delta G'_{в пр}$, $\Delta \pi_k^{1*}$) и характеристики КПД ($\Delta \eta_k^{1*}$) рабочая точка из положения А0 на характеристике $\pi_k^* = f(G_{в пр})$ сместится в положение А, а рабочая точка на характеристике КПД перейдет из положения В0 в В. Расход воздуха, степень повышения давления и КПД изменятся (уменьшатся) соответственно на $\Delta G_{в пр}$, $\Delta \pi_k^*$, $\Delta \eta_k^*$.

Аналогичным образом происходит изменения характеристик компрессора при любой неисправности в нем, приводящей к измене-

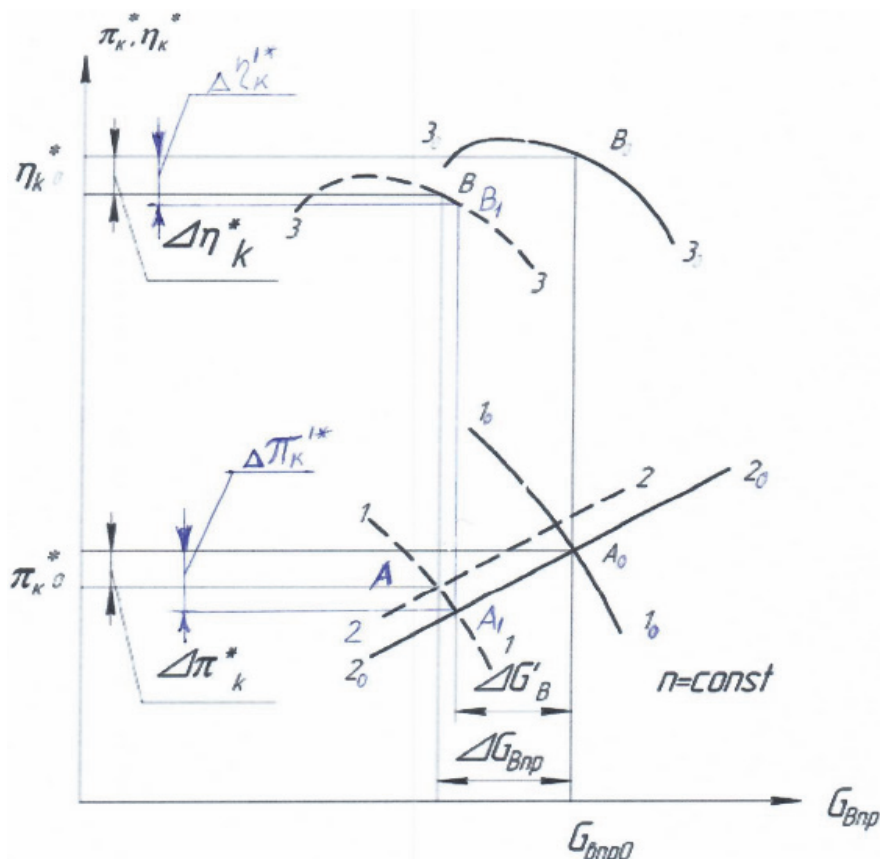


Рис. 1. Схема смещения характеристик и рабочих точек компрессора при изменении его состояния: 1₀, 2₀, 3₀ – исходное положение напорной характеристики, линии рабочих режимов и характеристики КПД; 1, 2, 3 – смещенное положение характеристик и линии рабочих режимов;

$G_{в пр 0}$, $\pi_{к 0}^*$, $\eta_{к 0}^*$ – исходные значения параметров компрессора (приведенного расхода воздуха, степени повышения давления, КПД);

$\Delta G_{в пр}$, $\Delta \pi_k^*$, $\Delta \eta_k^*$ – абсолютная величина изменений параметров компрессора;

$\Delta G'_{в пр}$, $\Delta \pi_k^{1*}$, $\Delta \eta_k^{1*}$ – смещение напорной характеристики и характеристики КПД

нию геометрии деталей в проточной части [4, 5, 7, 8].

Параметры работы компрессора оказывают непосредственное влияние на работу всего двигателя. Так как непосредственная оценка изменения КПД компрессора, расхода воздуха невозможна, то состояние компрессора, так же как других узлов двигателя, оценивается косвенно через измерение температуры, давления воздуха, газа, частот вращения роторов и т.д. Для этих целей параметры узлов двигателя включаются в математическую модель двигателя.

Состояние компрессора, как показано выше, может быть оценено комплексом параметров $\Delta\Pi = \{\Delta G'_{в пр}, \Delta\pi'_{к}, \Delta\eta'_{к}\}$. Математическая модель двигателя может адекватно отражать изменения в компрессоре, если все указанные параметры состояния будут включены в математическую модель. Необходимо отметить, что данное очевидное положение часто игнорируется, и в математическую модель включается только изменение КПД (что приводит к грубым ошибкам в оценке состояния двигателя через измеряемые параметры. Действительно, если не учитывать смещение напорной характеристики, то невозможно объяснить очевидный факт одновременного снижения расхода воздуха $G_{в пр}$ и $\pi_{к}^*$ при ухудшении состояния компрессора. При неизменной напорной характеристике уменьшение $G_{в пр}$ должно сопровождаться увеличением $\pi_{к}^*$, что невозможно при «плохом компрессоре».

Итак, для оценки состояния компрессора необходимо оценить $\{\Delta G'_{в пр}, \Delta\pi'_{к}, \Delta\eta'_{к}\}$, или, переходя к относительным отклонениям, $\{\delta G'_{в пр}, \delta\pi'_{к}, \delta\eta'_{к}\}$.

Здесь $\delta\Pi = [(\Pi - \Pi_0) / \Pi_0] \cdot 100\%$

Два из этих параметров можно связать между собой, выразив $\delta\pi'_{к}$ через $\delta G'_{в пр}, \delta\pi'_{к} = f(\delta G'_{в пр})$ (по характеристикам компрессора). В итоге для того, чтобы оценить состояние компрессора, в рассматриваемую диагностическую модель двигателя включены два независимых параметра $\delta G'_{в пр}$ и $\delta\eta'_{к}$.

Неисправности турбины компрессора и свободной турбины – прогары и оплавления лопаток СА, повреждения лопаток РК, увеличение радиальных зазоров и т.д., приводят к увеличению площадей СА, изменению пропускной способности турбин, ухудшению их КПД. Влияние неисправностей в турбинах на их характеристики представлено в работах [5, 8].

В основу представленной модели положены известные представления о совместной работе узлов ГТД [5, 6].

Как рассматривалось в [4, 5, 6] представим системы уравнений, описывающих процессы,

которые происходят в основных узлах турбовального двигателя со свободной турбиной: во входном устройстве, в компрессоре, в камере сгорания, в турбине компрессора, в свободной турбине, в выходном устройстве. В данные уравнения введены характеристики компрессора и турбины.

Входное устройство:

$$\left. \begin{aligned} 1) p_{вх}^* &= p_H \cdot \sigma_{вх} \\ 2) T_{вх}^* &= T_H \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $p_{вх}^*, T_{вх}^*$ – полное давление воздуха за входным устройством;

p_H, T_H – давление и температура невозмущенного потока в атмосфере;

$\sigma_{вх}$ – коэффициент восстановления полного давления воздуха во входном устройстве.

Компрессор:

$$\left. \begin{aligned} 1) G_B &= G_{в пр} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{вх}^*}} \cdot \frac{p_{вх}^*}{101,3} \\ 2) \pi_{к}^* &= \pi_{к}(G_{в пр}, n_{к пр}) \\ 3) \pi_{к}^* &= p_{к}^* / p_{вх}^* \\ 4) T_{к}^* &= T_{вх}^* \left[1 + \left(\pi_{к}^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{к}} \right] \\ 5) \eta_{к} &= \eta_{к}(G_{в пр}, n_{к пр}) \\ 6) N_{к} &= \frac{k}{k-1} R_B T_{вх}^* \left(\pi_{к}^{*\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{к}} G_B \\ 7) G_{отб} &= G(G_B) \\ 8) n_{к} &= n_{к пр} \sqrt{T_{вх}^* / 288} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где G_B – расход воздуха через компрессор;

$G_{в пр}$ – приведенный расход воздуха;

$\pi_{к}^*$ – степень повышения полного давления в компрессоре;

$\pi_{к}$ – степень повышения давления в компрессоре;

$n_{к пр}$ – приведенная частота вращения ротора компрессора;

$p_{к}^*$ – полное давление воздуха за компрессором;

$T_{к}^*$ – температура воздуха за компрессором;

$\eta_{к}$ – КПД компрессора;

$N_{к}$ – мощность, потребная для вращения компрессора;

k – показатель изоэнтропы воздуха;

R_B – газовая постоянная воздуха;

$G_{отб}$ – отбор воздуха из компрессора.

Камера сгорания:

$$\left. \begin{aligned} 1) G_B C_{pB}^{T_K^*} T_K^* + G_T C_{pT} T_T + G_T H_u \eta_\Gamma &= G_\Gamma C_{p\Gamma}^{T_\Gamma^*} T_\Gamma^* \\ 2) p_K^* &= p_\Gamma^* / \sigma_\Gamma \\ 3) G_\Gamma &= G_B - G_{отб} + G_T \end{aligned} \right\}, (3)$$

где $C_{pB}^{T_K^*}$ – удельная теплоемкость воздуха при T_K^* ;
 G_T – расход топлива;
 C_{pT} – удельная теплоемкость топлива;
 T_T – температура топлива;
 H_u – теплотворная способность топлива;
 η_Γ – коэффициент полноты сгорания топлива в камере сгорания;
 G_Γ – расход газа через турбину компрессора;
 $C_{p\Gamma}^{T_\Gamma^*}$ – удельная теплоемкость газа при температуре T_Γ^* ;
 T_Γ^* – температура газов за камерой сгорания;
 p_Γ^* – полное давление газа за камерой сгорания;
 σ_Γ – коэффициент восстановления полного давления газа в камере сгорания.

Турбина компрессора:

$$\left. \begin{aligned} 1) N_{TK} &= \frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1} R_\Gamma T_\Gamma^* \left(1 - \pi_{TK}^{* \frac{1-k_\Gamma}{k_\Gamma}} \right) \eta_{TK}^* G_\Gamma \\ 2) \pi_{TK}^* &= p_\Gamma^* / p_{TK}^* \\ 3) N_{TK} &= N_K / \eta_M \\ 4) G_\Gamma &= m_{ca} \frac{F_{ca} p_\Gamma^* q(\lambda_{ca})}{\sqrt{T_\Gamma^*}} \\ 5) q(\lambda_{ca}) &= const \\ 6) \eta_{TK}^* &= \eta_T(\pi_{TK}^*, n_{TK}) \\ 7) n_K &= n_{TK} \\ 8) G_{CB} &= G_\Gamma \\ 9) T_{TK}^* &= T_\Gamma^* \left\{ 1 - \eta_{TK}^* \left[1 - \left(1 / \pi_{TK}^* \right)^{\frac{k_\Gamma-1}{k_\Gamma}} \right] \right\} \end{aligned} \right\}, (4)$$

где N_{TK} – мощность на валу турбины компрессора;
 k_Γ – показатель эзоэнтропы газа;
 R_Γ – газовая постоянная газа;
 π_{TK}^* – степень понижения полного давления газа в турбине компрессора;
 p_{TK}^* – полное давление газа за турбиной компрессора;
 η_M – механический КПД;
 m_{ca} – численный коэффициент в уравнении расхода газа через турбину компрессора;
 F_{ca} – площадь минимального сечения соплового аппарата первой ступени турбины компрессора;

$q(\lambda_{ca})$ – газодинамическая функция;
 η_{TK}^* – КПД турбины компрессора по параметрам заторможенного потока;
 n_{TK} – частота вращения турбины компрессора;
 T_{TK}^* – температура газов за турбиной компрессора.

Свободная турбина:

$$\left. \begin{aligned} 1) G_{CB пр} &= G(\pi_{TCB}^*, n_{CB пр}) \\ 2) G_{CB пр} &= \frac{G_{CB} \sqrt{T_{TK}^*} 101,325}{p_{TK}^* \sqrt{288}} \\ 3) G_c &= G_{CB} \\ 4) \pi_{TCB}^* &= p_{TK}^* / p_{CB}^* \\ 5) T_{CB}^* &= T_{TK}^* \left\{ 1 - \eta_{TCB}^* \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{TCB}^*} \right)^{\frac{k_\Gamma-1}{k_\Gamma}} \right] \right\} \\ 6) N_e &= \frac{k_\Gamma}{k_\Gamma - 1} R_\Gamma T_{TK}^* \left(1 - \pi_{\Sigma CB}^{* \frac{1-k_\Gamma}{k_\Gamma}} \right) \eta_{\Sigma CB} G_{CB} \\ 7) \eta_{\Sigma CB} &= \eta_{TCB}^* \frac{\left(1 - \frac{1}{\pi_{TCB}^* \frac{k_\Gamma-1}{k_\Gamma}} \right)}{\left(1 - \frac{1}{\pi_{\Sigma CB}^{* \frac{k_\Gamma-1}{k_\Gamma}}} \right)} \\ 8) \eta_{TCB}^* &= \eta_T(\pi_{TCB}^*, n_{CB пр}) \\ 9) n_{CB пр} &= n_{CB} / \sqrt{T_{TK}^*} \\ 10) \pi_{\Sigma CB}^* &= p_{TK}^* / p_H \\ 11) C_e &= G_T / N_e \end{aligned} \right\}, (5)$$

где $G_{CB пр}$ – приведенный расход газа через свободную турбину;
 π_{TCB}^* – степень понижения полного давления газа в свободной турбине;
 $n_{CB пр}$ – приведенная частота вращения ротора свободной турбины;
 G_{CB} – расход газа через свободную турбину;
 G_c – расход газа через сопло;
 p_{CB}^* – полное давление газа за свободной турбиной;
 T_{CB}^* – температура газа за свободной турбиной;
 η_{TCB}^* – КПД свободной турбины по параметрам заторможенного потока;

N_e – мощность на валу турбовального двигателя;

$\pi_{\Sigma CB}$ – суммарная степень понижения давления в свободной турбине и выходном устройстве;

$\eta_{\Sigma CB}$ – мощностной КПД свободной турбины;

η_{TCB} – КПД свободной турбины;

n_{CB} – частота вращения ротора свободной турбины;

C_e – удельный расход топлива.

Выходное устройство:

$$\left. \begin{aligned} 1) p_{CB}^* &= p_c^* / \sigma_c \\ 2) G_c &= \frac{p_c^* F_c m_c q(\lambda_c)}{\sqrt{T_c^*}} \\ 3) q(\lambda_c) &= \left(\frac{k_r + 1}{2}\right)^{\frac{1}{k_r - 1}} \pi_c^{-\frac{1}{k_r}} \sqrt{\frac{k_r + 1}{k_r - 1} \left(1 - \pi_c^{\frac{1 - k_r}{k_r}}\right)} \\ 4) \pi_c &= p_c^* / p_H \\ 5) T_c^* &= T_{CB}^* \end{aligned} \right\} (6)$$

где p_c^* – полное давление газа на срезе сопла;

σ_c – коэффициент восстановления полного давления газа в выходном устройстве;

F_c – площадь сопла;

m_c – численный коэффициент в уравнении расхода газа через сопло;

T_c^* – температура газа на срезе сопла;

π_c – степень понижения давления в выходном устройстве.

Характеристики компрессора и турбин представлены в математической модели в общем виде: уравнения 2) и 5) – в системе (2); уравнение 6) – в системе (4); уравнения 1) и 8) в системе (5). В нашей математической модели вертолетного двигателя характеристики, заданные графически, аппроксимируются алгебраическими уравнениями.

Согласно [4, 5] представим линеаризованные уравнения (1)...(6) рабочих процессов турбовального двигателя со свободной турбиной.

Входное устройство:

$$\left. \begin{aligned} 1) \delta P_{BX}^* &= \delta P_H + \delta \sigma_{BX} \\ 2) \delta T_{BX}^* &= \delta T_H \end{aligned} \right\} (7)$$

Компрессор:

$$\left. \begin{aligned} 1) \delta G_B - \delta G_{BPP} - \delta P_{BX}^* + 0,5 \cdot \delta T_{BX}^* &= 0; \\ 2) \delta G_{BPP} - K_{2\pi K} \cdot \delta \pi_K^* &= K_{2G'B} \cdot \delta G_{BPP}; \\ 3) \delta \pi_K^* + \delta P_{BX}^* - \delta P_K^* &= 0 \\ 4) \delta T_K^* - \delta T_{BX}^* - K_{4\pi K} \cdot \delta \pi_K^* + K_{4\eta K} \cdot \delta \eta_K &= 0 \\ 5) \delta \eta_K - K_{5GB} \cdot \delta G_{BPP} &= K_{5\eta K} \cdot \delta \eta_K - K_{5G'B} \cdot \delta G_{BPP}; \\ 6) \delta N_K - \delta G_B - K_{6\pi K} \cdot \delta \pi_K^* + \delta \eta_K - \delta T_{BX}^* &= 0 \\ 7) \delta G_B - \delta G_{omb} &= 0 \\ 8) \delta n_K - 0,5 \cdot \delta T_{BX}^* &= \delta n_{KPP}. \end{aligned} \right\} (8)$$

Величины $\delta G'_{BPP}$ и $\delta \eta'_K$ представляют относительные смещения напорной характеристики компрессора по горизонтали и характеристики КПД по вертикали в соответствии со схемой (рис.1)

Камера сгорания:

$$\left. \begin{aligned} 1) \delta T_{\Gamma}^* + \delta G_{\Gamma} - K_{1GB} \cdot \delta G_B - K_{1TK} \cdot \delta T_K^* - K_{1GT} \cdot \delta G_T &= 0; \\ 2) \delta P_{\Gamma}^* - \delta P_K^* &= \delta \sigma_{\Gamma}; \\ 3) \delta G_{\Gamma} - K_{3GB} \cdot \delta G_B + K_{3GOTB} \cdot \delta G_{OTB} - K_{3GT} \cdot \delta G_T &= 0. \end{aligned} \right\} (9)$$

Турбина компрессора:

$$\left. \begin{aligned} 1) \delta N_{TK} - \delta G_{\Gamma} - \delta T_{\Gamma}^* - \delta \eta_{TK}^* - K_{1nTK} \cdot \delta \pi_{TK}^* &= 0; \\ 2) \delta P_{\Gamma}^* - \delta \pi_{TK}^* - \delta P_{TK}^* &= 0; \\ 3) \delta N_K - \delta N_{TK} &= \delta \eta_M; \\ 4) \delta G_{\Gamma} - \delta P_{\Gamma}^* + 0,5 \cdot \delta T_{\Gamma}^* - \delta q(\lambda_{CA}) &= \delta F_{CA}; \\ 5) \delta q(\lambda_{CA}) &= 0; \\ 6) \delta \eta_{TK}^* - K_{6\pi 2TK} \cdot (\delta n_{TK} - 0,5 \cdot \delta T_{\Gamma}^*) - K_{6\pi 1TK} \cdot (\delta n_{TK} - 0,5 \cdot K_{6\pi T} \cdot \delta T_{\Gamma}^* + 0,5 \cdot K_{6\pi TK} \cdot \delta T_{TK}^*) &= K_{6\eta TK} \cdot \delta \eta_{TK}^*; \\ 7) \delta n_K - \delta n_{TK} &= 0; \\ 8) \delta G_{CB} - \delta G_{\Gamma} &= 0; \\ 9) \delta T_{TK}^* - \delta T_{\Gamma}^* + K_{9\eta TK} \cdot \delta \eta_{TK}^* - K_{9\pi TK} \cdot \delta \pi_{TK}^* &= 0. \end{aligned} \right\} (10)$$

Свободная турбина:

$$\left. \begin{aligned}
 1) & \delta G_{CBIP} + 0,5 \cdot K_{ITK} \cdot \delta T_{TK}^* - 0,5 \cdot K_{ITCB} \cdot \delta T_{CB}^* = \delta G_{CB}^* + \\
 & + K_{InCB} \cdot \delta n_{CB}; \\
 2) & \delta G_{CBIP} - \delta G_{CB} - 0,5 \cdot \delta T_{TK}^* + \delta P_{TK}^* = 0; \\
 3) & \delta G_{CB} - \delta G = 0; \\
 4) & \delta P_{TK}^* - \delta P_{CB}^* - \delta \pi_{TCB}^* = 0; \\
 5) & \delta T_{CB}^* - \delta T_{TK}^* + K_{\eta_{TCB}} \cdot \delta \eta_{TCB}^* - K_{\pi_{TCB}} \cdot \delta \pi_{TCB}^* = 0; \\
 6) & \delta N_e = \delta G_{CB} - \delta T_{TK}^* - \delta \eta_{\Sigma CB} - K_{\pi_{\Sigma CB}} \cdot \delta \pi_{\Sigma CB} = 0; \\
 7) & \delta \eta_{\Sigma CB} - \delta \eta_{TCB}^* - K_{\pi_{TCB}} \cdot \delta \pi_{TCB}^* - K_{\pi_{\Sigma CB}} \cdot \delta \pi_{\Sigma CB} = 0; \\
 8) & \delta \eta_{TCB}^* + K_{\eta_{2CB}} \cdot 0,5 \cdot \delta T_{TK}^* + 0,5 \cdot K_{\eta_{1CB}} \cdot K_{\eta_{TK}} \cdot \delta T_{TK}^* - \\
 & - 0,5 \cdot K_{\eta_{1CB}} \cdot K_{\eta_{TCB}} \cdot \delta T_{CB}^* = K_{\eta_{TCB}} \cdot \delta \eta_{TCB}^* + \delta n_{CB} (K_{\eta_{2CB}} + \\
 & + K_{\eta_{1CB}}); \\
 9) & \delta n_{CBIP} + 0,5 \cdot \delta T_{TK}^* = \delta n_{CB}; \\
 10) & \delta \pi_{\Sigma CB} - \delta P_{TK}^* = \delta P_H; \\
 11) & \delta C_e - \delta G_T + \delta N_e = 0.
 \end{aligned} \right\} (11)$$

Выходное устройство:

$$\left. \begin{aligned}
 1) & \delta P_C^* - \delta P_{CB}^* = \delta \sigma_C; \\
 2) & \delta G_C - \delta P_C^* + 0,5 \cdot \delta T_C^* - \delta q(\lambda_C) = \delta F_C; \\
 3) & \delta q(\lambda_C) - 0,5 \cdot K_{\Sigma C} \cdot \delta \pi = 0; \\
 4) & \delta \pi_C - \delta P_C^* = \delta P_H; \\
 5) & \delta T_C^* - \delta T_{CB}^* = 0.
 \end{aligned} \right\} (12)$$

Уравнения (7) – (12) образуют замкнутую систему. В левую часть уравнений входят вторичные параметры (часть из которых являются измеряемыми), а в правую часть – первичные (параметры состояния). Решение системы позволяет выразить отклонение любой из вторичных переменных через отклонения первичных. Перед решением системы уравнений (7) – (12), согласно [4, 5], для заданного режима работы двигателя ($n_{TK\text{пр}} = \text{const}$) вычисляются частные коэффициенты, входящие в левую часть уравнений.

В результате решения системы уравнений (7) – (12) образуется матрица коэффициентов взаимного влияния первичных на вторичные параметры.

Коэффициенты влияния первичных параметров на измеряемые, рассчитаны для всех режимов работы двигателя. Для примера эти коэффициенты для режима «Номинальный» представлены в таблице 1.

Как было сказано выше, в процессе ремонта вертолетных ГТД часто возникает задача по разработке дополнительных мероприятий по восстановлению элементов проточной части (замена рабочих лопаток и НА в компрессоре, жаровых труб в камере сгорания, рабочих лопаток и СА турбин) в случае выхода термогазодинамических параметров за пределы ремонтных допусков при сдаточных испытаниях.

Для инженерной оценки влияния этих мероприятий на термогазодинамические параметры (с целью приведения их в пределы ремонтных допусков) в математическую модель для свободной турбины дополнительно к двум параметрам состояния δG_{CB}^* ; $\delta \eta_{TCB}^*$ включен еще первичный параметр – изменение площади ее первого соплового аппарата $\delta F_{ca1ст}$ (Таблица 1).

Таблица 1. Коэффициенты взаимного влияния параметров вертолетного турбовального двигателя на режиме работы «Номинальный»

Вторичные параметры	Первичные параметры										
	$\delta \sigma_{\Sigma C}$	$\delta \eta_{TK}^*$	δG_{CB}^*	$\delta \sigma_C$	δF_{ca}	$\delta \eta_{TK}^*$	δG_{CB}^*	$\delta \eta_{TCB}^*$	$\delta F_{ca1ст}$	δF_C	$\delta \sigma_C$
δG_{CB}^*	1	0,11	1,03	0,22	0,14	0,13	0,04		0,08		
$\delta \pi_{TK}^*$		-0,41	1,34	-0,81	-0,51	-0,46	-0,46		-0,3		
δT_{TK}^*		-0,51	0,33	-0,28	-0,17	-0,16	-0,11		-0,01		
δG_T	1	-1,84	1,94	-1,84	1,48	-2,07	-1,78		-1,74		
δT_{TK}^*		-1,04	0,61	-0,52	0,69	-1,16	-0,95		-0,76		
$\delta \pi_{TK}^*$		-1,03	0,58	-0,5	0,89	-1,73	-1,18		-1,21		
$\delta \pi_{TK}^*$		-0,04	0,02	-0,02	-1,12	0,19	1,1		1,12		
δT_{CB}^*	-0,11	-1,03	0,44	-0,43	0,65	-1,94	-0,94	-0,13	-1,21	-0,07	-0,18
$\delta \pi_{TCB}^*$	0,62	-0,31	0,82	-0,1	0,25	-0,45	-1,33	0,03	-1,25	0,42	1,04
$\delta \pi_{\Sigma CB}$	1	-0,41	1,32	-0,16	0,4	-0,64	-1,56		-1,42		
δN_e	1,56	-1,47	2,74	-0,55	1,09	-2,48	-3,05	0,95	-1,97	0,58	1,24

Представленная математическая модель может использоваться как при поиске неисправностей проточной части вертолетного двигателя, так и при доводке и восстановлении его узлов при ремонте в случае выхода термогазодинамических параметров за пределы ремонтных допусков при сдаточных испытаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В.М.* Основы надежности газотурбинных двигателей / В.М. Акимов. – М.: Эколит, 2016. – 208 с.
2. *Машошин О.Ф., Бигус А.В.* Информационное обеспечение процессов диагностирования авиационной техники / О.Ф. Машошин, А.В. Бигус // Научн. вестник МГТУ ГА. – 2002. – № 49. С. 44-48.
3. *Ахметзянов, А.М.* Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А.М. Ахметзянов, Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
4. *Киселёв, Ю.В.* Диагностирование газотурбинных двигателей и их узлов по термогазодинамическим и виброакустическим параметрам: учеб. пособие / Ю.В. Киселёв, Н.И. Епишев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007 с.
5. *Черкиз, А.Я.* Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений / А.Я. Черкиз. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.
6. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов [под редакцией Шевякова А.А.] – М.: Машиностроение, 1976. – 344 с.
7. *Абдельвахид, М.Б.* Методика оценки влияния климатических условий и эрозионного износа на характеристики ТРДДФ: дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / М.Б. Абдельвахид; науч. рук. А.Н. Черкасов; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». – Москва, 2014. – 175 с
8. *Епишев, Н.И.* Исследование характеристик и параметрическая диагностика авиационных ГТД, работающих в наземных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.07 / Н. И. Епишев ; науч. рук. К. А. Жуков ; Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королева. – Куйбышев, 1983. - 204 с

DIAGNOSTIC MODEL OF HELICOPTER TURBOSHAFT ENGINE

© 2023 V.P. Kazhaev, D.Y. Kiselev, Y.V. Kiselev

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

The article presents a qualitative assessment of the impact on the engine components characteristics of the malfunction occurrence in the flow part of the aviation gas turbine engines, which lead to changes in its geometry. Using the example of a compressor, it is shown that when defects appear in it, two of its characteristics are deformed: efficiency and pressure characteristics (which is confirmed by a significant number of studies). It is concluded that in order to reliably diagnose aviation gas turbine engines by thermogasodynamic parameters, the mathematical model must take into account the change in two characteristics for each engine component of the flow part (and not only the change in the characteristics of the efficiency of the nodes). A linear mathematical model of a helicopter turboshaft turbine engine is presented and the results of calculating the influence coefficient for a given control law are presented. The peculiarity of the presented model is that the state of each engine component is characterized by two state parameters: for compressors, this is the head characteristic and the efficiency characteristic, for turbines, performance characteristics and efficiency.

Key words: diagnostic model, turboshaft engine, flow part, compressor, turbine, head characteristic, mathematical model, control law, performance characteristics.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-99-106

REFERENCES

1. Akimov V.M. Osnovy nadezhnosti gazoturbinnih dvigatelej / V.M. Akimov. – M.: Ekolite, 2016. – 208 s.
2. Mashoshin O.F., Bigus A.V. Informacionnoe obespechenie processov diagnostirovaniya aviacionnoj tekhniki / O.F. Mashoshin, A.V. Bigus // Nauchn. vestnik MGTU GA. – 2002. – № 49. S. 44-48.
3. Ahmetzyanov, A.M. Diagnostika sostoyaniya VRD po termogazodinamicheskim parametram / A.M. Ahmetzyanov, N.G. Dubravskij, A.P. Tunakov. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 206 s.
4. Kiselyov, Yu.V. Diagnostirovanie gazoturbinnih dvigatelej i ih uzlov po termogazodinamicheskim i vibroakusticheskim parametram: ucheb. posobie / YU.V. Kiselyov, N.I. Epishev. – Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2007 s.
5. Cherkiz, A.YA. Inzhenernye raschety gazoturbinnih dvigatelej metodom malyh otklonenij / A.Ya. Cherkiz. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 380 s.
6. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya silovymi ustanovkami letatel'nyh apparatov [pod redakciej Shevyakova A.A.] – M.: Mashinostroenie, 1976. – 344 s.
7. Abdel'vahid, M.B. Metodika ocenki vliyaniya klimaticheskikh uslovij i erozionnogo iznosa na karakteristiki TRDDF: dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.07.05 / M.B. Abdel'vahid; nauch. ruk. A.N. Cherkasov; Voennyj uchebno-nauchnyj centr Voenno-vozdushnyh sil «Voenno-vozdushnaya akademiya imeni professora N. E. Zhukovskogo i YU. A. Gagarina». – Moskva, 2014. – 175 s
8. Epishev, N.I. Issledovanie harakteristik i parametricheskaya diagnostika aviacionnyh GTD, rabotayushchih v nazemnyh usloviyah: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.07.07 / N. I. Epishev ; nauch. ruk. K. A. Zhukov ; Kujbyshev. aviac. in-t im. S. P. Koroleva. - Kujbyshev, 1983. - 204 s.

Vladimir Kazhaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft Maintenance Department.
E-mail: kazhaev.vp@ssau.ru

Denis Kiselev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft Maintenance Department.
E-mail: eat@inbox.ru

Yuri Kiselev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft Maintenance Department.
E-mail: zamivt@ssau.ru

УДК 502.504 : 606 : 628.4.043

КОНФИГУРАЦИЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ В ЦЕЛЯХ СОЗДАНИЯ БЕЗОПАСНОЙ СРЕДЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ© 2023 Э.С.Цховребов¹, Ф.Х. Ниязгулов²¹ ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), г. Москва, Россия² Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакция 15.02.2023

Целью настоящей работы послужило создание конфигурации ресурсосберегающей системы обращения использованной электробытовой и электронной техники, реализующей состояние экологической безопасности территорий, формирование комфортной, безопасной, благоприятной среды жизнедеятельности людей, защищенность населения и территорий от возможных угроз возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера. Основными задачами проводимого исследования определены: сбор, обобщение, систематизация материалов, композиция результатов исследований в области методов, способов, технологий сбора, сортировки, переработки электронного лома; сопоставительный анализ компонентного состава завершившей срок эксплуатации электронной и электробытовой техники, приборов, установок, средств автоматизации и измерений; системный анализ методов и технологий, обеспечивающих максимальное извлечение полезных компонентов из электронных отходов для их повторного использования в виде вторичного сырья в экономическом цикле; разработку конфигурации организационно-технической системы и технологической инфраструктуры всего цикла обращения с электронными отходами, реализующих обеспечение состояния защищенности людей, природной среды от негативного воздействия опасных техносферных объектов, благоприятность жизнедеятельности человека. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при актуализации территориальных схем обращения с отходами, территориальных и отраслевых схем планирования отходоперерабатывающей инфраструктуры, производственно-технических комплексов раздельного сбора, накопления, обработки завершившей срок эксплуатации электротехнической продукции.

Ключевые слова: экологическая безопасность, комфортность, благоприятность, жизнедеятельность, отходы электротехнического и электронного оборудования.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-107-116

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие в мире современные процессы и тенденции научно-технического развития, роста объемов и расширения форм потребления, диктуют необходимость разработки новых нестандартных подходов к обеспечению экологической безопасности территорий, созданию благоприятной, комфортной и безопасной среды жизнедеятельности населения, включая предупреждение чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера [1-5].

Отходы электронного и электротехнического оборудования (далее - ОЭЭО) являются одним из самых быстрорастущих и экологически опасных групп отходов в мировом масштабе. В мире

ежегодно образуется примерно 45-50 млн тонн бывшей в употреблении электротехнической, электронной продукции, при этом наблюдается неуклонная тенденция к росту в силу информатизации и цифровизации общественного коммуникационного пространства.

По разным оценкам в Российской Федерации по состоянию на 2016-2017 гг. ежегодное образование подобного рода отходов составляло 0.9-1,4 млн т или примерно 9,7 кг на одного жителя страны. Это не самый высокий показатель в мире. Так, к примеру, в Норвегии ежегодное количество образовавшихся ОЭЭО на душу населения составило 28,3 кг, в Швейцарии 26,3 кг [5-7]. Однако это не означает, что для Российской Федерации поднятая экологическая проблема не является актуальной и значимой с точки зрения обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности в населенных пунктах и за их пределами. Нерешенность проблемы раздельного сбора, обработки, утилизации таких отходов приводит к их размещению в составе смешанного бытового и/или производственного мусора

Цховребов Эдуард Станиславович, кандидат экономических наук, доцент, старший научный сотрудник Центра "Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций" ВНИИ ГО ЧС (ФЦ) МЧС России.

E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru

Ниязгулов Филюз Хайдарович, соискатель, старший преподаватель РУТ МИИТ. E-mail: transgeo@yandex.ru

на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО), несанкционированных свалках, нанося при этом значительный непоправимый вред окружающей среде. Активизируется появление таких отходов на обочинах дорог, в оврагах, лесных массивах, сельхозугодьях, водоохраных зонах водоёмов. ОЭЭО содержат материалы, вещества и их соединения различного уровня токсичности для здоровья человека и опасности для окружающей среды, включая чрезвычайно и высокотоксичные/опасные.

С другой стороны, большинство ценных компонентов бывшей в употреблении электронной продукции могут быть востребованы в качестве вторичных ресурсов. В компонентном составе этих отходов присутствуют дорогостоящие редкоземельные металлы (европий, диспрозий, неодим, иттрий, тербий и др.), широко применяемые при выпуске электронной продукции, их стоимость за 1 кг может варьироваться от 110 до 5 500 \$ [8]. По экспертным оценкам, в среднем один мобильный телефон может содержать по массе ценных вторичных ресурсов (в граммах): меди - 8,75; кобальта - 3,81; железа - 3,00; олова - 1,00; серебра - 0,25; золота - 0,024; палладия - 0,009, на сумму от 1-1,5 \$ [8-11]. Суммарные приведенные затраты выделение металлов из ОЭЭО в 13 раз ниже по сравнению с добычей этих металлов из природной среды [8].

В связи с этим, во многих странах мира значительные объемы ОЭЭО выбираются из ТКО и разбираются частными лицами с целью извлечения наиболее ликвидных вторичных материалов, в первую очередь, драгоценных и редких металлов (золота, серебра, палладия, кобальта и ряда других).

Однако, до сих пор одним из препятствий создания высокоэффективной переработки ОЭЭО является низкое качество либо непроработанность с учетом всевозможных факторов, условий, ограничений комплексных организационно-технических систем обращения, так и экологически безопасных ресурсосберегающих технологий их раздельного сбора, обработки, утилизации.

И, если, в сфере создания отдельных технологий, за последние десятилетие научные исследования существенным образом продвинулись вперед (например, результативность выделения редкоземельных металлов биотехнологическим способом может достигать до 95 % [7,9]), то в плане разработки концепций экологически безопасных ресурсосберегающих систем обращения использованной электротехнической и электронной продукции в отраслевом, региональном, муниципальном форматах актуальная эколого-экономическая проблема остается нерешенной. Основной целью формирования

таких комплексных систем является не только развитие малого и среднего предпринимательства, создание новых рабочих мест, пополнение бюджетов, а, в первую очередь, создание благоприятной, комфортной, безопасной среды жизнедеятельности людей, защита населения и территорий от экологических угроз и факторов, способных вызвать негативные последствия в виде чрезвычайных экологических ситуаций техногенного плана.

Методы исследования базируются на системном анализе научно-технической информации в области экологически безопасного обращения отходов электротехнических, электронных изделий в Российской Федерации и за рубежом, ресурсосберегающих методов, систем, технологий раздельного сбора, изолированного накопления, обработки, повторного использования полезных ресурсных составляющих завершившей свой срок эксплуатации, бывшей в употреблении разнородной продукции такого типа.

Концепция проводимого исследования основывается на общепринятых в мировом сообществе приоритетах и стратегиях обращения с отходами, в том числе: «Circular economy» (экономика замкнутого цикла), «Green economy» (зелёная экономика) [12-16], «Zero waste» (ноль отходов) [17-20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования, на базе проведения ретроспективного, сопоставительного анализа литературных источников, обобщения, систематизации, композиции полученных данных, уточнен перечень источников образования ОЭЭО, составляющих полезных элементов и их удельных количеств образования в зависимости от типа использованной техники.

Исследуемые отходы образуются после утраты потребительских свойств многочисленными группами потребительских товаров, таких как компьютерная техника, бытовая техника (электроплиты, холодильники, телевизоры, микроволновые печи, стиральные машины, электроплитки, посудомоечные машины, плееры, музыкальные центры, пылесосы, утюги, кухонные комбайны, электро-мясорубки, соковыжималки, чайники, кофеварки и пр.), оргтехника, электроинструменты, носители информации, телефоны и радиосвязь, автоэлектроника, фото-, видео-, аудиотехника, КИП, системы безопасности.

Источниками получения вторичного сырья из лома ОЭЭО служат: кабели и провода, печатные платы, микросхемы, припои, контакты, отдельные детали, узлы и блоки, металлические и пластиковые детали фурнитуры.

Электронная и электробытовая техника включает в своем составе множество востребованных в экономическом цикле утильных фракций, значительную долю которых составляют: черные и цветные металлы, сплавы, стекло, полимеры различных видов: полистирол, поливинилхлорид, АБС, поликарбонат, полиамид, а также стеклопластик и резинотехнические изделия.

Усредненные показатели компонентного состава некоторых видов ОЭЭО (в % по данным Швейцарской федеральной лаборатории естественных наук и технологий EMPA) приведены в таблице 1; компонентный состав отходов основных типов компьютерной и оргтехники (по данным инструментальных исследований ЦЛАТИ в %), средств мобильной связи (письмо производителя ООО «Транстрейд» от 29.11.2016 г. «О компонентном составе проводных телефонов Ritmix RT-440», «Зеленый портал») в % – в таблице 2.

В рамках следующего этапа исследования, на основе системного анализа сложившихся систем и процессов управления, регулирования исследуемой сферы деятельности, выявлены причины, условия, факторы, не способствующие налаживанию эффективной комплексной ресурсосберегающей системы экологически безопасного обращения с ОЭЭО.

Среди причин низкого уровня развития индустрии и предпринимательской деятельности по переработке ОЭЭО можно выделить:

- отсутствие мотива у собственника / производителя отходов, переработчиков и заготовителей вторичного сырья к разделному сбору, утилизации;
- неразвитость производственно-технологической инфраструктуры разделного сбора, на-

копления, обработки, утилизации ОЭЭО от населения и предприятий;

- сложный компонентный состав ОЭЭО, требующих привлечения профильных специалистов и инженерно-технических работников для обеспечения полноценной, качественной, безопасной обработки, повторного применения полезных ресурсных компонентов данного вида отходов;

- недостаточное количество технически подготовленных переработчиков данной группы отходов, инновационных технологий в данной сфере.

Таким образом, недостаточное развитие в России рынка вторичных материалов, ограниченность их использования в производстве сдерживает развитие инфраструктуры сбора и утилизации отходов электрической, электронной техники, средств автоматики, иных технических средств.

Вместе с тем, проведенный анализ показал, что современные технологии и системы обращения с такими отходами позволяют перерабатывать до 90% от веса использованных электронных и электротехнических изделий.

На основе имеющегося опыта автора по разработке проекта национальной отходоперерабатывающей стратегии, сделан вывод о том, что, в целях обеспечения утилизации этих отходов на уровне ведущих стран в мире (не менее 90%) промышленно-технологические комплексы по селективному сбору, обработке, утилизации ОЭЭО должны включать:

- стационарные и передвижные пункты по разделному сбору ОЭЭО у населения и хозяйствующих субъектов;
- многофункциональные комплексы по обработке (разборке, очитке, мойке, сортировке,

Таблица 1 – Усредненные показатели компонентного состава некоторых видов ЭЭО
Table 1 – Averaged indicators of the component composition of some species

Состав \ Вид техники	Крупная бытовая	Мелкая бытовая	Электроника
Черные металлы	43	29	36
Цветные металлы:			
алюминий	14	9,3	5
медь	12	17	4
свинец	1,6	0,57	0,29
кобальт	0,0014	0,0068	0,018
ртуть	0,000038	0,000018	0,00007
золото	0,00000067	0,00000061	0,00024
серебро	0,0000077	0,000007	0,0012
палладий	0,0000003	0,00000024	0,00006
рутений, индий	0	0	0,0005
АБС-пластик	0,29	0,75	18
Полимеры (ПВХ, ПЭ, ПА)	19	37	12
Стеклопластик	0	0	9
Стекло	0,017	0,16	0,3
Другое (РТИ и пр.)	10	6,9	5,7

Таблица 2 – Компонентный состав отходов основных типов компьютерной и оргтехники, средств мобильной связи
Table 2 – The component composition of the waste of the main types of computer and office equipment, mobile communications

Состав \ Тип техники	Системный блок	Монитор жидкокристаллическ.	Картридж ПУ (содержание тонера ≤7%)	Клавиатура, манипулятор (мышь)	Мобильный телефон, факс (Зеленый портал)
Черные металлы	48,89±14,67	6,2± 1,9	29,97 ± 8,99	6,79	18-20
Цветные металлы:	11,19 ± 3,36	4,3 ± 1,3	9,65 ± 2,90	0,84	
алюминий				0,2	
медь				0,62	16-20
золото					0,0098
серебро					0,033
палладий					0,003
рутений, индий					
кобальт					до 1
Олово					до 1
Марганец				0,016	
Хром				0,004	
Пластик, АБС-пластик	19,74 ± 5,92		45,65 ± 13,70	81,3	45-56
Полимеры (ПВХ, ПЭ, ПП)	0,080±0,029 (ПЭ) 0,018±0,006 (поролон)	32,3 ± 9,7		8,9 (ПЭ) 0,28 (ПП)	
Стеклопластик, текстолит	19,0 ± 5,7			0,22	3-5
Стекло	0,006±0,002	57,2 ± 17,2			
Резинотехнические изделия	1,06 ±0,32 (каучук)		2,32 ± 0,70	1,49	
Магнитный стержень			10,34 ± 3,10		
Керамика	0,008±0,003			0,18	7-10

изменению размеров (дроблению, измельчению, расплаву), а также сепарации) данных отходов;

- производственно-технические комплексы по утилизации отходов ЭЭО, выпуску новой конкурентоспособной, качественной, безопасной продукции и сырья из извлеченных вторичных материальных ресурсов - ценных компонентов использованной электробытовой, электронной техники.

В ходе организации системы раздельного сбора и изолированного накопления ОЭЭО следует принимать во внимание некоторые особенности, свойства, характеристики бывшей в употреблении специфической продукции:

- пригодность к дальнейшей эксплуатации (в т.ч. после реставрации, ремонта) всего изделия, отдельных деталей. блоков, либо отсутствие таковой;

- наличие повреждений, степень физического и морального износа как всего изделия, так и отдельных его частей, блоков, узлов, деталей;

- стоимость пригодной для дальнейшего применения в хозяйственном обороте использованной продукции после ремонта и восстановления (рециклинг) или извлеченных полезных компонентов (рекуперация);

- капитальные вложения и эксплуатационные затраты на изолированное накопление и складирование специальным образом, селективный сбор, первичную предварительную и технологическую обработку отходов (сортировку, сепарацию, расплав, чистку, брикетирование и пр.), оцененные в сравнении с расходами на полное раздробление и обезвреживание ОЭЭО.

При этом, с финансово-экономической точки зрения даже простейшая ручная разборка и сепарация этих отходов с использованием отвёртки и паяльника может давать ежемесячную прибыль в сотни тысяч рублей от реализации, в первую очередь, ценных металлов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Раздельный сбор полезных компонентов ОЭЭО
Fig. 1 - Separate collection of useful components of the E-waste

Многофункциональные сортировочные комплексы технологической обработки ОЭЭО должны планироваться с использованием современных технологий высокоэффективной и экологически безопасной подготовки этих специфических отходов к дальнейшему повторному применению в хозяйственном обороте: сортировка по крупности (грохочение); оптическая сортировка; механическое измельчение; расплав; магнитная, электромагнитная, магнитно-гидростатическая, электростатическая сепарация. Рассмотрим кратко суть каждого метода и технологического процесса обработки ОЭЭО.

Сортировка по крупности (грохочение) предусматривает направление электронного лома, содержащего частицы различного размера на грохот с размерами ячейки сита 20 мм, а затем – на ленточный транспортер, в конце разгрузочной части которого установлена наклонная стенка с зазором между верхним концом стенки и лентой транспортера. Куски лома определенного размера, минуя зазор, попадают на дальнюю от разгрузочного барабана транспортера плоскость и поступают в первую приемную емкость; остальные проваливаются в зазор и поступают на отсев во вторую приемную емкость.

Предварительная оптическая сортировка некоторых типов лома ОЭЭО основывается на смачивании смеси с водой и, с помощью вибропитателя вибропитателя осуществляют сепарацию частиц. Разработанная схема сортировки предусматривает смачивание исходного материала (1:1) в смесительном барабане, отделение полиэтилена в коническом классификаторе и извлечение резины вместе с поливинилхлоридом в отсадочной машине. Полимерная фракция содержит до 98 % полимера (с менее 0,1 % металлизированных продуктов); легкая фракция отсадочной машины - 99 % резины и ПВХ (менее 0,1 % металлической «фазы»), металли-

ческий концентрат (после разделения на концентрационном столе) - более 98 % металлов.

Для извлечения благородных металлов из электронного лома применяются гидрометаллургические методы, включающие технологические процессы выщелачивания сплавов, обработки щелочами и кислотами с переводом драгоценных металлов в растворимые комплексные соединения, электролиз в барабане в растворе содержащим йодид и гидроксид калия.

Высокоселективная магнитно-гидростатическая сепарация реализует разделение цветных металлов или компонентов сплава и позволяет получать обогащенный концентрат, исключая процесс плавки. Разделение происходит в гравитационных, а затем - центробежных сепараторах. Применяются три типа магнитных жидкостей с различной магнитной проницаемостью. В качестве магнитов используются электромагниты стандартные и сверхпроводящие.

Электромагнитная сепарация реализуется с применением следующих технических средств: наклонный перфорированный цилиндрический барабан с увеличивающейся к нижнему торцу площадью сечения отверстий с патрубками на каждом из них, расположенных кольцевыми рядами; магнитная система в виде неподвижных дугообразных электромагнитов, расположенных под барабаном между рядами патрубков; магнитная система с источником импульсного тока; питатель и приемники продуктов сортировки.

Электростатическая сепарация в поле вихревых токов во вращающемся барабане при наложении магнитного поля высокой частоты применяется для отделения магнитной и разделения немагнитной фракций после оптической сортировки и магнитно-гидростатической сепарации с получением разнородного качественно концентрата.

При использовании данных технологий в среднем переработка 4-5 кг лома в течение 10



Рисунок 2 – Многофункциональный сортировочный комплекс переработки ОЭЭО
Fig. 2 – Multifunctional sorting processing complex of E-waste

час реализует извлечение 95% серебра, 96% золота, 97% палладия.

Вышеназванные технологические процессы объединяются в многофункциональном сортировочном комплексе (рисунок 2).

На производственно-технических комплексах осуществляется металлургический и гидрометаллургический передел обработанных вторичных материальных ресурсов из ОЭЭО.

Экотехнопарки как комплексные объекты по обработке и утилизации отходов могут объединять в себе всю систему обращения, начиная от сбора ОЭЭО и, заканчивая, выпуском продукции из извлеченных ценных вторичных материальных ресурсов, разработкой инновационных технологий утилизации и обезвреживания отходов, техники, оборудования для этих целей, представляя собой научно-производственный кластер.

Драгоценные металлы, извлеченные из электронного лома (золото, серебро, платина, палладий), возвращаются в электронную промышленность или превращаются в слитки для продажи на свободном рынке. Стекло, полимеры, резина после измельчения и/или брикетирования используются при выпуске продукции. Обработанные цветные металлы и сплавы (олово, медь, свинец, алюминий, кадмий, ртуть) реализуются по рыночным ценам.

Целью создания системы эффективного обращения с ОЭЭО является формирование современной экологически безопасной и экономически эффективной комплексной системы управления замкнутым циклом обращения данных отходов, а также использования извлеченных из них вторичных материальных ресурсов в различных отраслях и секторах экономики, включая товарно-сырьевые биржи и электронные торговые площадки.

В рамках конфигурации инновационной системы определены:

1. Разработка информационно-аналитической системы, позволяющей вести объективный учет и мониторинг источников, количества образования ОЭЭО, их обращения до преобразования в различные виды ценного вторсырья.

2. Разработка типового экологически безопасного научно-производственного комплекса по сбору, обработке, утилизации ОЭЭО для городского округа.

3. Разработка типовой региональной (муниципальной) системы раздельного сбора ОЭЭО у населения и хозяйствующих субъектов.

4. Формирование эффективного организационно-финансового механизма расширенной ответственности товаропроизводителей электронной и электробытовой техники и оборудования.

Концептуальные отличия предлагаемой организационно-технической системы от аналогичных, принятых в территориальных схемах обращения с отходами (не в части ТКО) представлены в таблице 3.

ВЫВОДЫ

В работе впервые сформирована конфигурация организационно-технической системы управления обращением ресурсной составляющей ОЭЭО.

Основными результатами предлагаемой организационно-управленческой системы являются, с одной стороны, обеспечение утилизации ОЭЭО на уровне ведущих стран (не менее 90%), возврат в экономический цикл востребованного сырья, с другой, обеспечение экологической безопасности территорий от подобного рода опасных и токсичных техносферных объектов, исключение размещения ОЭЭО на полигонах ТКО и несанкционированных свалках, повышение уровня комфортности и благоприятности городской среды.

Таблица 3 – Концептуальные отличия предлагаемой организационно-технической схемы от действующих территориальных схем обращения отходов
Table 3 – Conceptual differences of the proposed organizational and technical scheme from the existing territorial waste management schemes

Параметры	Действующие схемы	Предлагаемая схема
Вид деятельности	Обращение с опасными отходами	Обращение с ресурсной составляющей отходов (ВМР, ВЭР), вторичным сырьём
Задействованные приоритеты иерархии обращения с отходами	Обработка, утилизация, обезвреживание, а также экологически опасный вид обращения: размещение (хранение + захоронение)	<i>Доминантные:</i> максимальное использование сырья, предупреждение, сокращение образования, снижение класса опасности. <i>Обеспечивающие:</i> обработка, утилизация, обезвреживание
Область регулирующего законодательства	Преимущественно экологическое и санитарно-эпидемиологическое	Преимущественно: экономического развития, промышленной политики, технического регулирования
Идентификация предмета деятельности	Отходы производства и потребления. Вторичные ресурсы - как отходы, подлежащие переработке	Изначальная идентификация использованных предметов, веществ в источниках образования в качестве материально-сырьевых ресурсов
Преобладающая схема сбора	Преимущественно смешанная	Селективный сбор, изолированное накопление, обработка в источниках образования
Отходо-перерабатывающая технологическая база	КПО как объекты сортировки преимущественно ТКО 4 и 5 класса опасности, полигоны хранения хвостов сортировки, объекты энергетической утилизации	Многофункциональные сортировочные комплексы приема всех видов городских отходов 3-5 классов опасности, а также ОЭЗО с полным набором технологических операций обработки до стандартизированного вторсырья. Производственно-технические комплексы выпуска продукции с его применением.
Схемы перевозки	Преимущественно автомобильный транспорт	Смешанные автомобильные и железнодорожные перевозки
Расположение источников экологической опасности	Населенный пункт, пред-приятия переработки, термоутилизация, полигоны хвостов сортировки	Инфраструктура по обработке, утилизации (в т.ч. энергетической), обезвреживания отходов вне черты населенных пунктов

Необходимым условием эффективного внедрения системы является налаженный процесс геотехнического, инструментально-лабораторного, геоинформационного мониторинга обращения данных опасных отходов.

Материалы и результаты исследований могут быть использованы при формировании региональных, отраслевых концепций безопасного обращения использованного электронного, электротехнического оборудования, территориальных схем планирования, в ходе актуализа-

ции территориальных схем обращения с отходами в субъектах Российской Федерации в части отдельного сбора, накопления, обработки, повторного использования ОЭЗО.

Создание и развитие систем экологически безопасного обращения с ресурсной составляющей подобных отходов служит значимым фактором предупреждения экологических и санитарно-гигиенических угроз и рисков, возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цховребов Э.С., Лебин А.Н., Белоусов В.Г. Новейшая история развития природоохранной деятельности в России // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2012. Т. 18. № 2. С. 192–196.
2. Цховребов Э.С., Ниязгулов Ф.Х. Оценка уровня экологической безопасности регионов на основе нечётких показателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 5 (109). С. 60–68.
3. Tskhovrebov E., Velichko E., Niyazgulov U. Planning measures for environmentally safe handling with extremely and highly hazardous wastes in industrial, building and transport complex. *Materials Science Forum*. 2019. Т. 945. Pp. 988–994.
4. Суздалева А.Л. Экологическая глобалистика и устойчивое развитие на этапе техногенной трансформации биосферы // Геоэкология. инженерная геология. гидрогеология. Геокриология. 2020. № 1. С. 6–11.
5. Рудакова Л.В., Чугайнова А.А. Анализ технологий утилизации электронных отходов // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды». Том III. Белгород. 2018. С. 125–131.
6. Гофман В.Р., Попов А.А. К вопросу об управлении отходами потребления электронной техники в системе экологического менеджмента в Российской Федерации // Вестник Южно-уральского государственного университета. 2010. № 11. С. 44–51.
7. Акаев О., Войнаровская А., Желязный С., Жуковский В. Термическая переработка отходов электронной промышленности // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А. Некрасова. 2012. Т. 18. № 2. С. 8–10.
8. Xianlai Zeng, John A. Mathews, and Jinhui Li. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining // *Environmental Science & Technology*. Publication Date (Web): April 4, 2018 (Article). Pp. 121–125.
9. Mehmet Ali Kücükler, Jean-Baptiste Nadal, Kerstin Kuchta. Comparison between batch and continuous reactor systems for biosorption of neodymium (nd) using microalgae // *International journal of plant, animal and environmental sciences*. 2016. Pp. 197–203.
10. Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P. The Global E-waste Monitor – 2017 // United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017. 53 p.
11. Ладыгин К.В. Стомпель С.И., Спектор Ю.Л. Переработка электронного лома по технологии термической деструкции // ТБО. 2018. № 6. С. 30–31.
12. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*. 2017. No 127. P. 9.
13. Hart, J., Adams, K. and others. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP*. 2019. No 80. Pp. 619–624.
14. Domenech T., Bahn-Walkowiak B. Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States, *Ecological Economics*, 2019. Vol.155. Pp 7–19.
15. Ehresman T., Okereke C. Environmental justice and conceptions of the green economy *International Environmental Agreements: Politics, Law & Economic*, 2015. Vol. 15. Iss. 1. Pp. 13–27.
16. Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N. Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. A Report of the Int. Resource Panel. United Nations Environment Programme, Kenya. 2020. URL: <https://www.unep.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>.
17. Goldstein B., Rasmussen F. LCA of Buildings and the Built Environment. *Life Cycle Assessment. Theory and Practice*. 2018. Chapter 28. Pp. 695–720.
18. Bartoletto A. Waste prevention policy and behaviour. New approaches to reducing waste generation and its environmental impacts. *Routledge studies in waste management and policy*. L.; N.Y.: Routledge. 2015. P. 30.
19. Robin Murray. Zero waste. Greenpeace Environmental Trust. 2002. 211 p.
20. Elgizawy S., El-Haggar S., Nassar K. Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study. *Procedia Engineering*. Vol. 145. 2016. Pp. 1306–1313.

CONFIGURATION OF A RESOURCE-SAVING ELECTRONIC EQUIPMENT CIRCULATION SYSTEM IN ORDER TO CREATE A SAFE LIVING ENVIRONMENT

© 2023 E.S. Tskhovrebov¹, F.H. Niyazgulov²

¹FSBI Research Institute of Emergency Situations (FC), Moscow, Russia

²Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russia

Abstract. The purpose of this work was to create a configuration of a resource-saving system for handling used household and electronic equipment that implements the state of environmental safety of territories, the formation of a comfortable, safe, favorable environment for people's life, the protection of the population and territories from possible threats of man-made and natural emergencies. The main objectives of the conducted research are defined: collection, generalization, systematization of materials, composition of research results in the field of methods, methods, technologies for collecting, sorting, processing electronic scrap; comparative analysis of the component composition of electronic and household appliances, devices, installations, automation and measurement equipment that have completed their service life; system analysis of methods and technologies that ensure maximum extraction of useful components from electronic waste for their reuse as secondary raw materials in economic turnover; development of the configuration of the organizational and technical system and technological infrastructure of the entire cycle of waste management of electronic and electrical equipment, implementing ensuring the state of protection of people, the natural environment from the negative effects of hazardous technosphere objects, the favorable and comfortable living environment of citizens. The results of the conducted research can be used in the development and updating of territorial waste management schemes, territorial and sectoral schemes for planning waste processing infrastructure, industrial and technical complexes for collecting, accumulating, and processing these specific wastes.

Keywords: environmental safety, comfort, favorability, vital activity, waste of electrical and electronic equipment.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-107-116

REFERENCES

1. *Tshovrebov E.S., Lebin A.N., Belousov V.G.* Noveishaya istoriya razvitiya prirodoohrannoi deyatel'nosti v Rossii [The newest history of development of nature protection activity in Russia]. Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova [Bulletin of N.A. Nekrasov Kostroma State University]. 2012. Vol.18. No. 2. Pp. 192-196. (In Russ.).
2. *Tshovrebov E.S., Niyazgulov F.H.* Otsenka urovnya ekologicheskoy bezopasnosti regionov na osnove nechetkih pokazateley [Assessment of the level of environmental safety of regions based on fuzzy indicators]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk [I]. 2022. Vol. 24. No. 5 (109). Pp. 60-68. (In Russ.).
3. *Tskhovrebov E., Velichko E., Niyazgulov U.* Planning measures for environmentally safe handling with extremely and highly hazardous wastes in industrial, building and transport complex. Materials Science Forum. 2019. T. 945. Pp. 988-994.
4. *Suzdaleva A.L.* Ekologicheskaya globalistika i ustoychivoe razvitie na etape tehnogennoy transformatsii biosfery [Ecological globalistics and sustainable development at the stage of technogenic transformation of the biosphere]. Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya. Geokryologiya [Geoecology. engineering geology. hydrogeology. Geocryology]. 2020. No.1. Pp. 6-11. (In Russ.).
5. *Rudakova L.V., Chugaynova A.A.* Analiz tehnologiy utilizatsii elektronnykh othodov [Analysis of e-waste disposal technologies]. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsionnye puti resheniya aktualnykh problem prirodopol'zovaniya I zashity okruzhayushey sredy» [Materials of the reports of the International Scientific and Technical Conference «Innovative ways to solve urgent problems of nature management and environmental protection»]. Vol.III. Belgorod.2018.Pp.125-131
6. *Gofman V.R., Popov A.A.* K voprosu ob upravlenii othodami potrebleniya elektronnoi tehniki v sisteme ekologicheskogo menedzhmenta v Rossiyskoy Federatsii [On the issue of waste management of Electronic equipment consumption in the Environmental Management System in the Russian Federation]. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of South-Ural State university]. 2010. No. 11. Pp. 44-51.

7. *Akaev O., Voinarovskaya A., Zheleznyi S., Zhukovskiy V.* Termicheskaya pererabotka othodov elektronnoy promyshlennosti [Thermal processing of electronic industry waste] Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.A. Nekrasova [Bulletin of N.A. Nekrasov Kostroma State University]. 2012. Vol. 18. No. 2. Pp. 8-10. (In Russ.).
8. *Xianlai Zeng, John A. Mathews, and Jinhui Li.* Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining // Environmental Science & Technology. Publication Date (Web): April 4, 2018 (Article). Pp. 121-125.
9. *Mehmet Ali Kücükler, Jean-Baptiste Nadal, Kerstin Kuchta.* Comparison between batch and continuous reactor systems for biosorption of neodymium (nd) using microalgae // International journal of plant, animal and environmental sciences. 2016. Pp. 197-203.
10. *Baldé C.P., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P.* The Global E-waste Monitor – 2017 // United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017. 53 p.
11. *Ladygin K.V., Stompely S.I., Spektor Yu. L.* Pererabotka elektronnoy loma po tehnologii termicheskoy destruktzii [Processing of electronic scrap by thermal destruction technology]. Zhurnal TBO [TBO magazine]. 2018. No. 6. Pp. 30-31.
12. *Kirchherr J., Reike D., Hekkert M.* Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation & Recycling. 2017. No 127. P. 9.
13. *Hart, J., Adams, K. and others.* Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. Procedia CIRP. 2019. No 80. Pp. 619–624.
14. *Domenech T., Bahn-Walkowiak B.* Transition Towards a Resource Efficient Circular Economy in Europe: Policy Lessons from the EU and the Member States, Ecological Economics, 2019. Vol.155. Pp 7-19.
15. *Ehresman T., Okereke C.* Environmental justice and conceptions of the green economy International Environmental Agreements: Politics, Law & Economic, 2015. Vol. 15. Iss. 1. Pp. 13-27.
16. *Hertwich E., Lifset R., Pauliuk S., Heeren N.* Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. A Report of the Int. Resource Panel. United Nations Environment Programme, Kenya. 2020. URL: <https://www.unep.org/resources/report/resource-efficiency-and-climate-change-material-efficiency-strategies-low-carbon>.
17. *Goldstein B., Rasmussen F.* LCA of Buildings and the Built Environment. Life Cycle Assessment. Theory and Practice. 2018. Chapter 28. Pp. 695–720.
18. *Bartoleto A.* Waste prevention policy and behaviour. New approaches to reducing waste generation and its environmental impacts. Routledge studies in waste management and policy. L.; N.Y.: Routledge. 2015. P. 30.
19. *Robin Murray.* Zero waste. Greenpeace Environmental Trust. 2002. 211 p.
20. *Elgizawy S., El-Haggar S., Nassar K.* Slum Development Using Zero Waste Concepts: Construction Waste Case Study. Procedia Engineering. Vol. 145. 2016. Pp. 1306–1313.

Eduard Tshovrebov, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Center of the Research Institute of the Ministry of Emergency Situations of Russia. E-mail: rebrovstanislav@rambler.ru
Filyuz Niyazgulov, adyunkt, Russian university of transport (RUT MIIT). E-mail: transgeo@yandex.ru

УДК 662.756.3

ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ИЗ КОРОДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ДЛИТЕЛЬНОГО СРОКА ХРАНЕНИЯ МЕТОДОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ОЖИЖЕНИЯ© 2023 Ю.В. Куликова¹, Н.И. Орлов¹, С.А. Сухих¹, О.О. Бабич¹, В.Н. Коротаев²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Г. Пермь, Россия

Статья поступила в редакцию 15.02.2023

Целлюлозно-бумажная промышленность приводит к образованию значительного количества кородревесных отходов (КДО), которые в России не перерабатываются, а размещаются в короотвалах, что приводит к негативному воздействию на объекты окружающей среды, в т.ч. на климат планеты. В данной статье представлена оценка ресурсного потенциала кородревесных отходов длительного срока хранения на основе результатов физико-химического и термического анализа. Было обнаружено, что КДО при длительном хранении подвергаются деструкции достаточно слабо, при этом доля углерода в составе КДО остается практически неизменной (на уровне 48,4%). Доказано что исходные КДО отличаются высокой влажностью (60,8% до 74,9%), низкой теплотворной способностью (14,56 МДж/кг на асв) и умеренной зольностью (9,8% асв). Для влажной биомассы, наиболее подходящим методом конверсии можно считать гидротермальное ожигение, позволяющее получать жидкое топливо без предварительной сушки, т.к. вода в данном процессе выступает в качестве растворителя и источника радикалов. Средний выход биотоплива при гидротермальной конверсии КДО составляет 10%, при этом применение аммонийных квасцов в качестве катализаторов обеспечило увеличение выхода нефти более чем в 2 раза до 28,4%, применение сульфата меди привело к увеличению выхода до 16,1%. Полученная бионефть отличалась высокой степенью насыщения (атомарное соотношение Н/С составило 1,3), но при этом содержание кислорода было также высоко (на уровне 22% мас.). Содержание серы и азота было минимально (0,6 и 0,2% соответственно). В составе топлив преобладали кислородсодержащие ароматические соединения фенольной группы (62%), циклическими сложными эфирами (19,8%), а также жирными кислотами, на долю которых приходится 12,9%.

Ключевые слова: биомасса, кородревесные отходы, гидротермальное ожигение, биотопливо.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-117-127

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00064,
<https://rscf.ru/project/23-24-00064/>*

ВВЕДЕНИЕ

Россия является одним из мировых лидеров по производству целлюлозно-бумажной продукции из товарной древесины, что является одной из причин остроты проблемы утилизации кородревесных отходов (КДО) [1]. Согласно официальной статистике объем в России образова-

Куликова Юлия Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Микробиологии и биотехнологий».

E-mail: kulikova.pnpu@gmail.com

Орлов Николай Игоревич, магистр 1 курса направления 06.04.01 «Биология».

Сухих Станислав Алексеевич, доктор технических наук, руководитель лаборатории «Микробиологии и биотехнологий». E-mail: stas-asp@mail.ru

Бабич Ольга Олеговна, доктор технических наук, директор НОЦ «Промышленные биотехнологии».

E-mail: olich.43@mail.ru

Коротаев Владимир Николаевич, доктор технических наук, декан факультета химических технологий, промышленной экологии и биотехнологий, ПНИПУ.

E-mail: korotaev@pnpu.ru

ния КДО в настоящий момент составляет около 2 млн т, из которых только 2% перерабатывается [2]. Еще большую проблему представляют объекты накопленного экологического ущерба – короотвалы, заполненные кородревесными отходами значительного срока хранения высокой влажности. В мире проблема утилизации свежих КДО не вызывает затруднений, так КДО в Китае, США и странах ЕС находят применение в качестве источника энергии [3, 4].

В России процесс внедрения принципов циркулярной экономики, максимального снижения ресурсоемкости и климатической нагрузки начат не так давно. При этом одной из целей программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» является развитие производства биоэнергии и биотоплива и увеличение переработки низкосортных отходов древесины [5]. В настоящее время в России на энергетическую утилизацию и на использование для сельскохозяйственных нужд направляется не более 5% отходов окорки древесины [2], что в первую оче-

редь связано с большим транспортным разрывом между источниками образования отходов и потенциальными потребителями продуктов переработки.

Основной технологией утилизации по-прежнему является размещение в коротвалах, где накоплено на сегодняшний день десятки миллионов кубических метров КДО. Короотвалы представляют значительную экологическую угрозу, т.к. приводят к закислению почвы, загрязнению водоемов экстрактами и продуктами гниения коры, являются источником парниковых газов, легко воспламеняются в засушливые периоды [1,5]. При этом реальный опыт наблюдения за динамикой деструкции КДО в окружающей среде показал, что даже после более чем 80-летнего хранения полной гумификации древесины не происходит [6]. Данный факт подтверждает важность поиска технических решений переработки КДО, в т.ч. длительного срока хранения.

Анализ литературных данных показал, что в мире в настоящий момент для утилизации КДО целлюлозно-бумажной промышленности применяются три категории методов: химические, биологические и термические.

Биологический способ переработки КДО является наиболее распространенным, особенно для отходов длительного хранения. Он основан на процессах анаэробного сбраживания и компостирования [7-9]. Для реализации метода могут быть использованы различные технические решения (биобарабаны, биотуннели, полевое компостирование) и технологические подходы с использованием специализированных видов организмов (микромикеты, бактерии, кольчатые черви) [10, 11]. Продукция может быть использована для промежуточной изоляции отходов на полигонах, рекультивации нарушенных земель, озеленения или в качестве удобрения для улучшения структуры пахотного слоя и стимуляции роста растений [1, 12]. Основной проблемой данной технологии можно считать ее низкую маржинальность и длительность процесса.

Из категории химических методов переработки КДО в литературе описаны экстракция и гидролиз с получением пищевых, кормовых и промышленных ценных компонентов и веществ (спирт, дрожжи, углекислый газ, лигнин, ванилин) [13, 14]. Но данные методы не находят широкого практического внедрения и ограниченно применимы для КДО длительного хранения.

Термические методы переработки КДО представлены сжиганием, пиролизом и газификацией, а также гидротермальными методами [15, 16]. Проблема всех традиционных методов термической обработки заключается в необходимости предварительной сушки, поскольку отходы характеризуются повышенной влажно-

стью (до 60 %) [17]. Перспективным направлением термических методов переработки КДО являются гидротермические методы, обеспечивающие переработку влажной биомассы без предварительной сушки. При это гидротермальная карбонизация обеспечивает выход биоугля, а гидротермальное ожигание жидкого топлива. Так как жидкое топливо имеет больший спрос на рынке гидротермальное ожигание можно считать более перспективным методом. Процесс ГТО целлюлозной биомассы проводится при температуре 260–310 °С и давлении 3–20 МПа, а соотношение субстрат: вода поддерживают на уровне 1:5 – 1:20 [17]. Выход синтетического нефти по литературным данным составляет 10–30 % [18, 19]. Основным преимуществом гидротермальных методов является их применимость к влажной биомассе, так как вода не мешает процессу, а участвует, выступая в качестве донора ионов водорода, а в некоторых случаях и в качестве полярного растворителя [17].

На основании литературных данных установлено, что эффективность гидротермальных процессов существенно зависит от теплотворной способности, зольности и элементного состава биомассы. В литературных данных встречается достаточно много данных о составе КДО, но данные о составе сильно разнятся в зависимости от технологии ЦБП и исходного сырья, при этом информация о составе отходов длительного срока хранения практически отсутствует. В связи с чем, комплекс исследований по оценке эффективности применения гидротермальной конверсии КДО различного срока хранения должен быть начат с оценки физико-химических и термических свойств КДО.

Данная работа посвящена оценке эффективности применения гидротермальной конверсии КДО различного срока хранения. Новизна и практическая ценность данной работы заключается в том, что впервые сравниваются свойства КДО различных сроков хранения, оценивается целесообразность применения гидротермального ожигания для конверсии КДО.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Материалы

Отбор проб коры и древесных отходов был проведен на короотвале, расположенном в Пермском крае (город Краснокамск). Накопление КДО происходило в период с 1936 по 2005 год (до закрытия целлюлозно-бумажного предприятия). Объект по утилизации промышленных отходов расположен на расстоянии 120 м от жилого района города Краснокамска, в основном на территории прибрежно-защитного пояса Воткинского водохранилища. Высота отвала

варьируется от 2 до 21 м. В массиве короотвала в настоящий момент накоплено 1,5 млн.м³ или 1,2 млн. тонн коры и древесных отходов, занимаемая площадь составляет 22,3 га. Отбор проб осуществлялся путем бурения в трех точках. Бурение проводилось механическим керновым методом на установке УРБ-2А, диаметр шнека 127 мм. После доставки КДО подвергались сушке и измельчению с использованием ножевой дробилки.

2.2. Методика оценки свойств КДО и биотоплива

Анализ ресурсного потенциала КДО проводился по следующим параметрам: рН, влажность, потери при прокаливании, элементный состав и термические свойства на основании синхронного термического анализа.

Анализ бионефти проводили с использованием следующих методик: оценка элементного состава, анализ фракционного состава на основании синхронного термического анализа в среде аргона, оценка состава на основании ЯМР-спектроскопии и газовой хроматографии с масс-спектрометрией.

Водородный показатель определяли потенциометрическим методом с использованием рН-тестера (Эконис-Эксперт, Москва, Россия). Влажность определяли гравиметрически путем сушки при 104°C до постоянной массы. Потери при прокаливании (ПП) определяли гравиметрически путем прокалывания при 550°C, аналогично методу, описанному в ASTM-D7348 [20].

Элементный анализ бионефти и исходных КДО проводили с использованием CHNS-элементного анализатора (Elementar Analysensysteme, Vario EL Cube, Германия). Каждый образец был исследован в трех повторностях.

Для оценки термических свойств КДО использовался синхронный термический анализ. Оценку термических свойств КДО проводили на воздухе. Исследования проводились на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449C Jupiter.

Вещественный состав углеводов бионефти определяли методом ГХ/МС в соответствии с ГОСТ ASTM D5307, D2887, D3710. Образцы биомасла растворяли в дихлорметане и анализировали с помощью GC/MS Agilent 7890B-5977A. Условия обнаружения: электронный удар, энергия ионизации - 70 эВ, расход газа He - 1 мл/мин, колонка HP-1 МС, температура испарителя - 350°C, температура ввода - 320°C, объем пробы - 0,05-0,1 мкл. Температурные программы выбирались в зависимости от образца и требуемой точности разделения.

ЯМР-спектроскопию проводили на спектрометре Bruker Avance III HD (400 МГц ¹H, 101

МГц ¹³C). Для анализа нефтепродуктов использовали дейтерированный хлороформ (CDCl₃). Химические сдвиги определяли относительно гексаметилдисилоксана - ¹H: 0,07 ppm в CDCl₃, 0,28 ppm в D₂O или относительно остаточного сигнала растворителя CDCl₃ ¹H: 7,26 ppm, ¹³C: 77,16 ppm, и температуры во время измерения - 40°C. [21-23].

2.3. Порядок проведения процесса гидротермального ожижения

Исследования проводились по схеме, показанной на рисунке 1. Процесс ГТО проводили в реакторе автоклавного типа (Eartha Zhang's, Китай), изготовленном из нержавеющей стали, объемом 300 мл и оснащенном системой электрического нагрева. Реактор также имел магнитную мешалку, манометр и термопару. Средняя скорость нагрева составляла 10 градусов в минуту. Температура во всех экспериментах варьировалась 240-280 °С, время проведения процесса 20 мин, давление 3,5 МПа, соотношение сырья и воды 1:10 авс.

После проведения процесса пульпа из реактора подвергалась разделению с использованием бумажного фильтра с отделением твердого угольного остатка. Жидкая фаза подвергалась экстрагированию с использованием дихлорметана. Водная фаза и дихлорметан разделялись с использованием делительной воронки. Отгонка дихлорметана осуществлялась с использованием ротационного испарителя.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Результаты физико-химического анализа КДО

Результаты физико-химического анализа КДО представлены в таблице 1 и на рисунке 2. Анализ данных таблицы 1 показал, что КДО, отличаются высокой влажностью на уровне от 60,8% до 74,9% (среднее значение составило 68,7%). Анализ динамики влажности показал, что верхний слой кородревесных отходов существенным образом подсыхает, что приводит к более низким значениям влажности у более молодых КДО (располагаются в верхних слоях массива). Далее по телу массива вариативность влажности находится в пределах погрешности и не зависит от срока хранения отходов.

Существенного изменения содержания основных органических соединений при хранении отходов, также не было выявлено. Потери при прокаливании, как интегральный параметр, характеризующий долю органических соединений, не претерпевал существенных изменений в теле массива, лишь в верхних слоях мы видим



Рисунок 1. – Порядок проведения процесса гидротермального ожигения КДО

Таблица 1. – Результаты физико-химического анализа образцов КДО

Срок хранения, лет	Влажность, %	рН	ПП, %	Содержание элементов, % асв.				
				С	Н	N	S	O
9	60,8±4,3	6,1±0,3	69,2±2,8	46,2±1,9	5,9±0,5	0	0,21±0,015	38,8±1,2
10	65,2±2,6	6,9±0,3	98,9±1,9	49,7±1,5	6,3±0,1	0,23±0,01	0,89±0,04	41,8± 2,5
15	67,8±1,4	7,0±0,4	93,0±3,7	49,0±0,5	6,3±0,3	0,16± 0,01	0,93±0,06	36,6±2,6
17	69,6±4,2	7,0±0,3	91,9±3,7	49,2±3,4	6,3±0,1	0,23± 0,02	1,23± 0,03	34,8± 2,8
29	71,3± 2,9	6,6±0,2	93,5±0,9	48,5±1,9	5,9±0,4	0,65±0,03	0,88±0,05	37,5±2,3
40	69,9±1,4	4,7±0,2	84,3±2,5	44,1±0,9	5,1±0,3	1,3±0,09	0,30±0,02	33,4±1,7
50	74,9±3,8	6,6±0,3	91,3±4,6	49,6±2,0	6,2±0,2	0,55±0,03	0,47±0,03	34,5±2,1
60	74,8±3,0	6,2±0,1	92,3±6,5	49,1±1,0	6,2± 0,3	0,59±0,02	0,52±0,03	35,9±0,4
67	68,0±5,4	6,4±0,5	93,1±3,7	49,3±3,0	6,0±0,2	0,66± 0,04	0,23±0,02	36,9±2,2
73	71,5± 2,9	7,0±0,3	96,5±3,9	49,6±3,0	6,1±0,4	0,61±0,04	0,13±0,01	40,1±2,4
78	73,0±2,0	7,8±0,2	94,5±4,7	48,9±2,0	6,2±0,5	0,56±0,02	0,14±0,01	38,8±0,8
82	74,6±2,8	7,0±0,4	87,7±3,5	48,4±1,5	5,3±0,2	0,35±0,02	0,23±0,01	33,5±2,0
85	73,1±2,9	7,6±0,6	86,5±6,9	47,9±1,9	5,4±0,3	0,38± 0,02	0,26± 0,02	32,5±1,0

меньшее значение параметра, что связано с процессами выщелачивания органических соединений атмосферными осадками. Резкое снижение значения потерь при прокаливании для отходов старше 73 лет можно связать с тем фактом, что именно на этой глубине (13 м) при изменении водного баланса территории наблюдается стояние фильтрата. Среднее значение потерь при

прокаливании составило 90,2%. Среднее содержание углерода составило 48,4%, а кислорода 36,5% по массе (асв). Усреднённая брутто формула биомассы $C_6H_9O_{3,5}$, что фактически совпадает с формулой целлюлозы $(C_6H_{10}O_5)_n$. Указанные данные еще раз подтверждают, что за более чем 70 летний период хранения КДО не претерпевают существенных структурных изменений.

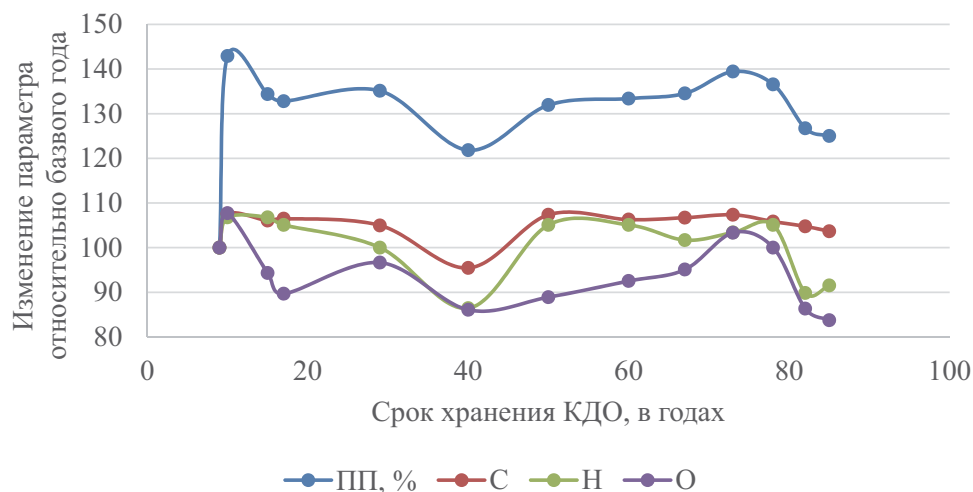


Рисунок 2. - Изменение физико-химических параметров КДО относительно базового года (9 лет хранения)

Низкая эффективность процессов гумификации в массиве короотвала связана отсутствием кислорода и наличием ингибирующих веществ, например лигнинов, танинов и их производных.

Для оценки термических свойств пробы КДО были проанализированы с использованием синхронного термического анализа в кислородной среде (таблица 2). Абсолютно все образцы продемонстрировали двухступенчатую деструкцию

Таблица 2. – Оценка термических свойств КДО

Время хранения отходов, лет	Количество стадий	t ₁	t ₂	tmax	ВТС, КДж/г
9	1	157	376	332	13,21
	2	376	600	438	
10	1	156	376	330	14,24
	2	377	600	478	
15	1	152	364	323	13,93
	2	364	600	489	
17	1	146	380	295	13,84
	2	380	600	450	
29	1	150	371	335	15,23
	2	372	625	386	
40	1	172	364	329	13,97
	2	365	600	535	
50	1	160	378	338	15,38
	2	379	600	391	
60	1	160	376	336	15,05
	2	375	601	378	
67	1	164	382	339	15,65
	2	386	600	402	
73	1	151	381	340	15,86
	2	382	600	423	
78	1	151	376	337	15,39
	2	376	600	390	
82	1	158	372	335	14,483
	2	372	600	407	
85	1	158	380	336	13,102
	2	380	600	437	

в кислородных условиях с максимальной скоростью деструкции на уровне 20-27%/минуту при температуре 330-349°C. Первый пик при температуре до 160°C связан с потерей влаги образцами. Второй пик следует связать с деструкцией основной массы органических соединений гемицеллюлозы и целлюлозы. Средняя высшая теплота сгорания составила 14,56 КДж/г, при этом она существенным образом не меняется с течением времени (рисунок 3), все изменения находятся в пределах погрешности метода (отклонение от среднего значения не превышает 10%).

3.2. Результаты гидротермального охижения КДО

Исследования по гидротермальному охижению проводились с использованием реактора автоклава при температуре 260 градусов, времени

воздействия 20 минут, давлении 4 МПа. Доза сырья в стандартном опыте составляла 10 грамм на 100 мл воды. Так как существенной разницы между КДО различного срока хранения не выявлено, исследования по гидротермальному охижению проводились на усредненной пробе. Эффективность процесса и выход различных продуктов определяли гравиметрически. Результаты исследования представлены в таблице 3 и на рисунке 4.

На основании представленных материалов можно увидеть, что при конверсии усредненной пробы КДО мы видим достаточно маленький выход бионефти, что связано с тем, что в составе кородревесных отходов преобладают полисахариды типа целлюлозы и гемицеллюлозы, конверсия которых приводит к образованию органических кислот, спиртов и альдегидов, не вносящих существенного вклада в выход био-

Рисунок 3. – Изменение высшей теплоты сгорания КДО за 85 лет хранения

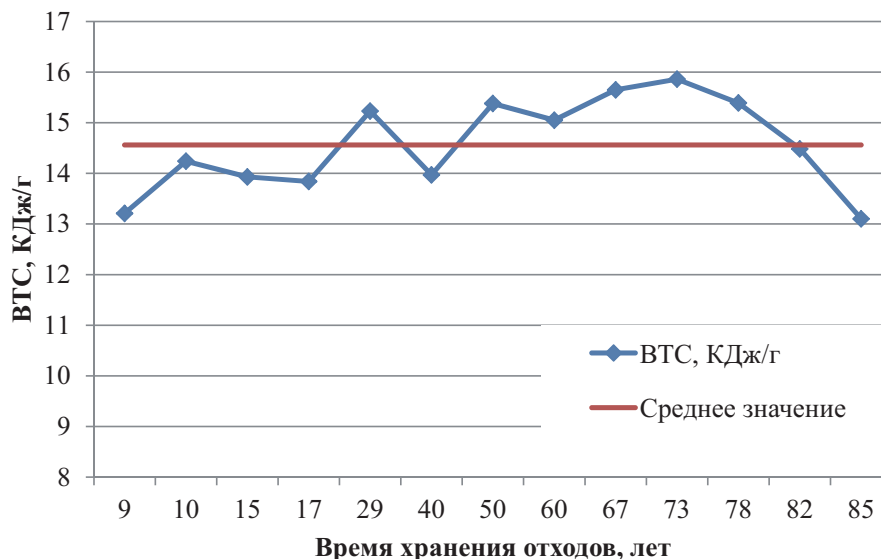


Таблица 3. – Результаты гидротермального охижения образцов КДО

Условия процесса	Применение каталитических систем	Выход бионефти, %	Выход угля, %	Потери с водной и газовой фазой, %
260 град.С, 4,6 МПа, 1:10, 20 минут	нет	6,0±0,8	25,2±2,4	68,8±7,1
260 град.С, 4,6 МПа, 1:10, 20 минут	Аммиачные квасцы 2 г	28,4±2,8	38,9±4,5	32,7±3,5
260 град.С, 4,6 МПа, 1:10, 20 минут	Al ₂ O ₃ 2 г	6,6±1,1	60,2±4,8	33,2±2,9
260 град.С, 4,6 МПа, 1:10, 20 минут	CuSO ₄	16,1±2,3	42,2±3,7	41,7±4,3
280 град.С, 6,4 МПа, 1:10, 30 минут	КОН 5,6 грамма,	13,1±3,5	5,7±1,0	81,2±9,4
280 град.С, 6,4 МПа, 1:10, 30 минут	КОН 4 г, NaHCO ₃ 3 г	11,0±2,6	10,5±1,3	78,5±7,2

топлива. При этом применение щелочного гомогенного катализа не приводит к увеличению выхода целевого продукта, а увеличивает выход водорастворимых компонентов на 18-20%, при этом доля угля снижается с 25,2% до 5,7-10,5%. На выход топлива позитивное влияние оказало применение в качестве катализатора аммонийных квасцов и сульфата меди, которые обеспечили увеличение выхода нефти в 4,7 и 2,7 раза соответственно.

Оценка элементного состава полученной бионефти (таблица 4) показала, что она отличается высоким содержанием углерода и незначительным содержанием кислорода (не более 24,3%). Содержание серы не превышало 0,35%, что соответствует малосернистым нефтям [24]. Усредненная брутто формула бионефти $C_{11}H_{17}O_3$. Исходя из брутто-формулы можно предсказать, что она представлена в основном фенольными соединениями.

Получаемая бионефть характеризуется очень сложным и многокомпонентным составом. Для усредненной оценки состава бионефти был проведен анализ с использованием ЯМР-

спектроскопии, позволяющей исследователям составить общее представление о типах присутствующих соединений. В то же время наиболее полную картину можно получить, объединив результаты углеродного и водородного анализа. Результаты ЯМР-спектроскопического бионефти (таблица 5) показали, что преобладающими компонентами бионефти являются ароматические углеводороды, но порядка 60% атомов углерода имеют связь не только с атомами водорода, а с гидроксильными, карбонильными и карбоксильными группами, а также углеродными заместителями различной природы. Количество ионов водорода, связанных с атомом кислорода, велико составило 56,1 (1H).

Данный факт достаточно закономерен, т.к. широко известно, что при гидролизе лигнина образуются кониферилловый, паракумарилловый и синапилловые спирты [25]. Результаты ЯМР-спектроскопии позволили выбрать надежный протокол проведения ГХ-МС анализа. Поскольку бионефть представляет собой многокомпонентную смесь, идентификация всего многообразия компонентов невозможна и не имеет практиче-

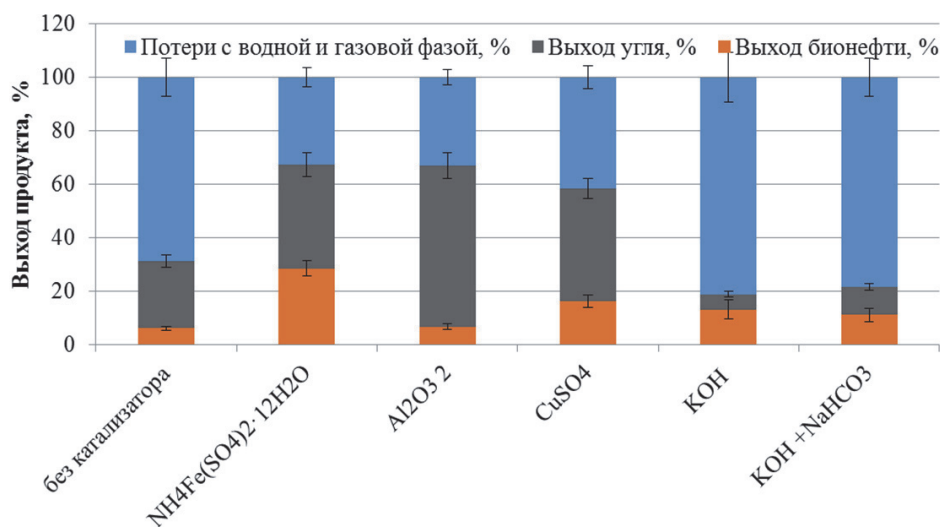


Рисунок 4. – Результаты гидротермального ожигения КДО различного срока хранения (усредненная проба)

Таблица 4. – Результаты анализа элементного состава бионефти

Условия процесса	Элементный состав, % асв				
	C	H	N	S	O
260 ^o C, 20 минут, 3,5 МПа, без катализатора	63,64±1,12	7,29±0,21	0,62±0,01	0,35±0,04	24,32±0,65
260 ^o C, 20 минут, 3,5 МПа, катализатор NH ₄ Fe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O - 2 г.	65,60±0,32	7,09±0,02	0,47±0,15	0,01±0,01	23,05±0,15
260 ^o C, 20 минут, 3,5 МПа, катализатор Al ₂ O ₃ ·2 г.	64,56±6,22	7,02±0,77	0,46±0,07	0,06±0,01	24,12±3,10
260 ^o C, 20 минут, 3,5 МПа, катализатор KOH+NaHCO ₃ ·2 г.	70,77±0,42	7,90±0,10	0,65±0,08	0,32±0,01	16,58±0,25

Таблица 5. Результаты ЯМР-спектроскопии бионефти

Тип соединений	Сдвиг	Содержание, масс. %
Водородный анализ (¹ H)		
COOH, CHO, ArOH	8,2-12,0	0,7
R-OH, -CH ₂ -O-R, алкены	4,2-6,0	13,22
R-CH ₂ -O-R, CH ₃ -O-R	3,0-4,2	14,2
R-CH ₂ -CH=O	2,0-3,0	27,97
Ароматические углеводороды, алкины	6,0-8,2	15,5
Водород алифатический	0-2,0	28,41
Углеродный анализ (¹³ C)		
Альдегиды и кетоны	220-180	5,23
Кислоты и их производные	180-160	3,60
Спирты, эфиры, сахара	160-105	1,81
Ароматические углеводороды чистые, без заместителей	140-125	17,53
Ароматические углеводороды	160-105	42,66
CH ₃ O группа в лигнине	60-55	6,12
Алифатические углеводороды	55-1	40,58

Таблица 6. Результаты ЯМР-спектроскопии бионефти

Вещество	Площадь, %	Доля вещества, в % от массы 10 преобладающих компонентов
Ванили	100	30,9
3-Метилциклопентан-1,2-дион (корилон)	63,97	19,8
2-Пропанон, 1-(4-гидрокси-3-метоксифенил)-	47,47	14,7
Тетрадекановая кислота	22,04	6,8
Гваякол	20,90	6,5
n-гексадекановая кислота	19,83	6,1
3,4-Диваниллилтетрагидрофуран	16,21	5,0
2-метокси-5-(1-пропенил) фенол (Изохавибетол)	12,40	3,8
Апоцинин	11,21	3,5
4- Этил гваякол	9,62	3,0

ского смысла. В связи с чем, было решено проанализировать первые десять пиков имеющих максимальную площадь. Результаты хроматографического анализа представлены в таблице 6

Результаты ГХ-МС показали, что преобладающими компонентами нефти являются фенолы и жирные кислоты. При этом преобладающим компонентом нефти является ванилин, относящийся к гидроксibenзальдегидам. Это вполне предсказуемо, поскольку КДО богаты лигнином, в процессе окисления которого в щелочной среде получают гваякол и ванилин путем [26].

Остальные преобладающие вещества КДО-топлива представлены фенольными спиртами (62% от массы преобладающих веществ), циклическими сложными эфирами (19,8%), а также жирными кислотами, на долю которых приходится 12,9%.

При этом большинство из преобладающих компонентов полученного биотоплива обладает высокой добавленной стоимостью и может с

успехом использоваться в различных ресурсных циклах. Так ванилин давно используется в пищевой промышленности в качестве ароматизатора. Гваякол и этил гваякол также используются в пищевой промышленности в качестве ароматической добавки (придают аромат бекона) [27]. 3-Метилциклопентан-1,2-дион (корилон) является одним из многих продуктов пиролиза лигноцеллюлозы и может быть использован в качестве ароматизатора (карамельный вкус и запах) при производстве пищевых продуктов и парфюмерии [28]. 3,4-Диваниллилтетрагидрофуран используют в качестве добавки при производстве спортивного питания, как вещество, способствующее наращиванию мышечной массы.

Данный факт позволяет нам сделать вывод, что получаемая бионефть в большей степени представляет ресурсную ценность в качестве сырья для производства продуктов с добавленной стоимостью, нежели сырья для производства товарного топлива. Данный факт нужно

учесть при проведении дальнейших исследований по гидротермальному ожигению КДО и подбору оптимальных катализаторов и условий, которые обеспечили бы максимальный выход целевых компонентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При переработке первичного сырья в товарную продукцию целлюлозно-бумажные предприятия производят древесные отходы, состоящие в основном из коры (60-70%). До 98% таких отходов размещается в окружающей среде без какой-либо предварительной обработки. Технология размещения КДО в короотвалах связана с техническими рисками неконтролируемого выброса загрязняющих веществ в окружающую среду [1].

Анализ физико-химических свойств КДО на примере отходов целлюлозно-бумажного предприятия, располагающегося в Пермском крае (г.Краснокамск), позволил установить, что отходы даже значительного срока хранения (80 лет и более) не претерпевают существенных изменений при хранении в короотвале. Данный факт подтверждается не существенным снижением показателя потерь при прокаливании (не более чем на 5% за более чем 80 лет хранения) и удельной калорийности отходов (отклонение от среднего значения для отходов 9-85 лет не превышало 10%). Минерализация КДО протекает медленно, что связано с наличием в составе отходов ряда ингибиторов биодеструкции.

Анализ термических свойств КДО позволил установить, что отходы отличаются высокой влажностью (61-75%) и низкой калорийностью (высшая теплота сгорания 14,51 МДж/кг). Это означает, что использование традиционных термических методов (пиролиз, сжигание, газификация) потребуют предварительной сушки отходов, что приведет к отрицательному или низкоэффективному энергетическому балансу.

В то же время, отходы отличаются низкой зольностью (в среднем 8,1%) и высоким содержанием углерода (в среднем 46,4%), при низком содержании азота (в среднем 0,4%) и серы (в среднем 0,3%). Данный факт позволяет прийти к выводу о перспективности переработки и утилизации больших объемов КДО методом гидротермального ожигения. Проведенные испытания по гидротермальной конверсии с применением гомогенного и гетерогенного катализа обеспечили удовлетворительный выхода бионефти (максимальный выход составил 28,4% при использовании аммиачных квасцов в качестве катализаторов). При этом основная часть биомассы подвергается конверсии с образованием водорастворимых соединений: органических кислот, альдегидов и спиртов.

Высокое содержание углеводов в форме целлюлозы и гемицеллюлозы и низкое содержание белков и жиров позволяет делать выводы о целесообразности смешения данного вида биомассы при проведении процессов гидротермального ожигения с иными источниками биомассы, отличающихся высоким содержанием белков (например, водорослями, осадками, избыточными илами или отходами соевого производства). Это позволит достичь синергетического эффекта за счет протекания процесса синтеза кетозаминов и продуктов их дальнейшего превращения по реакции Майяра, между углеводами и белками [29].

Наличие значительного количества компонентов, обладающих высокой ценностью подтверждает целесообразность вышеупомянутой идеи организовать многостадийную гидротермальную конверсию КДО с получением ценных химических соединений и жидкого топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимов, А.Ю. Изучение свойств и микробиологического состава коры и древесных отходов Краснокамского короотвала / А.Ю. Максимов, Ю.Г. Максимова, А.В. Шилова, О.В. Колесова, Дж. Симонетти // Биотехнолог. – 2018. – Т. 4. – С. 98-112. – URL: <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2018.4.08> (дата обращения 14.10.2022).
2. Доклад Минприроды России «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». Минприроды России: Москва, Россия, 2021 г., стр. 245–318.
3. Mishra, A., Ghosh, S. Bioethanol production from various lignocellulosic feedstocks by a novel «fractional hydrolysis» technique with different inorganic acids and coculture fermentation. *Fuel* 2019, 236, 544–553. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.024>.
4. Yu, Z., Du, Y., Shang, X., Zheng, Y., Zhou, J. Enhancing fermentable sugar yield from cassava residue using a two-step dilute ultra-low acid pretreatment process. *Ind. Crops. Prod.* 2018, 124, 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.029>.
5. Колесникова, А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России / А.В. Колесникова // Актуальные вопросы экономических наук. – 2013. – Т. 33. – С. 116–120.
6. Kamali, M., Garmeio, T., Costa, M.E., Capela, I. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes—An overview of the developments and improvement opportunities. *Chem. Eng. J.* 2016, 298, 162–182. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.119>.
7. Kulikowska, D., Sindrewicz, S. Effect of barley straw and coniferous bark on humification process

- during sewage sludge composting. *Waste Manag.* 2018, 79, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.042>.
8. *Bohacz, J.* Composts and Water Extracts of Lignocellulosic Composts in the Aspect of Fertilization, Humus-Forming, Sanitary, Phytosanitary and Phytotoxicity Value Assessment. *Waste Biomass Valoris.* 2019, 10, 334. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0334-6>.
 9. *Houfani, A.A., Andersb, N., Spiessb, A.C., Baldrianc, P., Benallaouaa, S.* Insights from enzymatic degradation of cellulose and hemi cellulose to fermentable sugars—A review. *Biomass Bioenerg.* 2020, 134, 105481. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105481>.
 10. *Yucai, H., Cui-Luan, M., Bin, Y.* Pretreatment Process and Its Synergistic Effects on Enzymatic Digestion of Lignocellulosic. In *Fungal Cellulolytic Enzymes*, Springer: Berlin, Germany, 2018, pp.1–25. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0749-2_1.
 11. *Novozhilov, E.V., Sinelnikov, I.G., Aksenov, A.S., Chukhchin, D.G., Tyshkunova, I.V., Rozhkova, A.M., Osipov, D.O., Zorov, I.N., Sinitsyn, A.P.* Biocatalytic conversion of sulfate cellulose using complex biocatalysts based on recombinant *Penicillium verruculosum* enzyme preparations. *Catal. Ind.* 2015, 15, 78–83.
 12. *Rynk, R., Schwarz, M., Richard, T., Cotton, M., Halbach, T., Siebert, S.* Compost feedstocks. *Compost. Handb.* 2022, 85, 103–157. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85602-7.00005-4>.
 13. *Hu, Y., Wang, S., Li, J., Wang, Q., He, Z., Feng, Y.* Co-pyrolysis and co- hydrothermal liquefaction of seaweeds and rice husk: Comparative study towards enhanced biofuel production. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 2018, 129, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.016>.
 14. *Huang, S., Liu, T., Peng, B., Geng, A.* Enhanced ethanol production from industrial lignocellulose hydrolysates by a hydrolysate-cofermenting *Saccharomyces cerevisiae* strain. *Bioproc. Biosyst. Eng.* 2019, 42, 883–896. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02090-0>.
 15. *Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., Mohtasebi, B.* Biofuels: Their characteristics and analysis. In *Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy*, Elsevier: Berlin, Germany, 2019, pp. 277–325.
 16. *Basu, P.* Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, Elsevier: London, UK, 2018, pp. 49–87.
 17. *Kulikova, Y., Sukhikh, S., Ivanova, S., Babich, O., Sliusar, N.* Review of Studies on Joint Recovery of Macroalgae and Marine Debris by Hydrothermal Liquefaction. *Appl. Sci.* 2022, 12, 569. <https://doi.org/10.3390/app12020569>.
 18. *Tai, L., Caprariis, B., Scarsella, M., de Filippis, P., Marra, F.* Improved Quality Bio-Crude from Hydrothermal Liquefaction of Oak Wood Assisted by Zero-Valent Metals. *Energy Fuels* 2021, 35, 10023–10034. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00889>.
 19. *Xu, Y.H., Li, M.F.* Hydrothermal liquefaction of lignocellulose for value-added products: Mechanism, parameter and production application. *Bioresour. Technol.* 2021, 342, 126035. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126035>.
 20. ASTM-D7348, Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues. West Conshohocken, USA: ASTM International: 2021, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1520/D7348-21>.
 21. *Zhao, J., Wang, M., Saroja, S.G., Khan, I A.* NMR technique and methodology in botanical health product analysis and quality control, *J Pharm Biomed Anal.* 2022, 207, 114376. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2021.114376>.
 22. *Simmler, Charlotte, et al.* Universal quantitative NMR analysis of complex natural samples. *Current opinion in biotechnology* 25 (2014): 51–59.
 23. *Saito T. et al.* Practical guide for accurate quantitative solution state NMR analysis, *Metrologia*, 2004, 41, 3. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/3/015>
 24. ГОСТ Р 51858-2002. Нефть. Общие технические условия. М.: Госстандарт России, 2002, 12 с.
 25. *Arturi, K. R. M. Strandgaard, R. P. Nielsen, E. G. Søgaard and M. Maschietti,* Hydrothermal liquefaction of lignin in near-critical water in a new batch reactor: Influence of phenol and temperature, *J. Supercrit. Fluids*, 2017, 123, 28– 39. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.12.015>.
 26. *Nayak, J., Basu, A., Dey, P. et al.* Transformation of agro-biomass into vanillin through novel membrane integrated value-addition process: a state-of-art review. *Biomass Conv. Bioref.* 2022. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03283-6>
 27. *Helmut Fiege, Heinz-Werner Voges, Toshikazu Hamamoto, Sumio Umemura, Tadao Iwata, Hisaya Miki, Yasuhiro Fujita, Hans-Josef Buysch, Dorothea Garbe, Wilfried Paulus* «Phenol Derivatives» Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim, 2002. doi:10.1002/14356007.a19_313
 28. *Zhang, Huiyan, et al.* “Catalytic Conversion of Biomass-Derived Feedstocks into Olefins and Aromatics with ZSM-5: The Hydrogen to Carbon Effective Ratio.” *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 6, 2011, p. 2297., <https://doi.org/10.1039/c1ee01230d>.
 29. *Basar, I.A., Liu, H., Carrere, H., Trabaly, E., Eskicioglu, C.* A review on key design and operational parameters to optimize and develop hydrothermal liquefaction of biomass for biorefinery applications. *Green Chem.* 2021, 23, 1404. <http://doi:10.1039/d0gc04092d>.

**PRODUCTION OF LIQUID FUEL FROM LONG-TERM STORAGE WOOD WASTE
BY HYDROTHERMAL LIQUIDATION**

© 2023 Yu.V. Kulikova, N.I. Orlov, S.A. Sukhikh, O.O. Babich, V.N. Korotaev

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The pulp and paper industry leads to the formation of a significant amount of bark and wood waste (BWW), which is not processed in Russia, but is placed in bark dumps, which leads to a negative impact on environmental objects, incl. on the planet's climate. This article presents an assessment of the resource potential of long-term storage bark and wood waste based on the results of physicochemical and thermal analysis. It was found that during long-term storage BWW undergoes degradation rather weakly, while the proportion of carbon in the composition of BWW remains practically unchanged (at the level of 48.4%). It has been proven that the initial BWW are characterized by high humidity (60.8% to 74.9%), low calorific value (14.56 MJ/kg per d.m.) and moderate ash content (9.8% d.m.a.). For wet biomass, hydrothermal liquefaction can be considered the most suitable conversion method, which makes it possible to obtain liquid fuels without pre-drying, since water in this process acts as a solvent and a source of radicals. The average yield of biofuel during hydrothermal conversion of BWW is 10%, while the use of Iron ammonium alum as catalysts provided an increase in oil yield by more than 2 times to 28.4%, the use of copper sulfate led to an increase in yield up to 16.1%. The obtained bio-oil was characterized by a high degree of saturation (atomic ratio H/C was 1.3), but the oxygen content was also high (at the level of 22% wt.). The content of sulfur and nitrogen was minimal (0.6 and 0.2%, respectively). The composition of fuels was dominated by oxygen-containing aromatic compounds of the phenol group (62%), cyclic esters (19.8%), as well as fatty acids, which account for 12.9%.

Keywords: biomass, bark and wood waste, hydrothermal liquefaction, biofuel.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-117-127

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-24-00064,
<https://rscf.ru/project/23-24-00064/>*

Yulia Kulikova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology. E-mail: kulikova.pnpu@gmail.com

Orlov Nikolai Igorevich, 1st Year Master of the Direction 06.04.01 «Biology».

Stanislav Sukhikh, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Microbiology and Biotechnology.

E-mail: stas-asp@mail.ru

Olga Babich, Doctor of Technical Sciences, Director of the REC «Industrial Biotechnologies». E-mail: olich.43@mail.ru

Vladimir Korotaev, Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, PNRPU. E-mail: korotaev@pnpu.ru

УДК 574.5632.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА МИКРОБИОЦЕНОЗЫ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ПРИМЕРЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И БАКТЕРИЙ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2023 А.В. Огнистая^{1,2}, Т.И. Дункай^{1,2}, И.Г. Тананаев¹, Ж.В. Маркина²

¹ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

² Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Статья поступила в редакцию 15.02.2023

Оценено влияние свинца, кадмия, никеля, цинка и железа в концентрациях, соответствующих ПДК и 2ПДК на свойства экзометаболитов микроводоросли *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий, выделенных из разных районов зал. Петра Великого Японского моря. Полученные результаты показали метал-устойчивость 8 бактерий из 18 тестируемых. Обнаружено разное действие экзометаболитов *H. akashiwo*, культивируемой на тяжелых металлах (ТМ), в отношении бактерий резистентным к данным веществам. Выявлена стимуляция роста условно-патогенных бактерий *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii* экзометаболитами. В нескольких случаях зафиксировано снижение численности бактерий *Pseudomonas* sp., при добавлении метаболитов микроводоросли, выращенных с кадмием, свинцом и никелем при 10 и 20 мкг/л, для *Bacillus* sp. при 20 мкг/л свинца, 10 мкг/л и 20 мкг/л кадмия, а также при 50 и 100 мкг/л железа. В итоге наибольшее действие на влияние экзометаболитов в отношении бактерий оказали кадмий, свинец и железо.

Ключевые слова: свинец, кадмий, цинк, железо, микроводоросли, бактерии, экзометаболиты.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-128-138

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом увеличивается поступление ТМ в морские экосистемы. Токсичные соединения попадают в окружающую среду с сельскохозяйственными, городскими и ливневыми стоками, а также с отходами промышленных комплексов (горнодобывающей, металлургической, химической) [1]. Неблагоприятная экологическая ситуация морских вод способствует распространению ТМ в среде и их накоплению в гидробионтах [3]. Концентрация ТМ в одной и той же акватории может значительно различаться, эта зависимость складывается из множества природных факторов, например, перемешивания водных масс, речных стоков, выпадения осадков. Особенностью ТМ является тот факт, что они не разлагаются в результате химических или биологических процессов, а оседают на дно и накапливаются в донных отложениях. Токсич-

ность зависит от того, присутствует ли металл в виде свободного иона в растворе или в составе недиссоциированной соли, а также входит ли элемент в состав органических или неорганических комплексных соединений [4].

Микроорганизмы являются неотъемлемыми компонентами экосистем, которые чувствительны к загрязнению ТМ [7]. Однако некоторые представители способны проявлять высокую устойчивость к ТМ, снижая их концентрацию путем внеклеточного взаимодействия с помощью полимерных веществ, а также аккумуляцией в клеточных органеллах [8]. Следует отметить, что соединения, выделяемые в процессе жизнедеятельности консорциумов – микроводорослей и бактерий, также способны изменять параметры среды [9].

Поскольку антропогенное влияние на морские экосистемы продолжает расти, необходимо понимать, как микробиота реагирует на факторы стресса – тяжелые металлы.

Прибрежные воды Японского моря подвергаются постоянному антропогенному стрессу, который вызывает деятельность, связанную с судоходством и эксплуатацией водного транспорта [2]. На протяжении многих лет проводят мониторинговые работы по изучению химического состава загрязняющих веществ в акваториях Японского моря. На сегодняшний день имеется мало сведений о реакции микробиоты на ТМ в прибрежных районах Японского моря [5, 6].

Огнистая Альбина Васильевна, аспирант.

E-mail: alya_lokshina@mail.ru

Дункай Татьяна Игоревна, аспирант.

E-mail: tdunkai@yandex.ru

Тананаев Иван Гундарович, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор департамента ядерных технологий Дальневосточного Федерального университета. E-mail: geokhi@mail.ru

Маркина Жанна Васильевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории клеточных технологий. E-mail: zhannav@mail.ru

В дальневосточных морях водоросль *Heterosigma akashiwo* имеет конкурентное преимущество перед другими организмами, позволяя колонизировать морские прибрежные экосистемы [11]. Этот вид способен продуцировать цитотоксические соединения, которые приводят к массовой гибели гидробионтов, чаще всего рыб. Считается, что увеличение случаев опасных цветений *H. akashiwo* может возникать вследствие постоянного антропогенного воздействия [12].

Цель работы – оценить влияние ТМ (свинца, кадмия, никеля, цинка и железа) в лабораторных условиях на свойства экзометаболитов микроводоросли *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий, выделенных из разных акваторий Японского моря.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Альгологические методы. Объектом исследования послужила культура *Heterosigma akashiwo*, MBRU_HAK-SR11 (Y. Nada) Y. Nada ex Y. Hara, M. Chihara (Raphidophyceae), предоставленная ЦКП “Морской биобанк” ННЦМБ ДВО РАН (<http://marbank.dvo.ru>). Водоросли выращивали на среде *f* [13], приготовленной на основе стерилизованной морской воды соленостью 32‰ в 250-мл колбах Эрленмейера с объемом питательной среды 100 мл, при температуре 18°C, интенсивности освещения 70 ммоль/м²/с в области видимого света и периоде между светом и темнотой 14 ч свет: 10 ч темнота. В качестве инокулята использовали культуры на стадии экспоненциального роста.

Исследуемые концентрации Cd²⁺, Ni²⁺ и Pb²⁺ составляли: 10 и 20 мкг/л, Zn²⁺, Fe³⁺ – 50 и 100 мкг/л. Выбор концентраций основан на содержании данных металлов в прибрежных водах России и их предельно допустимых концентрациях (ПДК и 2ПДК) [5, 6]. Cd²⁺ добавляли в виде 3CdSO₄ × 8H₂O, Ni²⁺ – NiSO₄ × 7H₂O, Pb²⁺ – PbCl₂, Zn²⁺ – ZnSO₄ × 7H₂O, Fe³⁺ – FeCl₃ × 6H₂O с пересчетом на ионы металла.

Экзометаболиты микроводоросли получали по методике Ли (1987) в модификации Хашими (2016) с небольшими дополнениями [14, 15]. В конические пробирки вносили культуры, взятые на переходе из экспоненциальной фазы роста в стационарную. Суспензию микроводорослей концентрировали центрифугированием на Allegra 64 Rv течение 15 минут, со скоростью 4000 об/мин, в несколько этапов до полной чистоты супернатанта. Надосадочную жидкость собирали и пропускали через фильтры (диаметр пор 0,2 мкм). Полученный раствор добавляли к среде для культивирования бактерий.

Бактериологические методы. Для исследования влияния ТМ совместно с экзомета-

билитами микроводорослей использовались культивируемые гетеротрофные бактерии, выделенные из поверхностных вод Японского моря лабораторией морской микробиологии кафедры биоразнообразия морских биоресурсов Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета – *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Actinomyces* sp., *Escherichia* sp., *Vibrio* sp. (место выделения бух. Золотой пор), *Actinomyces* sp., *Bacillus* sp., *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Pseudomonas* sp., (бух. Новик), *Actinomyces* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia coli* (бух. Аякс), *Staphylococcus pasteurii*, *Vibrio* sp., *Bacillus* sp., *Escherichia* sp. (зал. Находка). Для изучения метал-аккумулирующих способностей морских бактерий применяли метод Бузолевой (2011) с небольшими модификациями. Посев чистых культур бактерий × 10⁹кл/мл проводили на среду для морских микроорганизмов (СММ) секторным методом с добавлением, в качестве селективных добавок, солей металлов. Учет вели по выявлению роста в секторной зоне. Если наблюдался рост, то культура устойчива к металлу, если рост не обнаружен, то культура чувствительна к токсиканту [3].

Динамику роста бактерий с экзометаболитами и без них исследовали с 1 по 5 сутки при температуре 37°C. Оценку роста проводили измерением оптической плотности с помощью микропланшетного ридера SPARK 10M (TECAN) при длине волны 540 нм. Определение жизнеспособности бактерий осуществляли посредством высева на чашки Петри со средой СММ [16, 17]. За контроль принимали бактерии, выросшие без добавления метаболитов.

Статистический анализ. Эксперименты проводили в трех повторностях. Статистическую обработку выполняли с помощью программы Excel. На графиках представлены средние значения и стандартные отклонения. Бары на графиках представляют стандартное отклонение измеряемых величин. Достоверность различий между выборками оценивали по критерию Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рост колоний бактерий на селективной среде с добавками ТМ, говорит о их устойчивости к данным веществам, которая появилась в результате длительного влияния металлов на микробиоту. Известно, что многие микроорганизмы проявляют резистентность к ТМ в водной среде. Металлы включены в окислительно-восстановительные реакции, для стабилизации молекул за счет электростатических взаимодействий, в качестве компонентов различных ферментов и для регуляции осмотического давления [18].

Микроорганизмы приспособились к присутствию как эссенциальных, так и неэссенциальных металлов, выработав различные механизмы устойчивости [19].

В результате наших экспериментов обнаружено влияние ТМ на бактерии, которое выразилось в подавлении роста 11 штаммов и проявлении устойчивости 8 штаммов (табл. 1). Отсюда

следует, что наиболее загрязненными районами являлись зал. Находка и бух. Золотой Рог, где было выявлено наибольшее число бактерий, приобретенных устойчивостью к ТМ (табл. 1).

Свинец

В результате проведенных исследований обнаружено, что свинец изменял свойства экзосоме-

Таблица 1. Влияние тяжелых металлов на рост морских бактерий

Место выделения	Наименование бактериального штамма	Рост бактерий									
		Cd ²⁺ мкг/л		Ni ²⁺ мкг/л		Pb ²⁺ мкг/л		Zn ²⁺ мкг/л		Fe ³⁺ мкг/л	
		10	20	10	20	10	20	50	100	50	100
Бух. Аякс	<i>Actinomyces</i> sp.	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
	<i>Pseudomonas</i> sp.	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Bacillus</i> sp.	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Бух. Новик	<i>Escherichia coli</i>	+	+	OP	OP	+	+	OP	+	OP	OP
	<i>Actinomyces</i> sp.	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-
	<i>Bacillus</i> sp.	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
	<i>Vibrio</i> sp.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>Escherichia</i> sp.	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
	<i>Pseudomonas</i> sp.	OP	OP	OP	+	+	+	OP	OP	+	+
	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	OP	OP	+	OP	+	OP	OP	+	OP	OP
Зал. Находка	<i>Vibrio</i> sp.	+	OP	OP	OP	OP	+	+	OP	OP	
	<i>Actinomyces</i> sp.	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
	<i>Bacillus</i> sp.	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+
	<i>Escherichia</i> sp.	OP	OP	+	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP
	<i>Staphylococcus lentus</i>	+	OP	OP	+	+	OP	+	+	OP	OP
Бух. Золотой Рог	<i>Enterococcus</i> sp.	+	+	OP	OP	+	+	+	OP	OP	+
	<i>Escherichia</i> sp.	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-
	<i>Staphylococcus pasteurii</i>	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP	OP
	<i>Actinomyces</i> sp.	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-

Примечание: «OP» – обильный рост, «+» – оптимальный рост бактерий, «-» – отсутствие бактериального роста

таболитов микроводоросли *H. akashiwo* в отношении бактерий (рис.1). Выявлена стимуляция роста *Vibrio sp.*, *Escherichia sp.*, *Staphylococcus lentus*. Экзометаболиты, полученные от *H. akashiwo*, выращенной при концентрации 20 мкг/л свинца, вызвали усиленный рост *Vibrio sp.*, *Escherichia sp.* (рис. 1). Ранее также показано, что свинец способствовал стимулированию роста бактерий из рода *Escherichia*, однако процесс зависел от множества факторов [20].

Противоположный эффект зарегистрирован в отношении *Pseudomonas sp.*, *Enterococcus sp.*, и *Bacillus sp.*, где наблюдалось подавление роста. Экзометаболиты, культивируемые при 20 мкг/л свинца, ингибировали *Enterococcus sp.*, и *Bacillus sp.* В концентрации 10 мкг/л свинца снижение ростовых показателей было характерно только для *Pseudomonas sp.* (см. рис. 1). Известно, что свинец губительно действовал на морфологию, метаболизм и рост *Acidithiobacillus ferroxidans*, *Acidithiobacillus thioxidans*, *Leptospirillum ferriphilum* и *Leptospirillum ferroxidans*, *Sulfobacillus acidophilus*, *Sulfolobus metallicus*, влияя на изменение структуры нуклеиновых кислот, вызывая разрушение клеточных мембран, ингибирование активности ферментов и окислительное фосфорилирование [21, 22]. Под влиянием свинцового загрязнения установлено изменение биохимической активности бацилл. Выявлено снижение активности таких ферментов, как протеаза, амилаза, нитратредуктаза, а также снижение аммонифицирующей способности и образования нитратов по мере увеличения свинцового стресса [8, 23].

В отношении бактерий *Escherichia coli*, *Staphylococcus pasteurii* и *Bacillus sp.*, (при 10 мкг/л) метаболиты *H. akashiwo*, культивируемые совместно со свинцом, влияния не оказали (рис. 1).

Свинец способен как стимулировать роста микроводорослей, так и подавлять в результате нарушения физиологических процессов

[24]. У некоторых представителей водорослей при токсическом воздействии увеличивалось содержание ряда веществ в клетках – липидов [25], полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) [26, 27], полифенолов, флавоноидов, пигментов [28]. В низких концентрациях свинец, оказывал стимулирующее действие на рост *Dunaliella tertiolecta* [29] и *Monoraphidium minutum* [30]. Таким образом, можно предположить, что свинец приводит к изменению метаболизма микроводорослей.

Кадмий

Экзометаболиты *H. akashiwo*, полученные в результате культивирования с разными концентрациями кадмия, проявляли стимулирующее действие в отношении пяти бактерий. Следует отметить, что 10 мкг/л вызвало наибольшее усиление роста *Vibrio sp.*, *S. lentus*, *Enterococcus sp.*, *S. pasteurii*. При добавлении 20 мкг/л кадмия можно выделить единичный случай стимуляции для *E.coli* (рис. 2). Подобный способ усиления роста микроорганизмов при небольших концентрациях токсиканта назвали эффектом Арндт-Шульца. Суть заключается в том, что токсикант аккумулируясь на поверхности клетки, меняет проницаемость клеточной стенки, что, в свою очередь, определяет свободное прохождение питательных веществ [4]. Например, кадмий в концентрации 20 мг/л стимулировал рост *Lactobacillus acidophilus*, а при концентрации 40 мг/л угнетал развитие бактерий. Несколько ученых исследовали действие кадмия на *E. coli* и обнаружили, что чем выше концентрация токсиканта, тем сильнее его влияние, приводящее к повреждению ДНК, денатурации белка и ингибированию процесса клеточного деления [31]. Однако концентрации кадмия более 20 и 40 мг/л значительно увеличивали численность *Proteobacteria* и *Gemmatimonas* [32]. Исследователи из Китая обнаружили, что бактерии

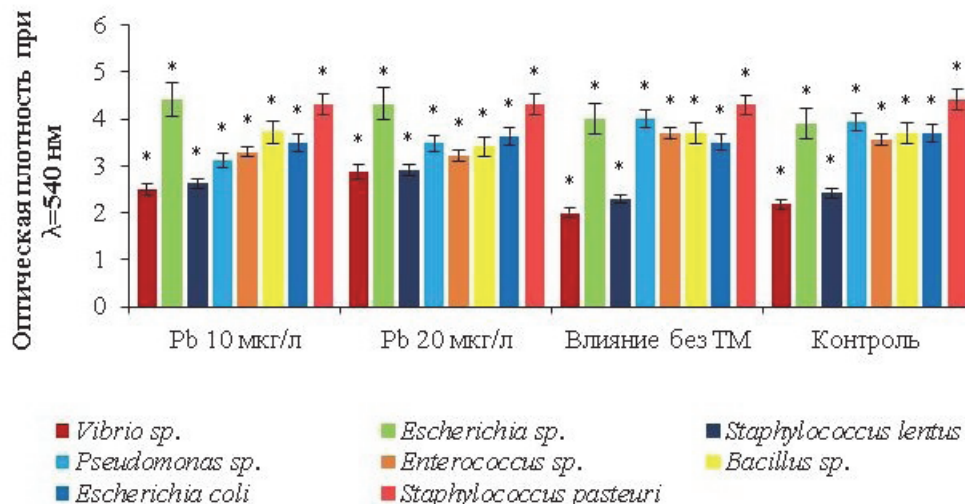


Рис. 1. Влияние свинца на свойства экзометаболитов *Heterosigma akashiwo* в отношении бактерий

устойчивые к кадмию вытесняли другие виды микроорганизмов, и в результате, становились доминирующей группой [33]. Зенг с соавторами (Zeng et al., 2005) зафиксировали негативный эффект кадмия, который проявлялся в снижении структуры и биоразнообразия микробного сообщества [34].

Внесение метаболитов, полученных от *H. akashiwo*, культивируемой в 10 мкг/л и 20 мкг/л кадмия показало подавление роста *Bacillus* sp. (рис. 2). Подобный эффект отмечен ранее на *Bacillus thermoamylovorans* и *Bacillus foraminis*, где внесение кадмия значительно тормозило их рост [35]. В других экспериментах обнаружено, что вышеуказанный металл снижал численность и подавлял биопленкообразование *Bacillus subtilis* [4].

Следует отметить, что метаболиты микроводоросли не оказывали влияние на *E. coli* (при 10 мкг/л), *Escherichia* sp., *Pseudomonas* sp. (рис. 2). Бактерии могли обладать восстановительными свойствами к кадмию. Например, Суксаби с соавторами (Suksabyeetal., 2016) сообщили, что добавление *Pseudomonas aeruginosa* уменьшало количество кадмия в зернах риса, полученных из почвы, загрязненной металлом. Авторы предполагали, что *P. aeruginosa* имела свойства, которые позволили восстанавливать кадмий и выводить из зерна [36].

Кадмий также оказывал влияние на микроводоросли. Его добавление в малых концентрациях к *Thalassiosira weissflogii* приводило к стимуляции роста и активности карбоангидразы. В случае *Chlorella minutissima* наблюдалось увеличение липидной продуктивности, а концентрации до 10 мг/л повышали значения хлорофилла *a* в культурах *Scenedesmus quadricauda* и *Pseudochlorococcutum tyricum*. Эти данные свидетельствуют о том, что кадмий способен оказывать воздействие на обмен веществ микроводорослей, а также изменять активность экзометаболитов *H. akashiwo* при взаимодействии с бактериями [27]. Следует отметить, что

стимуляция экзометаболитами происходила только в отношении условно-патогенных бактерий. Известно, что вышеупомянутый металл снижал количество видов и изменял видовой состав микробного сообщества. Бактерии устойчивые к кадмию становились доминирующими в той или иной экосистеме [33]. В зависимости от условий среды обитания микроорганизмы могли изменять свои биологические свойства, в том числе вирулентность [37].

Никель

Культивирование микроводоросли совместно с разными концентрациями никеля оказывали действие на свойства экзометаболитов в отношении трех бактерий – *Escherichia* sp., *E. coli* и *Pseudomonas* sp. Выявлен усиленный рост *Escherichia* sp., который особенно проявлялся при 10 мкг/л, а для *E. coli* при 20 мкг/л никеля (рис. 3). Ученые Чикагского университета сообщили, что *E. coli* нуждалась в активности никельсодержащей гидрогеназы для оптимального роста. Дефицит никеля приводил к замедлению ферментативного роста данной бактерии. Добавление 300 мкМ металла в питательную среду восстанавливало активность гидрогеназы, что способствовало стимуляции *E. Coli* [38]. На данный момент времени известны механизмы устойчивости бактерий к никелю [39]. Этот металл способен связываться с экзометаболитами микроорганизмов, образуя нерастворимые комплексы солей, а также может взаимодействовать с поверхностью клеточной стенки и накапливаться в ней [40]. Исследователи обнаружили, что наиболее значимыми компонентами, связанными с вирулентностью бактерий, являются никельсодержащие ферменты гидрогеназы и уреазы [41].

Зарегистрировано ингибирование роста *Pseudomonas* sp., в обеих концентрациях никеля, но при 10 мкг/л подавление было более сильное (см. рис. 3). Подобный эффект наблюдался при

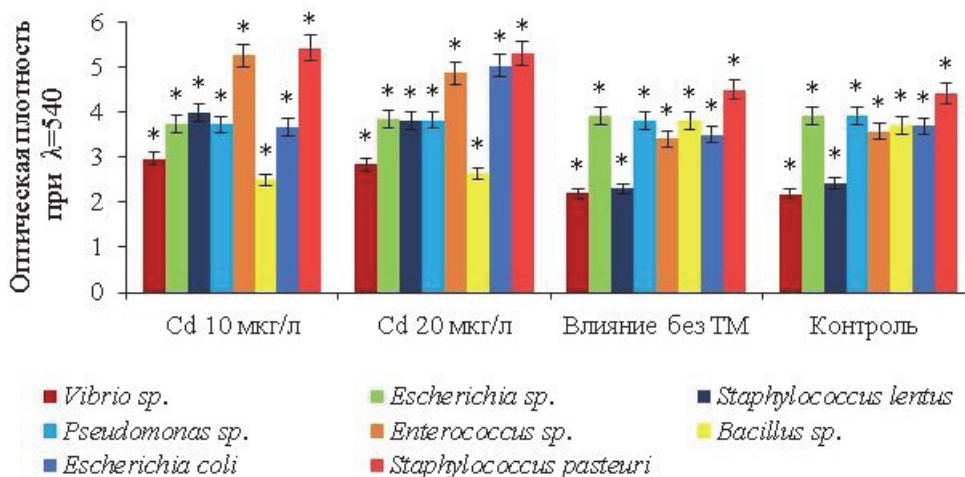


Рис. 2. Влияние кадмия на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

тестировании способности *Klebsiella oxytoca* к биоудалению никеля, где также оценивали рост бактерий. Результаты показали, что присутствие металла в культуральной среде ингибировало скорость роста бактерии по сравнению с контролем [42]. Ингибирующее действие вышеупомянутого металла также выявлено в экспериментах, проводимых на *Acidithiobacillus* [43]. Авторы объясняли снижение роста тем, что бактерии, оказавшиеся в условиях стресса, использовали энергию, предназначенную для роста, на поддержание других функций, поскольку для выработки резистентности к металлу требуется больше энергии [44].

Остальные бактерии, тестируемые в работе, не подвергались действию экзометаболитов, полученных из водоросли, выращенной совместно с никелем (рис. 3). Микроорганизмы *Staphylococcus* sp., и *Bacillus* sp., которые были устойчивы к экзометаболитам, культивируемые в присутствии никеля, также проявили резистентность в экспериментах других ученых [45]. Индийские исследователи выделили устойчивую к никелю *Cupriavidus* sp., при (1,0-10,0 мМ). Авторы предположили, что резистентность может быть обусловлена внецитоплазматическим связыванием и накоплением в сочетании с экспрессией специфических периплазматических белков [46].

Никель является важным металлом для морских микроводорослей. Он служит кофактором в ферменте уреазе, но в больших концентрациях он подавляет рост диатомовых водорослей [27]. Металл влияет на метаболизм микроводорослей в концентрации 0,5 мг/л, вызывает сдвиг профиля жирных кислот в сторону насыщенных в клетках *Dunaliella salina* и *Nannochloropsis salina* [47]. Точно так же небольшие концентрации Ni (0,1–10 мкМ) приводили к увеличению содержания хлорофилла *a* и продукции с-фикоцианина в культуре *Anabaena doliolum* [48].

Как показано в литературе, никельсодержащие ферменты играли важную роль в вирулентности патогенов, поэтому его небольшие концентрации могли приводить к стимуляции бактериального роста [41].

Цинк

Результаты исследований продемонстрировали влияние цинка на свойства экзометаболитов *H. akashiwo* в обеих концентрациях, которые стимулировали рост *Vibrio* sp. и *Enterococcus* sp. (рис. 4). Обнаружено, что чем выше концентрация, тем интенсивнее рост бактерий. Похожая реакция наблюдалась у клубеньковых бактерий, где при добавлении металла в концентрации 0,01% происходила стимуляция роста *Rhizobium meliloti*. При сравнении действия ТМ – меди, кадмия, свинца, только цинк приводил к угнетению роста *R. meliloti* [49].

Экзометаболиты, полученные из водоросли, культивируемой с разными концентрациями цинка, не проявили активности в отношении шести бактерий, тестируемых в работе (см. рис. 4). Цинк является важным элементом в качестве кофактора ключевых ферментов и белков, участвующих во многих процессах, таких как репликация ДНК, синтез и обмен белков. Также была обнаружена резистентность в отношении нитрата цинка у бацилл *Bacillus cereus*, сульфата цинка – *B. subtilis*, ацетата цинка и хлорида цинка – *B. cereus* [50]. Клинические штаммы *Staphylococcus aureus* и *P. aeruginosa* показали устойчивость к наночастицам цинка в концентрациях 0,001–0,1 мг/мл [51]. Ученые из Франции продемонстрировали слабое влияние металла на разнообразие бактерий, авторы объясняли это адсорбцией или его включением в небiodоступную фракцию. Тем не менее, наличие цинка в среде приводило к значительным изменениям в циклах питательных веществ [52].

Показано участие ионов токсиканта в различных бактериальных патогенезах. Более того,

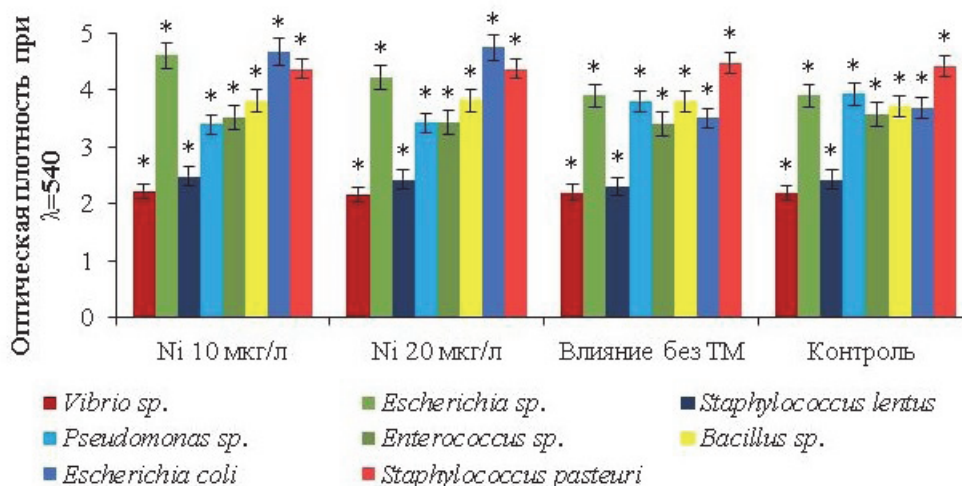


Рис. 3. Влияние никеля на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

появляется все больше доказательств важности цинка в вирулентности различных бактерий. Цинк участвует в формировании биопленки, подвижности бактерий, устойчивости к антибиотикам и выживании в условиях окислительного стресса. Поэтому, способность клеток поддерживать гомеостаз цинка имеет решающее значение для их роста, выживания и вирулентности [53].

Таким образом, стимулирующее воздействие экзометаболитов *H. akashiwo* на *Vibrio* sp., и *Enterococcus* sp., можно объяснить влиянием цинка на метаболизм микроводоросли. Известно, что внесение низких концентраций токсиканта ускоряло рост *D. tertiolecta* [54] и повышало содержание хлорофилла *a*. При различных концентрациях тенденция содержания хлорофилла была соответствующей таковой для роста, но более низкие концентрации чаще всего вызывали значительное увеличение (хлорофилла *a* и хлорофилла *b*) у зеленых водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus bijuga*, в то время как более высокие концентрации вещества снижали содержание пигментов. Низкие концентрации цинка стимулировали продукцию жирных кислот *D. tertiolecta* [54]. Несколько исследователей показали, что накопление продуктов метаболизма может быть одним из способов, с помощью которых водоросли способны ликвидировать токсическое действие ТМ [55, 56, 57].

Железо

Экзометаболиты *H. akashiwo*, полученные в результате культивирования с разными концентрациями железа, проявляли стимулирующее действие в отношении трех бактерий – *E. coli*, *S. lentus*, *S. pasteurii*. Следует отметить, что 50 мкг/л токсиканта активнее работало в отношении *E. coli*, 100 мкг/л в случае *S. lentus*, а для *S. Pasteurii* 50 и 100 мкг/л железа (рис. 5). Из литературы известно, что многим бактериям необходим этот

металл, они могут его восстанавливать или окислять для получения энергии, а также при понижении pH запасать. Осаждение железа может происходить посредством сорбции ионов на поверхности бактериальной клетки [58]. Для *E. coli* учёные подсчитали, что более 90% клеточного железа задействовано для функционирования дыхательной цепи [59]. Вышеуказанный металл усиливал как рост, так и экспрессию факторов вирулентности бактерии *Pseudomonas syringae*. Состояние обогащения железом составляло около 200 мкМ, а проявление токсичных свойств начиналось при концентрации более 400 мкМ. Токсичность проявлялась в следствие катализирования реакции Фентона с дальнейшим образованием высоко реакционноспособного гидроксильного радикала, который мог вызывать повреждение мембран бактериальных клеток [60]. Сообщалось об изменениях в реакции бактерий на железо, что отражалось в снижении альфа-разнообразия *Roseobacter*, *Gammaproteobacteria* и *Cytophaga-Flavobacterium* [61].

Было отмечено ингибирование *Bacillus* sp., наибольшая активность выражалась при 50 мкг/л токсиканта. Для остальных бактерий влияние метаболитов не зарегистрировано (см. рис. 5). Ранее показано, что железо оказывало ингибирующее действие на представителей нормальной микрофлоры кишечника [62]. Ограничение железа в среде у двух бактериальных штаммов *Alteromonas macleodii*, изолированных из прибрежной морской зоны, приводило к снижению роста, дыхания, изменению в экспрессии нескольких ключевых ферментов, связанных с катаболизмом углерода, особенно тех, кто участвовал в цикле лимонной кислоты, гликолизе и окислительном фосфорилировании [62].

Для нормального роста и метаболизма микроводорослей железо является жизненно важным элементом. Оно требуется для поддержания фотосинтеза и других метаболических реакций.

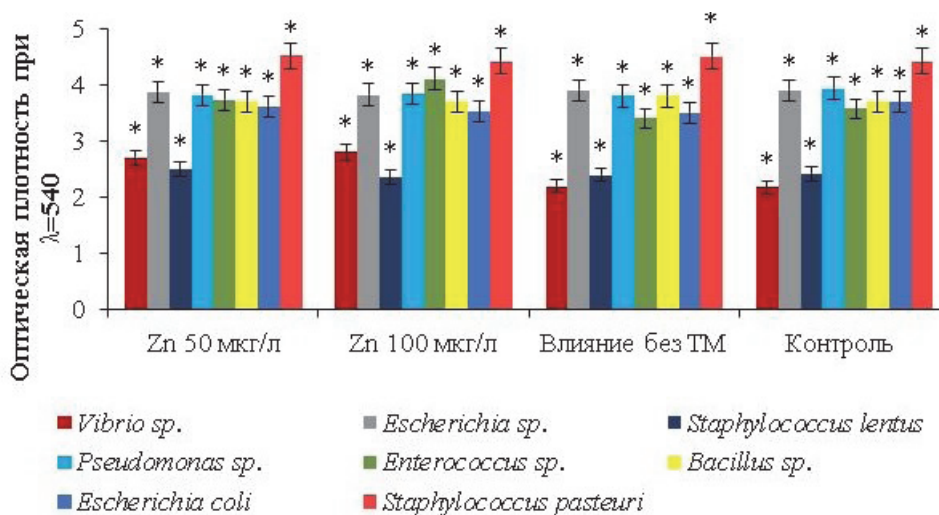


Рис. 4. Влияние цинка на экзометаболиты *Heterosigmaakashiiwo* при взаимодействии с бактериями

Большое количество исследований показало, что металл оказывал стимулирующее действие на рост микроводорослей *Chlamydomonas reinhardtii* [63, 65], приводил к увеличению содержания липидов, к примеру в морском штамме *S. vulgaris* [64], а также у пресноводных *Botryococcus* sp., и *Scenedesmus obliquus* [66, 67], содержание жирных кислот у *P. tricornutum* [68] у *Arthrospira platensis* увеличение пальмитиновой, олеиновой, линолевой, γ -линоленовой и докозагексаеновой кислот [69]. Самая высокая скорость роста клеток *D. tertiolecta* зафиксирована при использовании сульфата железа и аммония [70]. Отсюда следует, что действие экзометаболитов *H. akashiwo* на бактерии можно объяснить влиянием железа на метаболизм микроводоросли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе установлено, что под действием ТМ экзометаболиты, выделяемые в процессе жизнедеятельности микроводоросли *Heterosigma akashiwo* меняли свою активность в отношении партнеров по сообществу – бактерий (рис. 6).

Экзометаболиты *H. akashiwo*, вступившие в реакцию с ТМ, приводили к значительным нарушениям в структурно-функциональных показателях биоценозов, что проявлялось в увеличении численности условно-патогенных бактерий – *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii*, чрезмерное размножение которых ведет к развитию заболеваний у гидробионтов, вытесняя виды убиквисты – *Pseudomonas* sp. и *Bacillus* sp.

В результате наших исследований, были выделены наиболее загрязненные районы зал. Петра Великого – зал. Находка и бух. Золотой Рог. В этих районах были обнаружены бактерии устойчивые к ТМ, а также зафиксировано изменение

свойств экзометаболитов *H. akashiwo* под действием ТМ в отношении бактерий. Наибольшее влияние на активность экзометаболитов оказывали – кадмий, свинец и железо, наименьшее – никель и цинк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis A., Shokouhian M., Shubei N. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources // *Chemosphere*. 2001. № 44. P. 997-1009.
2. Христофорова, Н.К. Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря: монография / ответственный редактор: Н. К. Христофорова. Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток, 2012. - 440 с.
3. Бузолева, Л.С. Микробиологическая оценка качества природных вод, летняя учебно-полевая практика: учеб. пособ. / Л.С. Бузолева. - Владивосток, 2011. - 88 с.
4. Воронин, Е.С. Ветеринарная биология и иммунология / Е.С. Воронин, В.Н. Колесник, Н.М. Колычев // Электронный дидактический комплекс. - М., 2006. - URL: <https://nsau.edu.ru/images/vetfac/images/ebooks/microbiology/stu/bacter/ecologia/toksbaet.htm> (дата обращения 25.01.2023).
5. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2021. М.: Наука, 2022. - 230 с.
6. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019 [Под ред. Коршенко А.Н.]. - М.: Наука, 2020. - 232 с.
7. Ramanan R., Kim B.H., Cho D.H. Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications // *Biotechnology Advances*. 2016.Vol. 34. Is 1. P. 14-29.
8. Фокина, А.И. Тяжёлые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) / А.И. Фокина, Т.Я. Ашихмина, Л.И. Домрачева, Е.А. Горностаева // Теоретическая и прикладная экология. - 2015. - №2. - С. 5-18.
9. Капков, В.И. Использование морских одноклеточных водорослей в биологическом мониторинге / В.И. Капков, Е.В. Шошина, О.А. Беленикина // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2017. - № 20(2). - С. 308-315.
10. Growth response of six strains of *Heterosigma akashiwo* to varying temperature, salinity and irradiance conditions / R. Martínez, E. Orive, A.S. Laza-Martínez Seoane // *J. Plankton Res.* 2010. № 32. P. 529-538.
11. Broad salinity tolerance as a refuge from predation in the harmful raphidophyte alga *Heterosigma akashiwo*

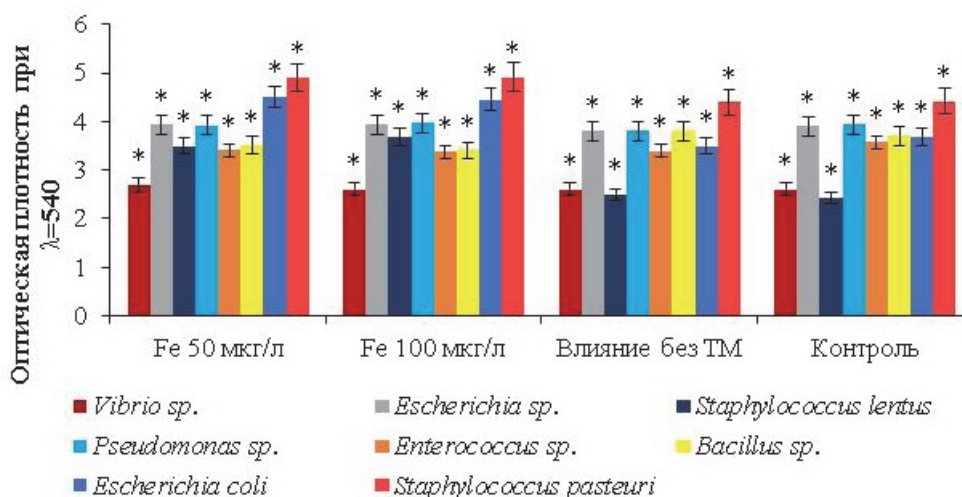


Рис. 5. Влияние железа на экзометаболиты *Heterosigma akashiwo* при взаимодействии с бактериями

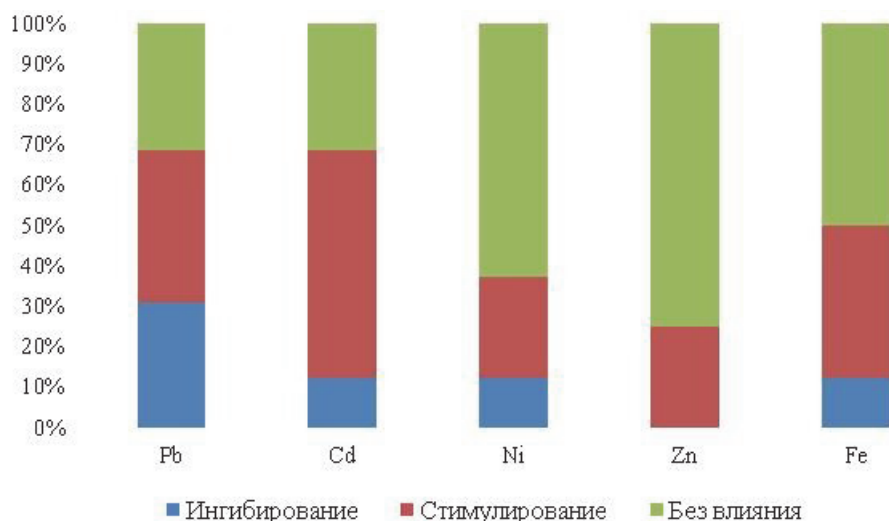


Рис. 6. Влияние тяжелых металлов на действие экзометаболитов *H. akashiwo* в отношении бактерий

- (Raphidophyceae) / S.L. Strom, E.L. Harvey, K.A. Fredrickson, S. Menden-Deuer // J. Phycol. 2013. №49. P. 20-31.
12. Dursun F., Taş S., Koray T. Spring bloom of the raphidophycean *Heterosigma akashiwo* in the golden horn estuary at the northeast of sea of marmara // Ege J. Fish. Aquat. Sci. 2016. Vol. 33. P. 201-207.
 13. Guillard R.R.L., Ryther J.H. Studies of marine planktonic diatoms. 1. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran // Canadian Journal of Microbiology. 1962. Vol. 8. (2). P. 229-239.
 14. Comparison of several methods effective lipid extraction from microalgae / J.Y. Lee, C. Yoo, S.Y. Jun, C.Y. Ahn, H.M. Oh // Bioresour. Technol. 2010. №101. P. 75-77.
 15. The effect of microalgae extraction on bacterial species isolated from seminal fluid of sexually active males in Baghdad / A. Hashimi, N. Shahrazad, R.F. Mansur // J. Genet. Environ. Resour. Conserv. 2016. №4 (2). P. 171-177.
 16. Christensen G.D., Simpson W.A., Younger J.J. Adherence of coagulase-negative staphylococci to plastic tissue culture plates: a quantitative model for the adherence of staphylococci to medical devices // J Clin. Microbiology. 1985. №22 (6). P. 996-1006.
 17. O'Toole G.A., Kolter R. Initiation of biofilm formation in *Pseudomonas fluorescens* WCS365 proceeds via multiple, convergent signalling pathways: a genetic analysis // Molecular Microbiology. 1998. Vol. 28. №3. P. 449-461.
 18. Bruins M.R., Kapil S., Oehme F.W. Microbial resistance to metals in the environment // Ecotoxicol Environ Saf. 2000. Vol. 45 (3). P. 198-207.
 19. Безвербная, И.П. Отклик микроорганизмов прибрежных акваторий Приморья на присутствие в среде тяжелых металлов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук / И.П. Безвербная. - Владивосток, 2002. - 18 с.
 20. Kumar M., Upreti R.K. Impact of lead stress and adaptation in *Escherichia coli* // Ecotoxicology and environmental safety. 2000. Vol. 47. Is. 3. P. 246-252.
 21. Fashola M.O., Ngole-Jeme V.M., Babalola O.O. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance // International journal of environmental research and public health. 2016. Vol. 13. №11. 1047 p.
 22. Bissen M., Frimmel F. Arsenic—a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation, mobility // Acta hydrochimica et hydrobiologica. 2003. Vol. 31. №1. P. 9-18.
 23. Довлетярова, Э.А. Изменение биохимической активности бактерий под влиянием свинцового загрязнения дерново-подзолистой почвы / Э.А. Довлетярова // Докл. ТСХА (Московская с.х. акад. им. Тимирязева). - 2004. - № 276. - С. 342-346.
 24. Сысоев, А.А. Влияние ионов свинца и РОВ на рост, развитие и аденилатный энергетический заряд микроводорослей в культурах / А.А. Сысоев, И.В. Сысоева // Вопросы современной альгологии. - 2017. - № 1(13). - 24 с.
 25. Impact of heavy metals from flue gas integration with microalgae production / K. Napan, L. Teng, J.C. Quinn, B.D. Wood // Algal Res. 2015. №8. P. 83-88.
 26. Gopalakrishnan V., Ramamurthy D. Dyeing industry effluent system as lipid production medium of *Neochloris* sp. for biodiesel feedstock preparation // Biomed. Res. Int. 2014. P. 529-560.
 27. Effect of metals, metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A Review / K. Miazek, W. Iwanek, C. Remacle, A. Richel, D. Goffin // Int J Mol Sci. 2015. Vol. 16 (10). P. 23929-69.
 28. Secondary metabolites production combined with lead bioremediation by *Halamphora* sp. marine diatom microalgae and their physiological response / D.B.I. Moussa, S. Boukhriss, K. Athmouni, H. Ayadi // Int J Aquac Fish Sci. 2022. № 8 (2). P. 025-036.
 29. Tripathi V.N., Strivastova S. Ni²⁺-uptake in *Pseudomonas putida* strain S4: A possible role of Mg²⁺-uptake pump // J. Biosci. 2006. Vol. 31. № 1. P. 61-67.
 30. Paperi R., Micheletti E., Phillppis R. Optimizatiuon of copper sorbing-desorbing cycles with confined cultures of the exopolysaccharide-producing cyanobacterium *Cyanospiracapsulatan* // J. Appl. Microbiol. 2006. Vol. 101. № 6. P. 1351-1356.
 31. Thomas M., Benov L. The contribution of superoxide radical to cadmium toxicity in *E. coli* // Biol. Trace Elem. Res. 2018. №181. P. 361-368.
 32. Cadmium pollution impact on the bacterial community structure of arable soil and the isolation of the cadmium resistant bacteria / Y. Xiaoxia, Z.J. Tong, L. Xiaoqing, S.L. Xin // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 12. P. 1664-302X.
 33. Ecological responses of bacterial assembly and functions to steep Cd gradient in a typical Cd-contaminated farmland ecosystem / Y. Deng, S.D. Fu, E.K. Sarkodie, S.F. Zhang // Ecotoxicol Environ Saf. 2022. №229. 113067 p.
 34. Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices / L. Zeng, M. Liao, C. Huang, Y. Luo // Biodivers Sci. 2005. №13(6). P. 555-65.
 35. Peng Y., Xiaojie L., Jinhua L. Effects of cadmium stress on microbial community diversity in soil potted with *sasa argentea striatus* // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 300 p.
 36. Effect of biochars and microorganisms on

- cadmium accumulation in rice grains grown in Cd-contaminated soil / P. Suksabye, A. Pimthong, P. Dhurakit, P. Mekvichitsaeng, P. Thiravetyan // Environ. Sci. Pollut. Res. 2016. №23. P. 962-973.
37. Сомов, Г.П. Адаптация патогенных бактерий к абиотическим факторам окружающей среды / Г. П. Сомов, Л. С. Бузолева. - Рос. акад. мед. наук. Сиб. отд-ние, НИИ эпидемиологии и микробиологии. - Владивосток: Примполиграфкомб., 2004. - 167 с.
 38. Effect of nickel on the fermentative growth of *Escherichia coli* k-12 and comparison of nickel and cobalt toxicity on the aerobic and anaerobic growth / L.F. Wu, C. Navarro, K. Pina, M. Quénard, M.A. Mandrand // Environmental health perspectives. 1994. Vol. 102. P. 297-300.
 39. Hausinger R.P., Zamble D.B. Microbial physiology of nickel and cobalt // Molecular microbiology of heavy metals / Eds. Nies Springer-Verlag. 2007. P. 287-320.
 40. Comparative genomics of regulation of heavy metal resistance in Eubacteria / E.A. Permina, A.E. Kazakov, O.V. Kalinina, M.S. Gelfand // BMC Microbiol. 2006. Vol. 6. P. 49-60.
 41. Maier R.J., Benoit S.L. Role of nickel in microbial pathogenesis // Inorganics. 2019. Vol. 7(7). 80p.
 42. Alboghobeish H., Tahmourespour A., Doudi M. The study of nickel resistant bacteria (NiRB) isolated from wastewaters polluted with different industrial sources // J Environ Health Sci Eng. 2014. Vol.12(1). 44 p.
 43. Ахметов, Л.И. Токсичность никеля для тионовых бактерий / Л.И. Ахметов, А.Г. Быков, М.Б. Вайнштейн, Т.З. Есикова, А.Е.Филонов, Л.Н. Крылова, С. Моргазави // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. - 2010. - Vol. (1). - P. 167-174.
 44. Hernandez B., Dorian A. Zinc and lead biosorption by *Delftia suruhatensis*: a bacterial strain resistant to metals isolated from mine tailings // J water Resource Protec. 2012. №4. P. 1-11.
 45. Rajbanshi A. Study on heavy metal resistant bacteria is Guhewori sewage treatment plant // J our nature. 2008. №6. P. 52-57.
 46. Arundhati P., Paul A.K. Nickel uptake and intracellular localization in *Cupriavidus pauculus* 201 // Adv biosciotechnol. 2010. №1. P. 276-280.
 47. Mohammady N.G., Fathy A.A. Humic acid mitigates viability reduction, lipids and fatty acids of *Dunaliella salina* and *Nannochloropsis salina* grown under nickel stress // Int. J. Bot. 2007. №3. P. 64-70.
 48. Responses of cyanobacterium *Anabaena doliolum* during nickel stress / M.K. Shukla, R.D. Tripathi, N. Sharma, S. Dwivedi, S. Mishra, R. Singh, O.P. Shukla, U.N. Rai // J. Environ. Biol. 2009. №30. P. 871-876.
 49. In vitro test of inhibition effect of extracts from three seaweed species distributed at Black Sea on different pathogens potentially dangerous for aquaponics / I. Sirakov, K. Velichkova, N. Rusenova, T. Dinev // Biotechnol Lett. 2019. Vol. 24 (1). P. 176-183.
 50. Ознобихина, А.О. Модельное биотестирование влияния солей тяжёлых металлов на жизнеспособность клубеньковых бактерий *Rhizobium meliloti* / А.О. Ознобихина, А.Ю. Першаков, Д.И. Ерёмин // Самарский научный вестник. - 2019. - Т. 8, - № 3 (28). - С. 69-72.
 51. Королькова, Д.С. Определение минимальных подавляющих концентраций солей цинка на рост пробиотических штаммов бактерий рода *Bacillus* / Д.С. Королькова, М.Л. Русяева, И.В. Коробова // Международный студенческий научный вестник. - 2018. - № 4. - 3 с.
 52. Pringault O., Viret H., Duran R. Interactions between Zn and bacteria in marine tropical coastal sediments // Environmental science and pollution research international. 2011. №19. P.879-92.
 53. Suryawati B. Zinc homeostasis mechanism and its role in bacterial virulence capacity // The 8th annual basic science international conference. AIP Conf. Proc. 2021. P. 070021-1-070021-7.
 54. El-Naggar A.H. Growth and some metabolic activities of *Chlorella* and *Scenedesmus* in relation to heavy metal pollution in Gharbia Governorate // Botany Department, Faculty of Science. 1993. 278 p.
 55. De-Filippis L.E., Hampp R., Ziegler H. The effects of sub-lethal concentrations of zinc, cadmium and mercury on *Euglena* growth and pigments // Pflanzen Physiol. 1981a. №101. P. 37-47.
 56. De-Filippis L.E., Hampp R., Ziegler H. The effects of sub-lethal concentrations of zinc, cadmium and mercury on *Euglena* II. Respiration, photosynthesis and photochemical activities // Arch Microbiol. 1981b. P.128-404.
 57. Rai L.C., Singh A.K., Mallick N. Studies on photosynthesis, the associated electron transport system and some physiological variables of *Chlorella vulgaris* under heavy metal stress // J Plant Physiol. 1991. №137. P. 419-424.
 58. Изучение микроорганизмов, окисляющих железо, для возможного использования в биотехнологии очистки воды / К.Т. Нгун, Д.А. Рагузина, Е.В. Плешакова, М.В. Решетников // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2018. Т. 18, № 2. С. 204-210.
 59. Effects of iron limitation on growth and carbon metabolism in oceanic and coastal heterotrophic bacteria / M. Fourquez, A. Devez, A. Schaumann, A. Guéneugues, T. Jouenne // Limnology and Oceanography Bulletin. 2014. №59 (2). P. 349-360.
 60. Effect of iron concentration on the growth rate of *Pseudomonas syringae* and the expression of virulence factors in hrp-inducing minimal medium / B.J. Kim, J.H. Park, T.H. Park, P.A. Bronstein, D.J. Schneider, S.W. Cartinhour, M.L. Shuler // Appl Environ Microbiol. 2009. №75(9). P. 2720-6.
 61. Specific effect of trace metals on marine heterotrophic microbial activity and diversity: key role of iron and zinc and hydrocarbon-degrading bacteria / F. Baltar, A. Gutiérrez-Rodríguez, M. Meyer, I. Skudelny, S. Sander, B. Thomson, S. Nodder, R. Middag, S.E. Morales // Front Microbiol. 2018. №19. 3190 p.
 62. Microstructures and functional groups of *Nannochloropsis* sp. cells with arsenic adsorption and lipid accumulation / J. Cheng, Z. Yang, K. Li, J. Zhou, K. Cen // Bioresour. Technol. 2015. №194. P. 305-311.
 63. Effects of iron limitation on growth and carbon metabolism in oceanic and coastal heterotrophic bacteria / A. Devez, M. Fourquez, S. Blain, I. Obernosterer, A. Schaumann, Guéneugues A., Jouenne T // Limnology and oceanography. 2014. №52. 349 p.
 64. The effect of iron on growth, lipid accumulation, and gene expression profile of the freshwater microalga *Chlorella sorokiniana* // M. Wan, X. Jin, J. Xia, J.N. Rosenberg, G. Yu, Z. Nie // Appl Microbiol Biotechnol. 2014. № 98. P. 9473-9481.
 65. The effect of iron concentration on the growth rate of *Chlamydomonas reinhardtii* / J.C. Seo, J.F. Tang, M.J. Wagstaff // The Expedition. 2013. Vol. 3. P. 9-16.
 66. Yeesang C., Cheirsilp B. Effect of nitrogen, salt, and iron content in the growth medium and light intensity on lipid production by microalgae isolated from freshwater sources in Thailand // Biores Technol. 2011. №102. P. 3034-3040.
 67. Enhancement of lipid accumulation in *Scenedesmus obliquus* by optimizing CO₂ and Fe³⁺ levels for biodiesel production / H.H.A. El-Baky, G.S. E.B. Bouaid, M. Martinez, J. Aracil // Biores Technol. 2012. №119. P. 429-432.
 68. Of iron valence on the growth, photosynthesis, and fatty acid composition of *Phaeodactylum tricornutum* / H. Wang, Q. Su, Y. Zhuang, C. Wu, S. Tong, B. Guan, Y. Zhao, H. Qiao // J. Mar. Sci. Eng. 2023. №11. 316 p.
 69. Influence of Fe²⁺ on the biomass, pigments, and essential fatty acids of *Arthrospira platensis* / M.M. El-Sheekh, J.M. Salman, R.A. Grmasha // Biomass Conv. Bioref. 2022.
 70. Rizwan M., Mujtaba G., Lee K. Effects of iron sources on the growth and lipid carbohydrate production of marine microalga *Dunaliella tertiolecta* // Biotechnol Bioproc. 2017. № 22. P. 68-75.

**STUDY OF THE INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE MICROBIOCENOSIS
OF PETER THE GREAT BAY OF THE SEA OF JAPAN ON THE EXAMPLE OF MICROALGAE
AND BACTERIA UNDER THE CONDITIONS OF A LABORATORY EXPERIMENT**

© 2023 A.V. Ognistaya^{1,2}, T.I. Dunkai^{1,2}, I.G. Tananaev¹, Zh.V. Markina²

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

² A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology
Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences
(NSCMB FEB RAS), Vladivostok, Russia

The influence of lead, cadmium, nickel, zinc and iron in concentrations corresponding to MPC and 2 MPC on the properties of *Heterosigma akashiwo* microalgae exometabolites in relation to bacteria isolated from different areas of the Peter the Great Bay of the Sea of Japan was evaluated. The results obtained showed metal resistance in 8 bacteria out of 18 tested. Different effects of exometabolites of *Heterosigma akashiwo* cultivated on heavy metals (HM) against bacteria resistant to these substances were found. Stimulation of the growth of opportunistic bacteria *Vibrio* sp., *Escherichia* sp., *Escherichia coli*, *Staphylococcus lentus*, *Enterococcus* sp., *Staphylococcus pasteurii* by exometabolites was revealed. In several cases, a decrease in the number of *Pseudomonas* sp. bacteria was recorded, with the addition of metabolites of microalgae grown with cadmium, lead and nickel at 10 and 20 µg/l, for *Bacillus* sp. at 20 µg/l lead, 10 µg/l and 20 µg/l cadmium, and also at 50 and 100 µg/l of iron. As a result, cadmium, lead and iron had the greatest effect on the effect of exometabolites on bacteria.

Keywords: lead, cadmium, zinc, iron, microalgae, bacteria, exometabolites

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-1-128-138

Albina Ognistaya, Postgraduate Student.

E-mail: alya_lokshina@mail.ru

Tatyana Dunkai Postgraduate Student.

E-mail: tdunkai@yandex.ru

*Ivan Tananaev, Corresponding Member RAS, Doctor of
Chemical Sciences, Professor of the Department of Nuclear
Technologies, Far Eastern Federal University.*

E-mail: geokhi@mail.ru

*Zhanna Markina, Candidate of Biological Sciences,
Researcher, Laboratory of Cell Technologies.*

E-mail: zhannav@mail.ru

Известия Самарского научного центра Российской академии наук

Учредитель: федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре, свидетельство ПИ № ФС77-61347 от 07.04.2015

Главный редактор: академик РАН Ф.В. Гречников

Том 25, номер 1 (111), 28.02.2023

Индекс: 36622. Распространяется бесплатно

Адрес учредителя и редакции – 443001, Самарская область,

г. Самара, Студенческий пер., За. Тел. 8 (846) 340-06-20

Издание не маркируется

Сдано в набор 15.02.2023 г.

Подписано к печати 28.02.2023 г.

Формат бумаги А4

Офсетная печать

Усл. печ. л. 16,043

Тираж 200 экз.

Заказ 40