МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (7), 2020

Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029

Тверь 2020

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.
E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по направлениям: 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление. Журнал выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179.118.2+539.211

ОБ ОДНОМ НЕСТАНДАРТНОМ ПАРАМЕТРЕ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v@tvcom.ru

Предложен безразмерный параметр профиля шероховатой технической поверхности μ, характеризующий ее эксплуатационные свойства, в том числе триботехнические. Параметр характеризует относительное расположение средней линии профиля по высоте шероховатого слоя и равен отношению наибольшей глубины впадины профиля к общей высоте профиля в пределах базовой длины. Для симметричного профиля $\mu = 0{,}5$. Значения $\mu > 0{,}5$ соответствуют поверхности с преобладающим расположением материала в верхних участках шероховатого слоя и отдельными глубокими впадинами. Такая поверхность обладает повышенной жесткостью и износостойкостью, хорошей маслоемкостью, т. е. совокупностью положительных триботехнических свойств. Достоинствами предложенного параметра являются наглядность, простота вычисления и невысокая вариабельность.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, топография, профиль, параметры шероховатости, эксплуатационные свойства.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-5-13

ВВЕДЕНИЕ

Микротопография – важный компонент качества поверхности деталей технических устройств. Специалисты насчитывают до полутора десятков эксплуатационных параметров различных технических устройств и изделий, зависящих в той или иной степени от микротопографии поверхности [1–5]. Поэтому неудивительно, что вопросы технологического и метрологического обеспечения качества поверхности, и оптимальных параметров микротопографии в частности, остаются актуальными и являются предметом внимания специалистов широкого спектра научных специальностей.

Действующие отечественные и международные стандарты содержат различное количество параметров, характеризующих топографию поверхности на различных масштабных уровнях. При этом одним из основных источников информации о топографии поверхности остается ее профиль, несмотря на то что в настоящее время измерение трехмерных параметров не представляет проблемы. Так, ГОСТ Р ИСО 4287-2014 дает определения 16 параметров профиля поверхности. Можно привести несколько классификаций этих параметров в зависимости от основного признака, положенного в основу данной классификации. Различают, например, высотные, шаговые и гибридные параметры [2]. Можно также выделить дискретные параметры, выраженные одним числом, и параметры-функции [2], характеризующие зависимость свойств поверхности от ее микротопографии. К числу последних относится хорошо известная трибологам и

специалистам смежных специальностей опорная кривая (кривая Аббота – Файрстоуна). К таким же параметрам можно причислить статистические функции плотности вероятности высот (ординат) профиля. В то же время статистические моменты этих функций (средние значения, асимметрия, эксцесс) выступают дискретными числовыми параметрами.

Из всех параметров микротопографии поверхности высотные параметры являются единственными, оказывающими существенное влияние на все без исключения эксплуатационные характеристики поверхности (начиная от трения и изнашивания и кончая отражательной способностью и гигиеническими свойствами) [2]. В связи с вышесказанным цель данной работы – обоснование простого дискретного безразмерного высотного параметра топографии реальной поверхности, характеризующего ее с точки зрения эксплуатационных свойств (в первую очередь триботехнических).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

На рис. 1 приведены примеры профилограмм шероховатой поверхности в исходном состоянии (до приработки соответствующего узла) и после приработки.

(а) (б)

Рис. 1. Профилограммы шероховатой поверхности [2]
до приработки (а); после приработки (б)

Характерной особенностью поверхности после приработки является сглаженный профиль, т. е. отсутствие высоких пиков (выступов), которые были удалены в результате процесса изнашивания в период приработки. В процессе приработки сформировалась так называемая равновесная шероховатость, воспроизводящаяся в процессе эксплуатации узла. Она имеет повышенную несущую способность и износостойкость. С точки зрения триботехнических свойств поверхности оставшиеся от исходной шероховатости отдельные глубокие впадины играют положительную роль, так как служат своеобразными резервуарами для смазочного материала. Таким образом, с точки зрения триботехнических характеристик оптимальной является поверхность, у которой материал в основном сосредоточен в верхних слоях шероховатого слоя (см. рис. 1б) в отличие от поверхности с профилем, у которой материал в среднем равномерно распределен по высоте шероховатого слоя (рис. 1а). Профиль, аналогичный изображенному на рис. 1б, имеют, помимо приработанных, также поверхности, полученные в результате нескольких стадий обработки (как минимум двух: черновой и чистовой). При чистовой обработке отдельные высокие пики (выступы) в верхних участках шероховатого слоя удаляются, тогда как в нижних участках сохраняется исходная шероховатость с отдельными глубокими впадинами.

Несимметричность профиля на рис. 1б, в частности, приводит к тому, что средняя линия профиля в этом случае смещена ближе к линии выступов, тогда как у симметричного профиля на рис. 1а средняя линия примерно равноудалена от линии выступов и линии впадин. Все эти характерные особенности профилей, изображенных

на рис. 1, можно выразить через соотношение высотных параметров профиля *Rp*, *Rv*, *Rz* и *Rt*, которые, согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014, называются максимальная высота пика профиля, наибольшая глубина впадины профиля, максимальная высота профиля и общая высота профиля соответственно (рис. 2). Параметр *Rp* представляет собой расстояние от средней линии до линии выступов профиля, параметр *Rv* – расстояние от средней линии до линии впадин, параметры *Rz* и *Rt* имеют практически одинаковый смысл (расстояние от линии впадин до линии выступов) и отличаются тем, что первый определяется в пределах базовой длины, а второй – в пределах длины оценки, поэтому $Rz \leq Rt$. Во избежание недоразумений обратим внимание на то, что параметр *Rz* в действующих ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 25142-82 ранее, до внесения в них изменений в 2017 году, имел совершенно другой смысл и выражал среднюю высоту неровностей профиля по 10 точкам, а эквивалентом параметра *Rt* в указанных стандартах выступает параметр *Rmax* – полная высота профиля.

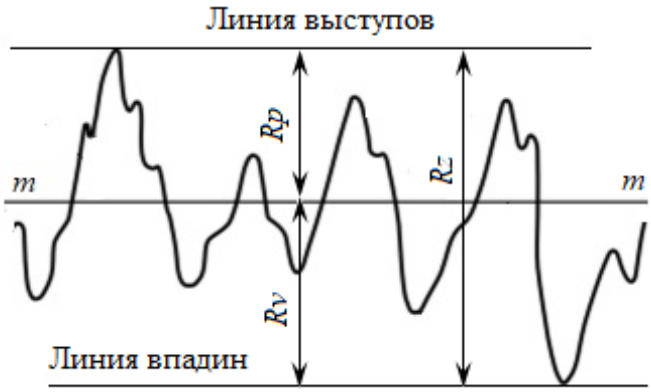


Рис. 2. Профиль шероховатой поверхности: *mm* – средняя линия

Таким образом, положение средней линии профиля шероховатой поверхности можно просто и наглядно охарактеризовать предлагаемым нами безразмерным параметром μ:

$$\mu = \frac{Rv}{Rz} = \frac{Rv}{Rv + Rp}.$$

Очевидно, что для симметричного профиля, аналогичного профилю на рис. 1а, $\mu \to 0{,}5$; для профиля, аналогичного профилю на рис. 1б, $\mu > 0{,}5$. Такие значения, в соответствии со сказанным выше, являются предпочтительными с точки зрения триботехнических свойств поверхности.

Разумеется, асимметричность профиля можно охарактеризовать нормированным параметром *Rsk* – асимметрия оцениваемого профиля (см. ГОСТ Р ИСО 4287-2014), который есть не что иное, как третий центральный момент случайной величины *Z* – ординаты профиля (расстояния от средней линии до линии профиля):

$$Rsk = \frac{1}{R_q^3}\left[\frac{1}{l_r}\int_0^{l_r} Z(x)^3 dx\right],$$

где R_q – среднеквадратичное отклонение профиля; l_r – базовая длина.

Смысл величины *Rsk* поясняется рис. 3 [2].

Однако, во-первых, наглядность параметра *Rsk* уступает наглядности предлагаемого нами параметра. Во-вторых, на величину параметра *Rsk*, как отмечается в ГОСТ Р ИСО 4287-2014, существенно влияют отдельные изолированные впадины и изолированные пики, т. е. его расчет требует определенной квалификации метролога.

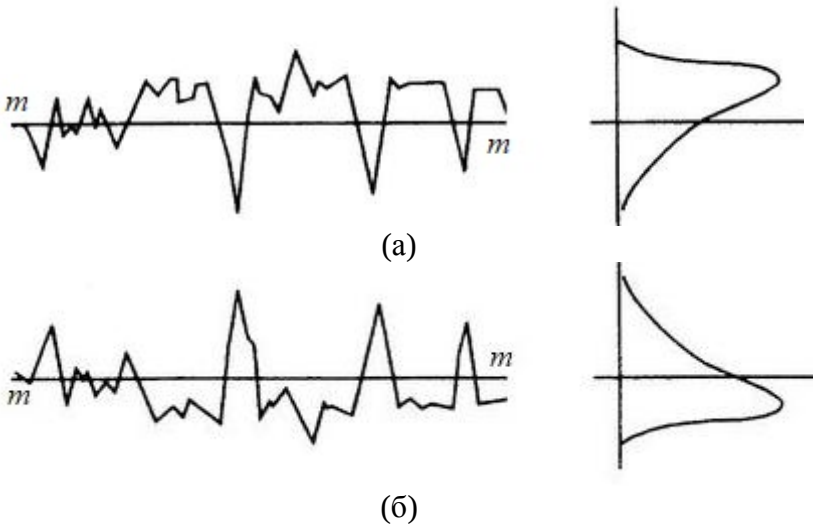


Рис. 3. Профили шероховатых поверхностей с различной асимметрией [2]: *Rsk* < 0 (а); *Rsk* > 0 (б): справа – функции плотности вероятности ординат профиля; *mm* – средняя линия

Другой стандартный параметр, характеризующий распределение материала в шероховатом слое, – это упомянутая выше опорная кривая (кривая коэффициента смятия профиля по терминологии ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Этот параметр, несмотря на наглядность, также не лишен недостатков. Во-первых, он не выражается конкретным числовым значением, что иногда затрудняет его применение. Во-вторых, форма опорной кривой и ее параметры чувствительны к наличию отдельных изолированных впадин и выступов, что подробно обсуждается в работе [6].

Наконец, в качестве еще одного параметра, близкого по смыслу к опорной кривой, можно упомянуть так называемый коэффициент заполнения профиля *Kp* [5], равный отношению площади материала (площади профилограммы между линией профиля и линией впадин) к площади, ограниченной линиями выступов и впадин в пределах базовой длины. Этот параметр, безусловно, обладает наглядностью, к тому же выражается конкретным числом, однако рассчитать его – задача не из простых.

Все сказанное дает основания рекомендовать предлагаемый нами параметр, наряду с другими, для характеристики топографии технических поверхностей.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовалась топография металлических поверхностей, полученных финишными методами обработки и имеющих малую микрошероховатость (*Rz* не более 0,1 мкм). Материал образцов – высоколегированная термообработанная сталь и технически чистое серебро для электрических контактов. Непосредственным объектом исследования были параметры наношероховатости, полученные с помощью атомного силового микроскопа.

В метрологии поверхностей ключевыми понятиями являются базовая длина *lr* и длина оценки *ln*, которая включает одну или несколько базовых длин. Поскольку для

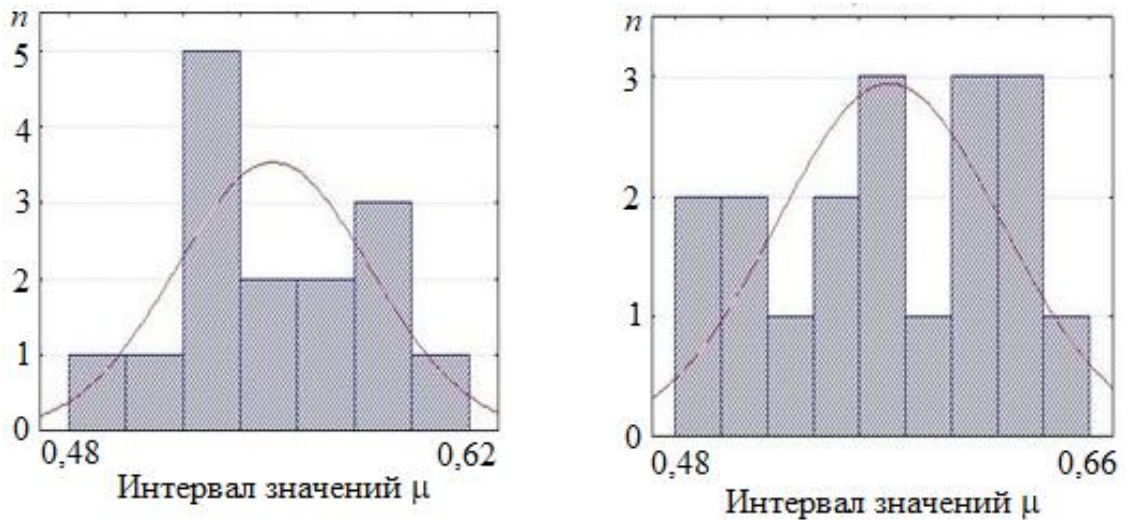
наношероховатости, в отличие от микрошероховатости, базовая длина не нормирована, в соответствии с рекомендациями [2] и возможностями АСМ базовую длину выбирали так, чтобы на ней укладывалось от 20 до 40 пересечений профилем его средней линии. Длину оценки принимали также не менее 5 базовых длин согласно рекомендациям [2, 7]. Подробнее вопрос выбора базовой длины и длины оценки обсуждается далее в соответствующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения параметров наношероховатости исследованных поверхностей и значения параметров μ с доверительными интервалами представлены в табл. 1, гистограммы значений μ – на рис. 4. Выражение «средние значения» применительно к параметрам из табл. 1 требует пояснений. По определению параметры *Rp, Rv* и *Rz* являются экстремальными, т. е. характеризуются единственным значением на базовой длине. Очевидно, что по своей природе эти параметры являются статистически неустойчивыми, будучи подвержены влиянию отдельных случайных выступов и впадин, в том числе царапин, загрязнений и других дефектов поверхности, не относящихся к топографии. Для повышения надежности этих параметров рекомендуется определять их не менее чем для 5 базовых длин с последующим усреднением. Такой подход позволяет, помимо всего прочего, исключить из рассмотрения случайные нетипичные выступы и впадины.

Таблица 1. Параметры наношероховатости

Материал образца	*Rp*, нм	*Rv*, нм	*Rz*, нм	μ = *Rv*/*Rz*
Сталь	7,56±0,49	9,35±0,85	16,91±1,17	0,55±0,02
Серебро	5,54±0,79	7,57±1,10	13,11±1,73	0,57±0,02



(а) (б)

Рис. 4. Гистограммы значений параметра μ для стали (а); серебра (б):
n – число значений μ в заданном интервале; линии – нормальное распределение

Параметр μ оказался статистически довольно стабильным, коэффициент вариации его равен 8,5 %. Значения параметра μ для наношероховатости

исследованных поверхностей больше 0,5, что, как отмечалось выше, благоприятно с точки зрения триботехнических свойств поверхности.

Представляет интерес сравнение значения предлагаемого параметра μ для нано- и микрошероховатости. На рис. 5 представлены величины параметра μ для микрошероховатости поверхностей, полученных различными способами механической обработки. Значения параметра μ рассчитаны нами на основании данных работы [8]. Значения параметра μ ожидаемо превышают величину 0,5 для таких видов обработки, как доводка и притирка. Вполне ожидаемо также значение μ < 0,5 для поверхности после точения, так как в этом случае шероховатость имеет значительную регулярную составляющую в виде характерных следов обработки резцом. Несколько неожиданно значение μ > 0,5 для фрезерования.

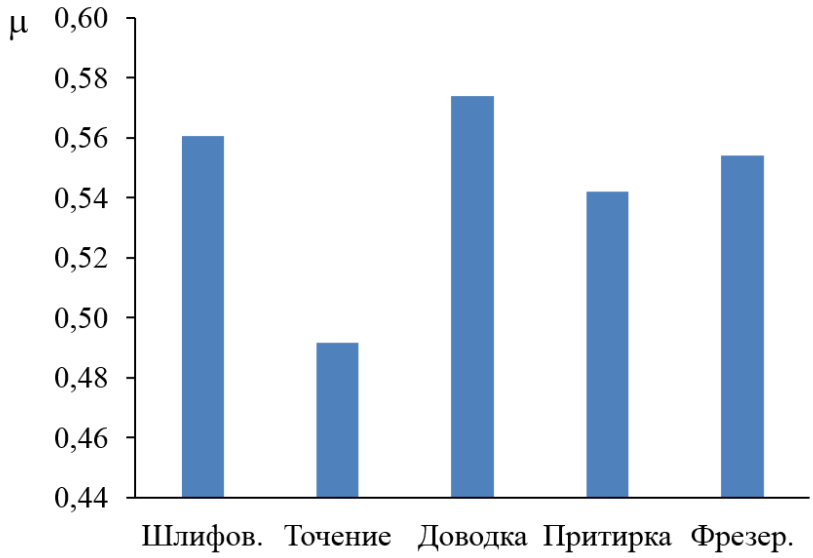


Рис. 5. Значения параметра μ для микрошероховатости поверхностей после различных способов механической обработки

Для микрошероховатости параметр μ, в отличие от наношероховатости, более изменчив: коэффициент вариации параметра μ = 0,23; 0,17; 0,20; 0,21 для шлифования, точения, доводки, притирки соответственно. Лишь для фрезерования коэффициент вариации параметра μ относительно невелик и равен 0,12.

О СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ

Как отмечалось выше, используемые для расчета параметра μ высотные параметры *Rp*, *Rv*, *Rz* и *Rt* статистически неустойчивы. Оценкой их изменчивости (вариабельности) может служить коэффициент вариации, равный отношению стандартного отклонения к среднему значению соответствующей величины. Значения коэффициентов вариации для перечисленных выше экстремальных высотных параметров даны в табл. 2. Действительно, величины коэффициентов вариации, приведенные в табл. 2, дают основания оценить вариативность экстремальных высотных параметров для стали как среднюю (10 % < *V* < 20 %), а для серебра – как значительную (*V* > 20 %).

Таблица 2. Значения коэффициентов вариации для параметров наношероховатости

Материал образца	Коэффициент вариации *V*, %		
	Rp	*Rv*	*Rz*
Сталь	11,8	16,4	12,5
Серебро	21,1	28,9	24,0

Два высотных параметра шероховатости – *Rz* и *Rt* – имеют близкий физический смысл и характеризуют суммарную высоту шероховатого слоя. Различие в том, что параметр *Rz* определяется на базовой длине, а параметр *Rt* – на длине оценивания, которая может составлять несколько базовых длин. Обычно увеличение длины оценивания ограничивается техническими возможностями средства измерения. Однако для профиля шероховатости, обладающей свойствами эргодичности, увеличение длины оценивания эквивалентно использованию нескольких базовых длин. В нашем случае число базовых длин составляло 15, при этом соотношения параметров *Rt* и *Rz* были следующие: для стальной поверхности *Rt* = 1,23*Rz*; для серебряной *Rt* = 1,5*Rz*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный безразмерный параметр профиля шероховатой поверхности $\mu = Rv/Rz$ обладает наглядностью и позволяет оценить шероховатую поверхность с точки зрения ее эксплуатационных свойств, в частности триботехнических. Оптимальными с точки зрения триботехнических свойств поверхности являются значения $\mu > 0{,}5$. Предложенный критерий имеет невысокую вариабельность (коэффициент вариации менее 20 %) и может, наряду с другими стандартными параметрами профиля, применяться в метрологии технических поверхностей и смежных областях науки и техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
2. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 472 с.
3. Лич Р. Инженерные основы измерений нанометровой точности. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 400 с.
4. Клепиков В.В., Порошин В.В., Голов В.А. Качество изделий. М.: МГИУ, 2008. 288 с.
5. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.
6. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О параметрах наношероховатости и некоторых корреляционных соотношениях // *Трибология – машиностроению: труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН.* М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. С. 210–213.
7. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.
8. Шлезингер Г. Качество поверхности. М.: Машгиз, 1947. 284 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об одном нестандартном параметре профиля шероховатой поверхности // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 5–12.

ON THE ONE NONSTANDARD PARAMETER OF A ROUGH SURFACE PROFILE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22 Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: iz2v@tvcom.ru

A dimensionless profile parameter of a rough technical surface μ is proposed, which characterizes its operational properties, including tribotechnical ones. The parameter characterizes the relative location of the profile mean line along the height of the rough layer and is equal to the ratio of the maximum profile valley depth to the maximum height of the profile within the sampling length. For a symmetrical profile, $\mu = 0{,}5$. Values $\mu > 0{,}5$ correspond to a surface with a predominant location of the material in the upper sections of the rough layer and individual deep valleys. Such a surface has increased rigidity and wear resistance, good oil absorption, i.e. has a combination of positive tribotechnical properties. The advantages of the proposed parameter are visibility, ease of calculation and low variability.

Keywords: rough surface, topography, profile, roughness parameters, operational properties.

REFERENCES

1. Dunin-Barkovskij I.V., Kartashova A.N. Izmerenie i analiz sherohovatosti, volnistosti i nekruglosti poverhnosti [Measurement and analysis of surface roughness, waviness and non-circularity]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 232 p.

2. Whitehouse D. Metrologiya poverhnostej. Principy, promyshlennye metody i pribory [Metrology of surfaces. Principles, industrial methods and devices]. Dolgoprudnyj: Intellekt, 2009. 472 p.

3. Leach R. Inzhenernye osnovy izmerenij nanometrovoj tochnosti [Engineering fundamentals of nanometer accuracy measurements]. Dolgoprudnyj: Intellekt, 2012. 400 p.

4. Klepikov V.V., Poroshin V.V., Golov V.A. Kachestvo izdelij [Product quality]. Moscow: MGIU, 2008. 288 p.

5. Grigoriev A.Ya. Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskih poverhnostej [Physics and microgeometry of technical surfaces]. Minsk: Belaruskaya navuka, 2016. 247 p.

6. Izmailov V.V., Novoselova M.V. On the parameters of nano-roughness and some correlation relationships. *Tribology – mechanical engineering: proceedings of the XII International scientific and technical conference dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS.* Moscow – Izhevsk: Institut kompyuternyh issledovanij, 2018, pp. 210–213. (In Russian).

7. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. Sherohovatosti, volnistosti, profili. Mezhdunarodnyj opyt [Roughness, waviness, profile. International experience]. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 136 p.

8. Schlesinger G. Kachestvo poverhnosti [Surface quality]. Moscow: Mashgiz, 1947. 284 p.

Поступила в редакцию/received: 22.05.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020;
принята/accepted 29.07.2020

УДК 621.941:004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

А.М. МИГРАНОВ, М.Ш. МИГРАНОВ, д-р техн. наук,
А.Ф. САДЫКОВ, И.И. ХУСАЕНОВ

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12, e-mail: migmars@mail.ru

Представлены результаты компьютерного моделирования теплофизических явлений в контактной зоне при лезвийной обработке резанием металлов инструментом с многослойными композиционными износостойкими покрытиями, обеспечивающими приспосабливаемость режущего клина к условиям трения. Проведены натурные экспериментальные исследования температуры резания при точении с различными покрытиями, структурно-фазовый анализ поверхностного слоя режущего инструмента для объяснения механизма формирования вторичных структур, обладающих экранирующим эффектом – эффектом самоорганизации.

Ключевые слова: износ, трибосистема, активация, пассивация, вторичные структуры, самоорганизация, теплофизические явления, изностойкие покрытия, экранирующий эффект.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-13-22

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность автоматизации технологических процессов и использования современного дорогостоящего высокопроизводительного станочного оборудования, оснащенного мехатронными системами, требует более полного изучения особенностей температурно-силовых условий лезвийной обработки резанием металлов, так как с точки зрения износостойкости наиболее слабым звеном является режущий инструмент [1–3]. В настоящее время накоплен значительный опыт и имеется множество теоретико-экспериментальных исследований по повышению эксплуатационных характеристик режущего инструмента путем использования современных многослойных композиционных износостойких покрытий, обладающих способностью приспосабливаться к условиям трения при резании благодаря образованию защитных вторичных структур.

Известно [4–8], что обработка резанием – термодинамический процесс, при котором тепловые явления в контактной зоне оказывают существенное влияние как на состояние режущего клина в целом, так и на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя инструмента с покрытием вследствие активации и пассивации энергии. Изменение внутренней энергии трибосистемы в дальнейшем приводит к взаимодействию активированных поверхностей с окружающей средой и образованию защитных структур, служащих «экраном» между контактирующими материалами. Контакт трибопары осуществляется с помощью вторичных структур, образующихся в зоне трения вследствие самоорганизации. Значение применения этого явления в технике и технологии сложно переоценить. Во время трения и износа самоорганизация материалов трибосистемы происходит как реакция на внешние условия, вызываемые процессом резания, что, во многих случаях, приводит к коренным структурным

изменениям в поверхностных слоях материалов. Эти изменения касаются многих характерных свойств трущихся поверхностей и близлежащих поверхностных слоев (например, геометрических параметров, микроструктуры, физико-химических и механических свойств).

Трение всегда сопровождает износ; оно является единственной «нормальной» причиной износа и потери инструментом режущих свойств, общие закономерности трения и износа взаимодействующей пары материалов инструмента и обрабатываемой детали составляют практическую основу при определении и назначении режимов резания. Трение возникает непосредственно в процессе резания и воздействует на явления резания, однако само зависит от элементов режима резания, создающих специфические условия для протекания трения. К этим условиям можно отнести высокие давления (пластическую деформацию) в зоне трения, широкий диапазон температур, наличие третьих тел (защитных вторичных структур) на трущихся поверхностях и т. д. На основе вышеизложенного можно предположить существование «идеальной» с точки зрения температурно-силовых условий резания и износостойкости режущего инструмента модели режущего клина, имеющего вид слоеного пирога (композита) (рис. 1). Эта модель сформирована комплексным (комбинированным) воздействием на поверхностный слой в результате самоорганизации. При этом каждый слой «пирога» (нанесение износостойких и демпфирующих покрытий (слои 1 и 2), имплантация различных металлов и неметаллов (слой 3) и использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в качестве катализатора) ответствен за определенную зону кривой износа и улучшает износостойкость инструмента в целом.

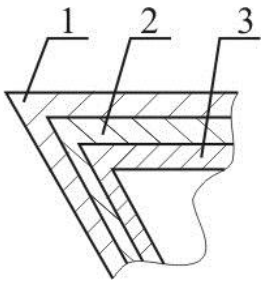


Рис.1. Модель режущего клина

Целью работы является моделирование теплофизических процессов и явлений самоорганизации при лезвийной обработке резанием инструментом с композиционными покрытиями, обеспечивающими минимизацию интенсивности износа режущего инструмента при различных температурно-силовых условиях в контактной зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе были проведены серии натурных экспериментов при продольном точении и фрезеровании по исследованию триботехнических характеристик и износостойкости режущего инструмента с различными покрытиями по составу и атомной структуре поверхностного слоя материала. Вместе с тем анализ литературных данных показал, что при наличии многочисленных трудов [см., например, 2–5] по исследованию контактных процессов при работе с режущим инструментом, покрытым многослойным композиционным износостойким покрытием, отсутствует информация о влиянии применения СОТС и самих покрытий, обладающих эффектом само-организации при трении. Известно [1, 4–7], что при трении на контактирующих поверхностях образуются защитные вторичные структуры, которые могут иметь

существенное значение для перераспределения тепловых потоков в зоне резания, что позволило бы управлять температурно-силовыми условиями при резании путем варьирования физико-механическими и теплофизическими параметрами сред и покрытий. Вышеизложенную задачу можно смоделировать благодаря наличию в настоящее время большого числа прикладных программных продуктов для персональной электронно-вычислительной машины. Применение этих продуктов существенно уменьшает трудоемкость, стоимость натурных экспериментов и увеличивает количество вариантов решений.

При контакте «инструмент – деталь» тепловой поток из зоны резания распределяется между обрабатываемой деталью, режущим инструментом, сходящей стружкой и окружающей средой [2]. Вместе с тем при направленном изменении физико-механических, структурных и теплохимических свойств СОТС и многокомпонентных композиционных покрытий можно оказать существенное воздействие на направление и в целом на распределение теплового потока. При увеличении теплового потока, передаваемого в стружку (в условиях высокоскоростной обработки), уменьшается тепловая нагруженность режущего клина инструмента с последующим изменением адгезионного и диффузионного износа. Отбор тепла (рекупирование) в зоне резания при низких скоростях обработки обеспечивает смазочный эффект за счет образования рутилы из покрытий и приводит к уменьшению абразивного износа.

На основе работ [2, 6] для решения уравнения теплопроводности и теплофизических параметров применительно к инструменту с покрытием были составлены системы дифференциальных уравнений для каждого из источников и затем разработана программа для их расчетов, проведены расчеты температурных полей в зоне резания. Результаты расчетов и анализ полученных многовариантных данных показал, что, во-первых, всегда необходимо учитывать переменность основных составляющих уравнения, во-вторых, невозможно их систематизировать, в-третьих, нельзя дать наглядную оценку температурного поля в зоне резания, позволяющую регулировать режимы резания.

В настоящее время для решения сложных дифференциальных задач с несколькими переменными и оценивания направленности и количества теплового потока все чаще применяются в инженерных и исследовательских работах, содержащих теплофизический анализ, пакеты программ DEFORM, ANSYS и др. Это позволяет не только моделировать, но и наглядно демонстрировать направление теплового потока при различных скоростях резания, проиллюстрировать контактные процессы в зоне резания при различных теплофизических свойствах многослойных износостойких покрытий и переменности технологических параметров.

В работе были проведены серии натурных испытаний по определению триботехнических характеристик твердосплавных режущих инструментов групп ВК, ТК и ТТК с различными покрытиями ((TiCr)N, (TiAl)N, (AlTi)N, (TiAlCr)N, (AlTiCr)N), а также по установлению температуры резания методом естественной термопары при точении конструкционной стали марки 40Х с твердостью 20 HRC на токарно-винторезном станке 16К20 неперетачиваемыми пластинами со всеми вышеперечисленными покрытиями. При этом были проведены предварительные экспериментальные исследования и сравнительный анализ данных математической модели с реальными значениями температуры резания и износостойкости режущего инструмента, нанесенных различными фирмами («Бальцерс», Caromant, Carbide, Rimet) по заводским технологиям.

Триботехнические свойства были определены с помощью адгезиомера особой конструкции [9]. На адгезиомере (рис. 2) вращающийся индентор с исследуемыми

покрытиями 2 был помещен между двумя полированными образцами 1, изготовленными из обрабатываемого материала. Для моделирования условий трения, аналогичных процессу резания, образцы и индентор нагревались электроконтактным способом в диапазоне температур от 150 до 1 050 °С. Для создания пластической деформации в зоне контакта, аналогичной процессу резания, образцы из обрабатываемого материала 1 сжимались силой, равной 2 400 Н. При этом для оценки антифрикционных свойств слоя был использован адгезионный компонент коэффициента трения. Этот компонент важен для анализа и прогнозирования интенсивности износа при трении металлов. Он определялся как отношение сопротивления сдвигу τ_{nn}, вызываемому адгезионным взаимодействием между материалами инструмента и обрабатываемой деталью, к нормальному напряжению P_{rn}, возникающему на пластическом контакте при температурах испытания (τ_{nn}/P_{rn}).

В работе для получения сведений о средней температуре контакта при резании с достаточно высокой точностью, простотой и надежностью был использован, согласно рекомендациям [2], метод естественной термопары. Ее принципиальная схема для операций точения представлена на рис. 3. Модель установки включает в себя также диск 4 с тянущим тросиком 3, электроконтактные клеммы 5 с изоляторами 6.

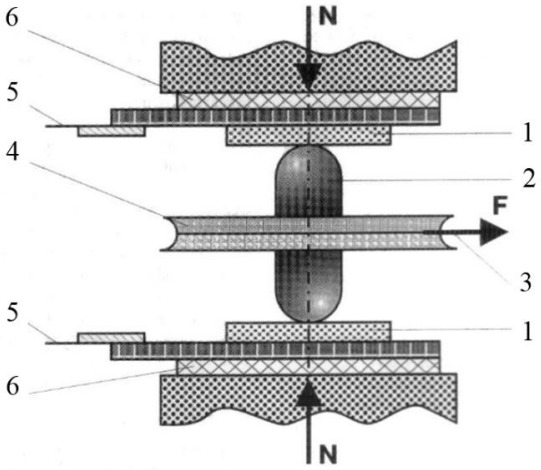


Рис. 2. Модель установки для исследования триботехнических свойств

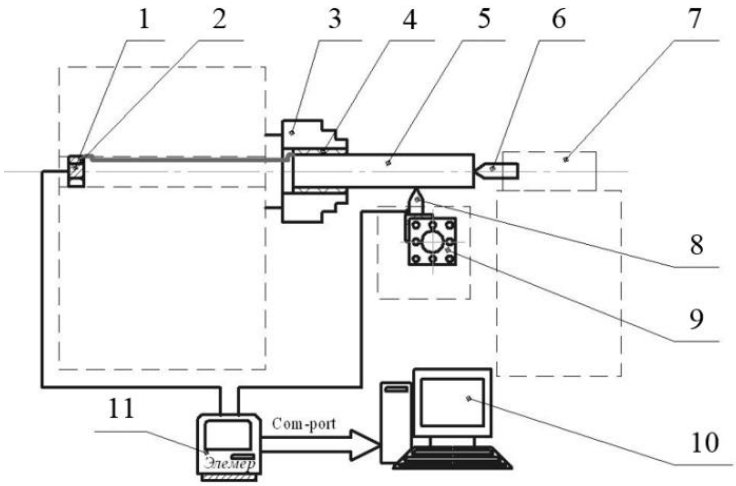


Рис. 3. Схема измерения температуры методом естественной термопары

Схема состоит из ртутного токосъемника 1, изоляции 2, 4, патрона 3, заготовки 5, изолированного заднего центра 6, задней бабки 7, резцедержателя 8, резца с изоляцией 9, компьютера 10, цифрового вольтметра 11 (см. рис. 3). Для исключения погрешностей измерения от «блуждающих паразитных» термоэлектродвижущих сил деталь и резец изолировались друг от друга текстолитовыми прокладками.

Результаты температурных экспериментов при точении режущим инструментом с различными покрытиями представлены на рис. 4. Было установлено, что с точки зрения температуры (тепловой нагруженности) зоны резания при минимизации интенсивности износа режущего инструмента наиболее благоприятной является многослойное композиционное покрытие (TiAl)N фирмы Rimet.

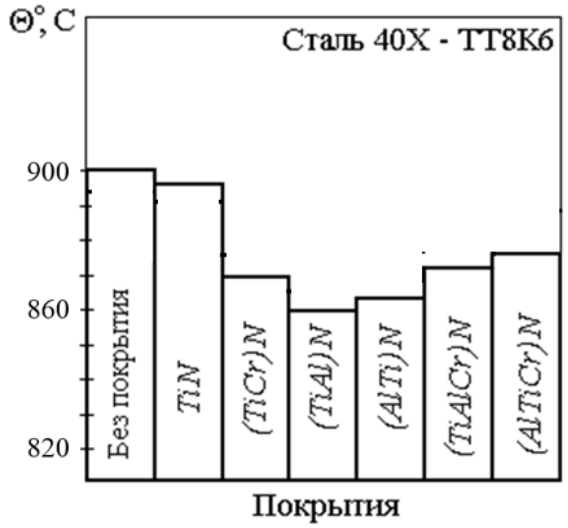


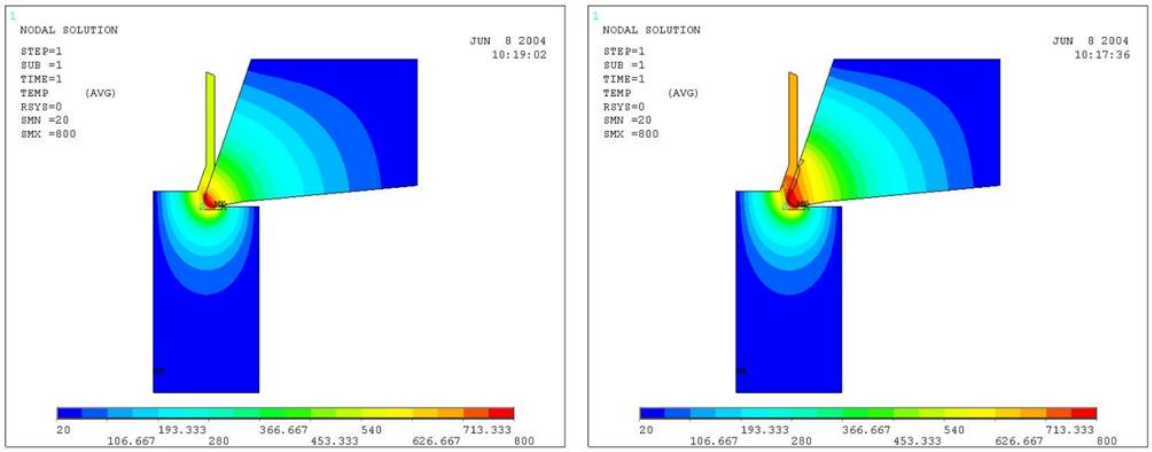
Рис. 4. Влияние типа покрытия на температуру Θ
в зоне резания при продольном точении

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При разработке методики и моделировании были приняты следующие допущения: теплопроводность, удельная теплоемкость инструментального и обрабатываемого материалов не зависят от температуры; источники теплообразования распределены в контактных поверхностях и в плоскости скалывания; плоскость скалывания расположена перпендикулярно передней поверхности резца; теплообмен с окружающей средой отсутствует; коэффициенты трения, силы резания, усадки стружки, длины контактных поверхностей для режущих инструментов с различными покрытиями являются переменными; скорость движения элементов материала стружки одинакова по ее толщине. Величины интенсивности тепловыделения были взяты из работ профессора А.Н. Резникова. Для идентичности экспериментальных данных и результатов моделирования обеспечивалось постоянство оптимальной скорости резания по интенсивности износа режущего инструмента при переменности коэффициента теплопроводности и физико-химического состава покрытий. На рис. 5 показаны результаты расчетов (программный пакет – ANSYS) при различных коэффициентах теплопроводности материала детали, инструмента и покрытия.

По результатам натурных экспериментальных исследований и моделирования было установлено, что в непосредственном контакте с деталью находится материал покрытия, коэффициент теплопроводности которого меняется в зависимости от типа покрытия. Так, на рис. 5а коэффициент теплопроводности покрытия $\lambda = 0{,}25$, на рис. 5б

λ = 0,15. При этом температура в стружке повышается по мере того, как меняется коэффициент теплопроводности покрытия при одной и той же температуре контакта, т. е. большая часть теплоты из зоны резания перемещается в стружку. Таким образом, меняя теплофизические свойства поверхностей трения, толщину и структурный состав покрытий для режущего инструмента, можно прогнозировать и управлять тепловым режимом, обеспечивать минимизацию интенсивности износа режущего инструмента при резании металлов.



(а) (б)

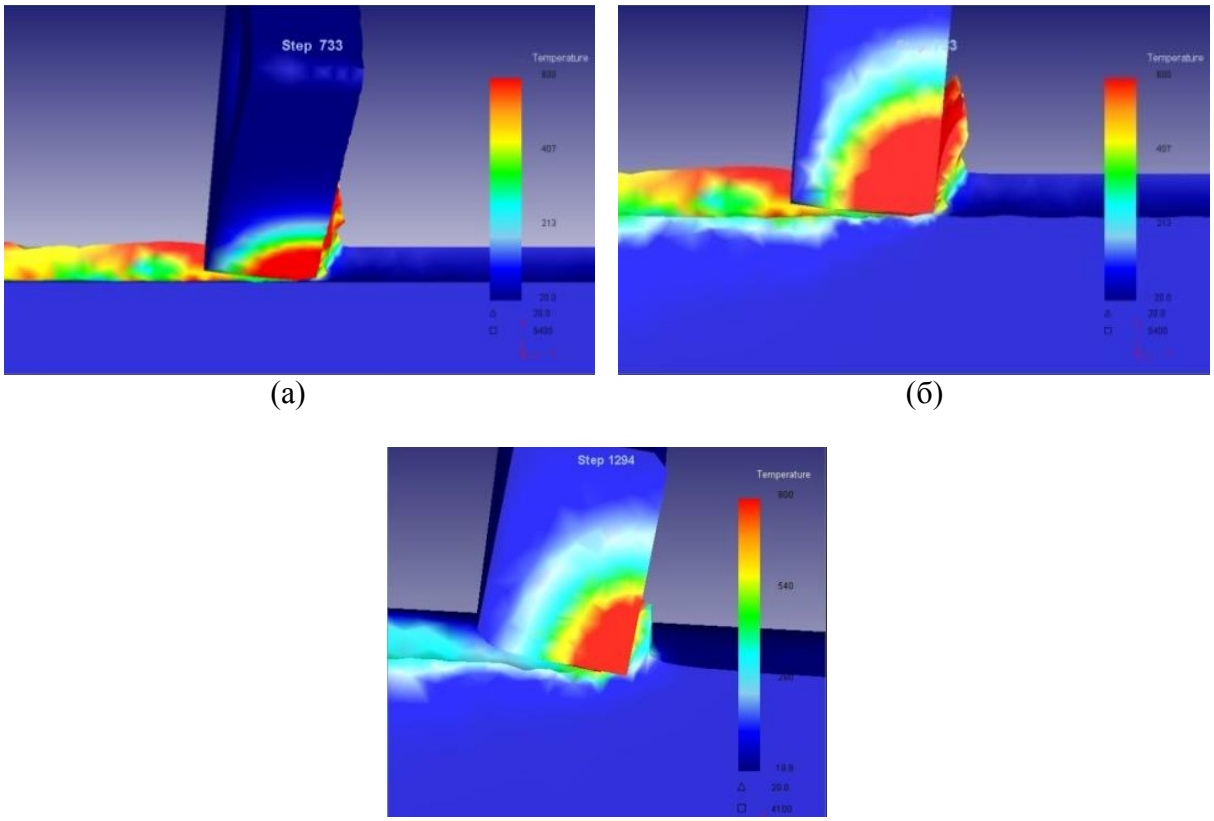
Рис. 5. Расчет температурных полей в среде ANSYS: λ = 0,25 (а); λ = 0,15 (б)

С точки зрения наглядности и информативности интересные результаты были получены при использовании пакета программ DEFORM (рис. 6). В частности, можно видеть, что на начальном этапе резания инструментом с многослойным покрытием (рис. 6а) и без покрытия (рис. 6б) основная часть тепла сосредоточена по задней поверхности режущего клина. При этом из-за высокой температуры в зоне резания и адгезионных явлений будет интенсифицироваться радиальный износ режущего клина, обусловливающий размеры обрабатываемой детали и показатели качества поверхностного слоя. Вместе с тем по прошествии некоторого времени происходит перераспределение (переход) теплового потока с задней на переднюю поверхность инструмента (рис. 6в), т. е большая часть тепла уходит в стружку, что более благоприятно с точки зрения адгезии и уменьшения размерного износа [2, 3]. Моделирование в среде DEFORM позволяет, кроме теплофизических параметров, учитывать дополнительно технологические – скорость резания, наличие покрытия или СОТС, а также износа режущего инструмента и их влияние на распределение тепловых потоков, что имеет важное значение при использовании этой методики в условиях реального машиностроительного производства.

Сравнительный анализ результатов расчета значений температур по математическим моделям и данным натурных экспериментов показал, что расхождение составляет 3…6 % и является достаточно объективной оценкой температурного поля в зоне резания [6]. На основе теоретико-экспериментальных исследований предложены рекомендации по температурному режиму для обеспечения минимизации интенсивности износа режущего инструмента с различными покрытиями.

Для объяснения механизма изменения температурного режима и теплового потока в контактной зоне были проведены дополнительные исследования поверхностей режущего инструмента с покрытиями после обработки резанием [7, 8]. Чтобы понять физический механизм явлений, которые имеют место на поверхности «режущий

инструмент – обрабатываемая деталь», исследовались химический и фазовый составы поверхностных слоев с помощью современных методик и оборудования для анализа состава поверхности покрытия и наружной поверхности пленок, образующихся на кромке режущего инструмента, а также для анализа контактирующей поверхности стружки. Результаты спектроскопических исследований позволили установить, что при высокоскоростном резании на поверхности режущего инструмента с покрытиями образуются оксиды титана, так называемые рутилы, и оксиды алюминия с аморфноподобной структурой. Известно [1, 4, 7], что рутилы работают как смазочный материал, а аморфноподобные структуры обладают экранирующим (для теплового потока) и защитным (износостойким) эффектами.



(а) (б)

(в)

Рис. 6. Результаты расчетов температурных полей в зоне контакта режущего инструмента при скорости резания $V = 450$ м/мин: с покрытием на начальном этапе резания (а); без покрытия на начальном этапе резания (б); с покрытием по прошествии 5 мин от начала резания (в)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты натурных экспериментальных исследований при точении и компьютерного моделирования теплофизических явлений при изменении температуры резания сопоставимы. В широком диапазоне изменения элементов режима резания при точении режущим инструментом с износостойкими покрытиями для предварительных расчетов и разработки перспективных многослойных композиционных покрытий с эффектом самоорганизации можно использовать программные продукты DEFORM и ANSYS, которые подтверждают адекватность модели.

Высокоскоростная обработка резанием приводит к трибоокислению многослойных композиционных покрытий, которое является важным и благоприятным

процессом для самоорганизации и формирования кислородосодержащих соединений на металлической основе. Они могут действовать как экран и защищают поверхность инструмента, в целом повышают износостойкость. При этом эффект самоорганизации дает возможность создать покрытия, обеспечивающие благоприятный температурный режим в контактной зоне при резании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Польцер Г., Эбиленг В., Фирковский А. Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры и самоорганизация // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 1. С. 12.
2. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
3. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting // *Wear*. 1997. V. 206. №. 1-2. P. 214–220.
5. Криони Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 377 с.
6. Мигранов М.Ш., Ахмаров Р.Г., Мигранов А.М. Распределение температурных полей в зоне резания // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2018. С. 83–86.
7. Migranov M.Sh., Migranov R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496. P. 75–79.
8. Vereschaka A.S., Migranov M.Sh., Vereschaka A.A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. V. 10. № 20. P. 9282–9286.
9. Патент РФ 34249 на полезную модель. *Прибор для исследования адгезионного взаимодействия* / Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш. Заявл. 24.06.2003. Опубл. 27.11.2003, Бюл. № 33.

Для цитирования: Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Садыков А.Ф., Хусаенов И.И. Моделирование теплофизических явлений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 13–21.

MODELING OF THERMOPHYSICAL PHENOMENA

A.M. MIGRANOV, M.Sh. MIGRANOV, Dr. Sc.,
A.F. SADYKOV, I.I. KHUSAENOV

Ufa State Aviation Technical University, 12, K. Marx st.,
450008, Ufa, Russian Federation, e-mail: migmars@mail.ru

The results of the computer modeling of thermophysical phenomena in the contact zone during blade cutting of metals with multi-layer composite wear-resistant coatings are presented. These results ensure the adaptability of the cutting wedge to friction conditions.

In-situ experimental studies of the cutting temperature during turning with various coatings and structural-phase analysis of the surface layer of the cutting tool were carried out to explain the mechanism of formation of secondary structures with a shielding effect - the self-organization effect.

Keywords: wear, tribosystem, activation, passivation, secondary structures, self-organization, thermal phenomena, wear-resistant coatings, shielding effect.

REFERENCES

1. Polzer G., Ebeling V., and Firkowski. External friction of solids, dissipative structures and self-organization. *Friction and wear*. 1988. V. 9, No. 1, pp. 12. (In Russian).

2. Makarov A.D. Optimizatsiya protsessov rezaniya [Optimization of cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 278 p.

3. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. Rezaniye materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii [Cutting materials. Thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2001. 448 p.

4. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Shuster L.S., Bokiy Y.F., Dosbayeva G.K., Wainstein D.L., Mishina V.P. Characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting: 1. Characteristic features of wear in HSS-based deformed compound powder materials at cutting. *Wear*. 1997. V. 206. No. 1-2, pp. 214–220.

5. Krioni N.K., Migranov M.Sh. Pokrytiya i smazki dlya vysokotemperaturnykh tribosopryazheniy [Coatings for high-temperature and lubrication of tribo-couplings]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, 2016. 377 p.

6. Migranov M.Sh., Akhmarov R.G., Migranov A.M. Distribution of temperature fields in the cutting zone. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*, 2018, pp. 83–86. (In Russian).

7. Migranov M.Sh., Migranova R.M. Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions. *Key Engineering Materials*. 2012. V. 496, pp. 75–79.

8. Vereschaka A.S., Migranov M.Sh., Vereschaka A.A., Sharipov O. Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on hss with high melting point compounds. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* 2015. V. 10. No. 20, pp. 9282–9286.

9. Patent RF 34249 for utility model. *Pribor dlya issledovaniya adgezionnogo vzaimodeystviya* [Device for the study of adhesive interaction] / Shuster L.Sh., Migranov M.Sh. Declared 24.06.2003, Published 27.11.2003, Bulletin No. 33.

Поступила в редакцию/received: 18.05.2020; после рецензирования/revised: 14.07.2020; принята/accepted 29.07.2020

УДК 621.762

СИНТЕЗ КОМПОЗИЦИОННОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО АБРАЗИВНЫХ СВОЙСТВ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

Разработан инновационный алмазосодержащий композиционный материал, сформированный методом микродугового оксидирования на поверхности спеченной заготовки из алмазно-алюминиевой смеси. Предложен способ модификации базовой технологии получения материала с целью снижения энергозатрат и улучшения его фрикционных свойств. При замене части алюминиевой пудры порошком электрокорунда белого, спекании и формировании алмазно-керамического материала методом микродугового оксидирования сокращается общее время формирования материала. Установлено, что добавка порошка корунда оказывает положительное влияние на ход процесса микродугового оксидирования. Разработана принципиальная структурная модель нового материала. Фрикционные испытания показали преимущество алмазосодержащих материалов модифицированного состава по сравнению с базовым. Предлагается для прецизионной абразивной микрообработки твердых материалов применять новый материал в качестве инструментального.

Ключевые слова: абразивный керамический материал, микродуговое оксидирование, модификации оксида алюминия, трение, износ.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-22-32

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы область применения алмазно-абразивных материалов значительно расширилась, что обусловлено разработкой и внедрением новых видов связующих матриц, в которые встраиваются зерна алмазов [1–7]. Для достижения высоких технико-экономических показателей абразивной обработки необходимо правильно определить оптимальную область применения каждого инструментального материала [7–11].

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить уникальный абразивный алмазосодержащий керамический материал, обладающий качественно более высокими по сравнению с известными фрикционными характеристиками [12, 13]. Основной рабочий слой материала формируется методом микродугового оксидирования (МДО) на поверхности спеченной алмазно-алюминиевой заготовки в виде керамического покрытия, определенной толщины, с дисперсными включениями металлизированного медью алмаза [14–16]. Весь процесс получения керамического материала продолжается достаточно длительное время (порядка 3…4 ч), что влечет существенные расходы.

Экономический анализ получения керамического композиционного материала показал, что значительные затраты электроэнергии расходуются в процессе МДО при преобразовании алюминиевой матрицы в оксид алюминия Al_2O_3. В связи с этим было предложено внести уточнение в технологию его получения: заменить часть алюминиевой пудры порошком белого корунда. Белый электрокорунд по химическому

и физическому составу является наиболее однородным из видов оксида алюминия. В процессе его производства чистая окись алюминия расплавляется в дуговой печи, в результате чего модификация γ-Al_2O_3 превращается в α-Al_2O_3 [17]. Предполагается, что данная корректировка технологии позволит сократить общее время формирования материала, снизить расходы на энергопотребление. Необходимо оценить, как добавка белого корунда в состав смеси заготовки для получения алмазосодержащего керамического материала скажется на протекании процесса МДО и триботехнических свойствах сформированного многокомпонентного материала.

Цель исследования – определение особенностей формирования нового энергоэффективного алмазосодержащего керамического материала и оценка влияния модифицирующих добавок на его триботехнические свойства и перспективы практического применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления матрицы композиционного алмазосодержащего материала использовалась алюминиевая пудра, порошок электрокорунда белого 25А. Наполнителем являлись синтетические алмазы марки АС6, покрытые медью, сформированной методом химического осаждения на их поверхности.

Оксидирование спеченных образцов [13], базового и модифицированного составов проводили на оборудовании, включающем в себя источник питания; гальваническую ванну с рубашкой охлаждения; компрессора для сжатого воздуха, вытяжной вентиляции, дистиллятора. Состав электролита – едкий натрий NaOH (2 г/л), жидкое стекло Na_2SiO_3 (6 г/л). Плотность тока – 10 А/дм^2.

Фрикционные характеристики образцов исследовали на машине трения МТ-2, реализующей схему «палец-кольцо» [18]. Смазочный материал— техническая вода, материал контробразца – керамический материал на основе BaO-SiO_2-Al_2O_3 (твердость материала – 16 ГПа).

Относительный расход алмазов *J*а композиционного керамического материала, характеризующий износостойкость материала, при испытаниях в режиме абразивного инструмента определялся как отношение массы алмазов, находившихся в изношенном алмазоносном слое, к массе изношенного материала контртела [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технология получения композиционного материала. Проведенные исследования показали, что сокращение времени формирования покрытия при сохранении его триботехнических свойств достигается при замене 10…25 об. % алюминиевой пудры порошком корунда, зернистость которого в 2…10 раз меньше зернистости алмазного порошка. Для оценки энергоэффективности, которая находится в прямой зависимости от времени МДО, были использованы алмазы зернистостью *d* 63/50 со степенью металлизации *M* 75 %. Концентрация алмазов *K* в испытуемых образцах составляла 100 %, относительная плотность керамического материала *Q* – 90 %. Выбор зернистости и количества вводимого порошка корунда обусловлен представленными далее в статье выводами, сделанными по результатам испытаний.

Замена порошком корунда менее 10 об. % алюминиевой пудры не оказывала существенного влияния на процесс МДО, его ускорение практически не происходило (табл. 1). При замене порошком корунда более 25 об. % алюминиевой пудры диэлектрическая структура многокомпонентного материала значительно изменялась, что привело к локальному снижению плотности тока, необходимого для возникновения микродуговых разрядов. Процесс МДО протекал неустойчиво; толщина формируемого покрытия была недопустимо низкой, на нем присутствовали очаги электрохимической коррозии.

При использовании корунда зернистостью, сравнимой с зернистостью алмазного зерна, происходило формирование пористого алмазосодержащего композиционного материала с низкой конструкционной прочностью. Его относительная плотность была ниже, чем у материала, полученного по первоначальной технологии, на 13…27 % при сопоставимых условиях прессования и спекания. Поэтому образовавшийся материал заведомо обладал худшими механическими и триботехническими свойствами.

При использовании порошка корунда зернистостью, которая в 10 и более раз ниже зернистости алмазного порошка, сформированный МДО алмазосодержащий композиционный материал имел, в отличие от материала, полученного по первоначальной технологии при аналогичных режимах, значительно меньшую толщину (табл. 2). Это было обусловлено существенным изменением диэлектрической структуры спеченной композиционной матрицы, которая препятствует проникновению электрического поля в глубину обрабатываемого материала в процессе оксидирования [20]. В результате этого внутри композиционного материала мощность микродуговых разрядов была не всегда достаточной для перехода частиц алюминия в высокотвердый оксид алюминия и формирования сплошного композиционного слоя из алмазов и корунда. Кроме того, периодически на формируемом покрытии возникали очаги электрохимической коррозии. Все эти особенности протекания процесса оксидирования приводили к резкому снижению толщины, прочности и, как следствие, износостойкости получаемого композиционного алмазосодержащего материала.

Таблица 1. Влияние количества порошка корунда на энергоэффективность покрытия и его толщину

Объемная доля порошка Al_2O_3, %	Время процесса МДО, ч	Толщина материала, мм
0	3	1,1
10	2,5	1,05
17	2,25	1,03
25	2,3	0,85

Примечание: зернистость порошка Al_2O_3 – М14.

Таблица 2. Влияние зернистости порошка корунда на энергоэффективность покрытия и его толщину

Зернистость порошка Al_2O_3	Размер зерен Al_2O_3 основной фракции, мкм	Время процесса МДО, ч	Толщина материала, мм
М7	7…5	2,8	0,76
М14	14…10	2,25	1,03
М28	28…20	2,6	0,87

Примечание: объемная доля порошка Al_2O_3 – 17 %.

Было установлено, что время формирования композиционного алмазного керамического материала при применении модифицированной технологии сокращается в 1,2…1,3 раза. Наиболее оптимальный результат интенсификации процесса МДО достигается при замене 15…20 об. % алюминиевой пудры порошком корунда зернистостью, в 5...6 раз меньшей зернистости алмазного зерна.

Типичные хронограммы формирования композиционного материала базового и модифицированного состава методом МДО показаны на рис. 1. Установлено, что добавка порошка корунда в материал смеси для матрицы композиционного материала оказывает положительное влияние на ход процесса микродугового оксидирования. Время выхода на режим гальванолюминисценции при формировании модифицированного материала сокращался, тем самым увеличивался период действия устойчивых искровых разрядов, формирующих материал.

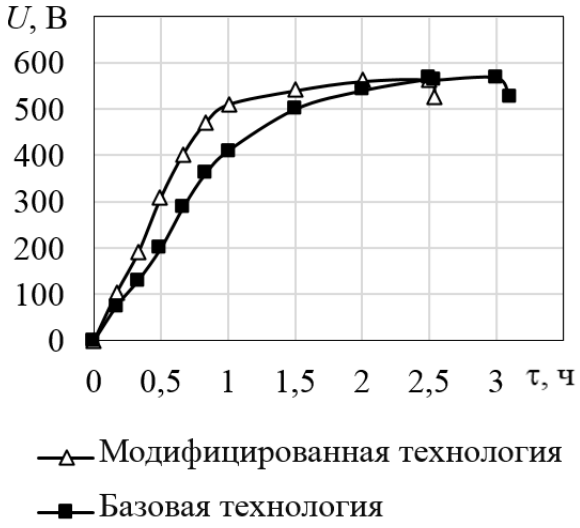


Рис. 1. Зависимость напряжения от времени ведения процесса МДО при объемной доле порошка Al_2O_3 = 17 %, *d* = 63/50, *M* = 100 %

В результате микроструктурного анализа образцов из алмазосодержащего керамического материала модифицированного состава была разработана его принципиальная структурная модель (рис. 2). Структура материала представляет собой зерна алмаза, имеющие медные нанопокрытия, которые внедрены в пористую керамическую матрицу. Матрица имеет неоднородный вид, т. е. является сложным комплексом из α-, β-, и γ-модификаций оксидов алюминия, сформированных в процессе МДО спеченной алюминиевой пудры.

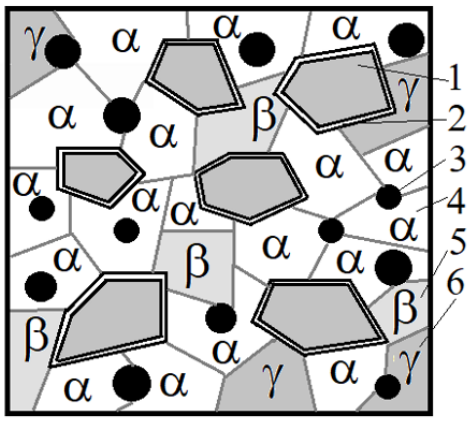
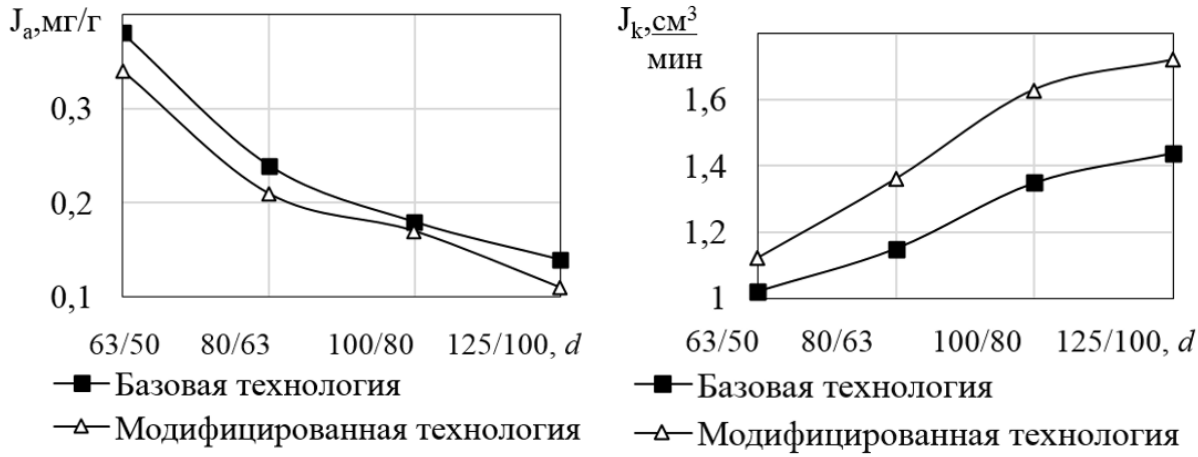


Рис. 2. Принципиальная структурная модель алмазосодержащего керамического материала: 1 – зерна алмаза; 2 – слой меди; 3 – поры; 4 – α-Al_2O_3; 5 – β-Al_2O_3; 6 – γ-Al_2O_3

Модификация α-Al_2O_3, или корунд, преобладает, так как является наиболее устойчивой. Корунд характеризуется наилучшим комплексом физико-механических свойств по сравнению с другими модификациями (высокой твердостью, химической и температурной стойкостью, хорошими фрикционными свойствами) и успешно применяется в качестве абразивного материала. Замена части алюминиевой пудры порошком белого корунда, который изначально является только оксидом α-Al_2O_3, позволяет повысить долю α-модификации корунда в материале матрицы и улучшить механические и триботехнические свойства композиционного керамического материала, модифицированного состава по сравнению с базовым.

Результаты сравнительных триботехнических испытаний базового и модифицированного материалов. На рис. 3 приведены данные, полученные при изучении влияния зернистости и концентрации алмазов в инструментах, изготовленных из алмазосодержащих керамических материалов базового и модифицированного состава (объемная доля порошка Al_2O_3 – 17 %), на триботехнические характеристики пары трения: абразивный керамический инструмент – обрабатываемая деталь. На рис. 3 приняты следующие обозначения: J_a – массовый расход алмазного порошка отнесенный к массе изношенного слоя контробразца; J_k – скорость объемного износа контробразца.



(а) (б)

Рис. 3. Влияние зернистости алмазов в композиционных керамических материалах на величину износа абразивных кругов (а) и интенсивность объемного износа контробразца (б): *K* = 100 %, *M* = 75%

При увеличении зернистости алмазов износостойкость кругов из алмазосодержащего керамического материала повышается в обоих случаях (см. рис. 3а), как было отмечено ранее, в связи с повышением твердости в целом всего материала. Износостойкость материала, изготовленного по модифицированной технологии, несколько выше. В данном случае сказывается положительная роль увеличения содержания в матрице α-модификации Al_2O_3, достигнутая введением порошка белого корунда, имеющего наиболее высокую твердость в сравнении с другими модификациями. При трении алмазосодержащих керамических материалов твердость матрицы играет значительную роль, так как с ней контактируют выступающие неровности контробразца (керамика состава $BaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ и твердостью 16 ГПа). Увеличение твердости матрицы способствует повышению ее сопротивления к абразивному изнашиванию твердыми продуктами износа керамического контробразца и абразивного материала, уменьшению вероятности преждевременного выкрашивания

режущих алмазных зерен. В результате снижаются величина относительного расхода алмаза и экономические затраты на абразивную обработку деталей инструментами, изготовленными по модифицированной технологии.

Зернистость алмазов в композиционном материале является наиболее значимым фактором, определяющим интенсивность объемного износа контробразца (иначе – объемную режущую способность будущего абразивного инструмента, изготовленного из предлагаемого материала) (см. рис. 3б). С увеличением зернистости алмазов в материалах, изготовленных по обеим технологиям, интенсивность объемного износа контробразца растет практически линейно в интервале 63/50…100/80. Это можно объяснить увеличением высоты выступания режущих зерен алмаза из материала матрицы и процента активных режущих зерен, ранее не участвующих во фрикционном взаимодействии из-за неравномерного распределения зерен по высоте. При дальнейшем увеличении размера алмазов рост интенсивности объемного износа контробразца несколько замедляется, что вызвано различными факторами. Увеличение зернистости ведет к изменению геометрических параметров частиц алмаза, а именно увеличению радиусов округления вершин и уменьшению остроты режущих кромок. При увеличении зернистости также уменьшается общее число режущих алмазных зерен на единицу рабочей поверхности абразивного материала.

Алмазосодержащие керамические материалы модифицированного состава показали несколько большую величину интенсивности объемного износа контробразца или объемную режущую способность по сравнению с базовыми. Повышение твердости матрицы за счет увеличения в ее составе α-модификации Al_2O_3 способствует упругому деформированию при внедрении алмазосодержащей абразивной поверхности в обрабатываемый материал. Как было отмечено выше, прочная связка лучше удерживает алмазные зерна, не позволяет им выкрашиваться из поверхности до достижения значительного износа режущих поверхностей. Высокая твердость матрицы материала способствует реализации режима самозатачивания инструмента из модифицированного алмазосодержащего керамического материала. На рис. 4 приведен внешний вид экспериментального абразивного инструмента.

Рис. 4. Экспериментальные шлифовальные круги
из композиционного материала

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали проведенные исследования, инструменты, изготовленные из нового упрочненного композиционного материала, обладают более высокими функциональными свойствами в сравнении с традиционными абразивными алмазосодержащими материалами. Материалы сочетают в себе высокую режущую способность с низкой величиной относительного расхода алмазов. В процессе эксплуатации абразивные инструменты из разработанного материала функционируют в режиме самозатачивания и могут эффективно применяться для обработки специальных изделий из высокотвердых материалов.

Новый синтезированный абразивный материал будет востребован для прецизионной микрообработки сверхтвердых материалов в различных отраслях точного машиностроения. Механическая абразивная обработка, проводимая малоразмерными алмазосодержащими инструментами на керамической связке, незаменима при изготовлении сложнопрофильных деталей из твердого стекла, минералов, керамики, твердых сплавов, ферритов, германия и других особо прочных материалов.

Внедрение операций прецизионной микрообработки деталей, проводимых абразивными алмазосодержащими инструментами, позволит существенно увеличить экономическую эффективность и качество продукции при производстве электронной техники, в точном приборостроении, ювелирной и часовой промышленности. Предлагаемый материал найдет применение в современной микрохирургии, в частности при изготовлении алмазных стоматологических боров и инструмента для обработки костной ткани, для производства мелкоразмерных элементов медицинского оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bushlya V., Lenrick F., Gutnichenko O., Petrusha I., Osipov O., Kristiansson S., Stahl J. E. Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride-based tools in machining Al-SiCp metal matrix composite // *Wear*. 2017. V. 376. P. 152–164.

2. Guo L., Zhang X., Chen S., Hui J. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools // *Materials*. 2019. V. 12. № 1. P. 125.

3. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Romashov D.V., Fedorenko D.O. Principles of 3D modelling of the production and application of diamond composite materials // *Nanotechnology Perceptions*. 2012. № 8(2), P. 132–138.

4. Витязь П.А., Сенють В.Т. Синтез и применение наноструктурных сверхтвердых материалов инструментального назначения // *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2015. № 3. С. 60–76.

5. Loginov P., Mishnaevsky L., Levashov E., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modelling // *Materials and Design*. 2015. № 88. P. 310–319.

6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2018. № 10. С. 150–158.

7. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.

8. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Ohmori H. Abrasives and abrasive tools. In Tribology of Abrasive Machining Processes. Elsevier. 2013 P. 243–311.

9. Kunimine T., Shibuya M., Sato H., Watanabe Y. Fabrication of copper diamond functionally graded materials for grinding wheels by centrifugal sintered - casting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. № 217. P. 294–301.

10. Clark W. I., Shih A. J., Hardin C. W., Lemaster R. L., McSpadden, S. B. Fixed abrasive diamond wire machining. Part I: Process monitoring and wire tension force // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. № 43 (5). P. 523–532.

11. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. Износостойкость шлифовальных кругов из алмазосодержащих материалов инструментального назначения // *Физическая мезомеханика.* 2004. Т. 7. № S1-1. С. 430–432.

12. Bolotov A, Novikova O, Novikov V. Synthesis and friction properties of a multifunctional diamond-containing ceramic material // *Materials Today: Proceedings.* 2019. V. 19. P. 2449–2453.

13. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования.* 2019. № 12. С. 80–87.

14. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds.* 2005. № 389 (1–2). P. 169–176.

15. Qin D., Xu G., Yang Y., Che, S. Multiphase Ceramic Coatings with High Hardness and Wear Resistance on 5052 Aluminum Alloy by a Microarc Oxidation Method // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* 2018. № 6 (2). P. 2431–2437.

16. Xue W., Wu X., Li X., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. № 425(1–2). P. 302–306.

17. Полубелова А.С., Крылов В.Н., Карлин, Ефимова И.С. Производство абразивных материалов. М: Машиностроение, 1968. 180 с.

18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал – керамика // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2017. № 10. С. 153–157.

19. ГОСТ 14706-78 Алмазы и инструменты алмазные. Термины и определения (с изменением № 1). М.: Издательство стандартов, 1985. 11 с.

20. Markov M.A., Bykova A.D., Krasikov A.V., Farmakovskii B.V., Gerashchenkov D. A. Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. № 59(2). P. 207–214.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Синтез композиционного керамического материала и исследование его абразивных свойств // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 1 (5). С. 22–31.

SYNTHESIS OF THE COMPOSITE CERAMIC MATERIAL AND INVESTIGATION OF ITS ABRASIVE PROPERTIES

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc.,
V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

The innovative diamond-containing composite material formed by micro-arc oxidation on the surface of a sintered billet from a diamond-aluminum mixture has been developed. The method of the modification of the basic technology of a material obtaining has been proposed in order to reduce energy consumption and improve its frictional properties. The total time of material formation is reduced by replacing a part of the aluminum powder with white fused abrasive alumina powder, subsequent sintering and formation of diamond-ceramic material by micro-arc oxidation. It was found that the addition of corundum powder has a positive effect on the progress of the microarc oxidation process. A basic structural model of the new material has been developed. Friction tests have shown the advantage of diamond-containing materials of modified composition in comparison with the basic one. It is proposed to use the new material as a tool one for precision abrasive micro-processing of solid materials.

Keywords: abrasive ceramic material, micro-arc oxidation, aluminum oxide modifications, friction, wear.

REFERENCES

1. Bushlya V., Lenrick F., Gutnichenko O., Petrusha I., Osipov O., Kristiansson S., Stahl J. E. Performance and wear mechanisms of novel superhard diamond and boron nitride-based tools in machining Al-SiCp metal matrix composite. *Wear*. 2017. V. 376, pp. 152–164.

2. Guo L., Zhang X., Chen S., Hui J. An experimental study on the precision abrasive machining process of hard and brittle materials with ultraviolet-resin bond diamond abrasive tools. *Materials*. 2019. V. 12. No 1, p. 125.

3. Mamalis A.G., Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Romashov D.V., Fedorenko D.O. Principles of 3D modelling of the production and application of diamond composite materials. *Nanotechnology Perceptions*. 2012. No. 8 (2), pp. 132–138.

4. Vityaz P.A., Senyut V.T. Synthesis and use of nanostructural supersolid materials of tool appointment. *Vesci Nacyyanalnaj akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnyh navuk*. 2015. No. 3, pp. 60–76. (In Russian).

5. Loginov P., Mishnaevsky L., Levashov E., Petrzhik M. Diamond and cBN hybrid and nanomodified cutting tools with enhanced performance: Development, testing and modelling *Materials and Design*. 2015. No. 88, pp. 310–319.

6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Hard lubricant ceramic coatings with nano- and microdispersed filler. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2018. V. 10, pp. 150–158. (In Russian).

7. Sudnik L.V., Vityaz P.A., Ilushchenko A.F. Almazosoderzhashchie abrazivnye nanokompozity [Diamond-containing abrasive nanocomposites]. Minsk: Belarusky navuka, 2012. 319 p.

8. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Ohmori H. Abrasives and abrasive tools. In Tribology of Abrasive Machining Processes. Elsevier. 2013, pp. 243–311.

9. Kunimine T., Shibuya M., Sato H., Watanabe Y. Fabrication of copper diamond functionally graded materials for grinding wheels by centrifugal sintered – casting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. No. 217, pp. 294–301.

10. Clark W. I., Shih A. J., Hardin C. W., Lemaster R. L., McSpadden, S. B. Fixed abrasive diamond wire machining - Part I: Process monitoring and wire tension force. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003. No. 43 (5), pp. 523–532.

11. Vinokurov G.G., Struchkov N.F. Wear resistance of grinding wheels from diamond-containing materials for instrumental purposes. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2004. V. 7. No. S1-1, pp. 430-432. (In Russian).

12. Bolotov A, Novikova O, Novikov V. Synthesis and friction properties of a multifunctional diamond-containing ceramic material. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 19, pp. 2449–2453.

13. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Formation of matrix of almazcontaining composite ceramic instrumental material. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2019. № 12, pp. 80–87. (In Russian).

14. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear- and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds.* 2005. No. 389(1–2), pp. 169–176.

15. Qin D., Xu G., Yang Y., Che S. Multiphase Ceramic Coatings with High Hardness and Wear Resistance on 5052 Aluminum Alloy by a Microarc Oxidation Method. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* 2018. No. 6 (2), pp. 2431–2437.

16. Xue W., Wu X., Li X., Tian H. Anti-corrosion film on 2024/SiC aluminum matrix composite fabricated by microarc oxidation in silicate electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006. No. 425(1–2), pp. 302–306.

17. Polubelova A.S., Krylov V.N., Karlin, Efimova I.S. Proizvodstvo abrazivnyh materialov [Production of abrasive materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1968. 180 p.

18. Bolotov A. N., Novikov V. V., Novikova O. O. The dependence of the wear of the friction couple composite diamond-bearing material – ceramic. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel i detalej tekhnologicheskogo i ehnergeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No. 10, pp. 153–157. (In Russian).

19. GOST 14706-78 Almazy i instrumenty almaznye. Terminy i opredeleniya (s Izmeneniem N 1): [State Standard 14706-78. Diamonds and diamond tools. Terms and definitions (with Change N 1)]. Moscow: Standartinform, 1985. 11 p.

20. Markov M. A., Bykova A.D., Krasikov A.V., Farmakovskii B.V., Gerashchenkov D.A. Formation of Wear- and Corrosion-Resistant Coatings by the Microarc Oxidation of Aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. No. 59 (2), pp. 207–214.

Поступила в редакцию/received: 28.05.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020; принята/accepted 29.07.2020

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331.002.5

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН ДЛЯ ФРЕЗЕРНОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gorloviv@yandex.ru

Предложена методика определения параметров надежности торфяных машин (ТМ), не имеющих достаточных статистических данных эксплуатации. Рассматриваемый подход позволит устанавливать изменение технического состояния широкой гаммы торфяных машин для фрезерного способа добычи, что даст возможность торфяным предприятиям осуществлять эксплуатацию с учетом индивидуального состояния ТМ и планов производства торфа, а также позволит проводить основные ремонты технологического оборудования в осенне-зимний период без снижения производительности работ в сезон добычи. Для торфяных машин, у которых не хватает статистических данных для анализа эксплуатации, можно использовать обобщенные данные по аналогичным торфяным машинам для получения ориентировочных зависимостей, позволяющих с некоторой точностью осуществлять прогнозирование изменения технического состояния исследуемого оборудования. При увеличении объемов статистических данных предлагается применять коэффициентный метод с использованием данных эксплуатации, что позволит повысить качество прогнозирования и, как следствие, снизить количество простоев из-за отказов и увеличить сезонную производительность торфяных машин.

Ключевые слова: торфяные машины, эксплуатация, надежность, ресурс, прогнозирование, производительность, исследования.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-32-40

ВВЕДЕНИЕ

Основными особенностями эксплуатации торфяных машин (ТМ) являются их сезонность и влияние метеорологических факторов, которые обусловливают недопустимость сложных отказов и, как следствие, простоев в периоды с благоприятными погодными условиями. Для снижения потерь из-за отказов и простоев на техническое обслуживание (ТО) в метеоблагоприятные дни необходимо в процессе реализации планов добычи использовать алгоритмы, позволяющие оперативно получать рекомендации по изменению планов-графиков ремонта и обслуживания ТМ.

Разработка таких алгоритмов без использования статистических данных по параметрам надежности [1] конкретной торфяной машины затруднительна. Отчасти эту проблему можно решить, применяя статистические данные по аналогичным машинам, но при этом необходимо учитывать особенности исследуемого оборудования.

Детали ТМ (и в первую очередь рабочие органы ТМ) эксплуатируются в тяжелых условиях, испытывают статические, динамические нагрузки, на них воздействует агрессивная окружающая среда. Все это учитывается при проектировании, но в процессе эксплуатации возникают определенные условия, при которых некоторые ТМ ремонтируются неоднократно, а другие имеют большую наработку на отказ.

Данные многолетних наблюдений за эксплуатацией ТМ позволили выявить, что с ростом наработки число отказов и затраты на ремонты машин значительно возрастают и, как следствие, снижается сезонная производительность [2, 3]. Используя эти данные, для известных машин можно с некоторой точностью прогнозировать параметры эксплуатации для ТМ, не имеющих таких данных, с учетом их особенностей. Для этого существует ряд методик, например анализ надежности по среднегрупповым значениям интенсивности потока отказов, с использованием данных эксплуатации, коэффициентный метод и др.

Применяя данные прогнозирования, можно определять среднестатистические затраты на ТО и ремонты, что позволит при разработке планов-графиков работ на сезон учесть вероятные потери даже для машин, не имеющих статистических данных по надежности. При этом сроки постановки на ремонт конкретной машины обусловливаются экономическими соображениями [4, 5]. Главная цель эксплуатирующих организаций заключается в том, чтобы максимально увеличить сезонную производительность ТМ с учетом изменения их технического состояния и метеонеблагоприятных условий.

Цель представленного исследования – разработка методики определения параметров надежности ТМ, не имеющих достаточных статистических данных эксплуатации, позволяющей на основе полученных характеристик осуществлять прогнозирование изменения технического состояния техники; это позволит наилучшим образом использовать метеоблагоприятные для добычи торфа дни и обеспечит наибольшую сезонную производительность машин.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТОРФЯНЫХ МАШИН

Для проведения статистических исследований надежности машин существует множество методик [6, 7]. В представленном исследовании изучался поток отказов различных ТМ. Статистические параметры надежности были получены для ТМ, используемых для фрезерного способа добычи: уборочных машин бункерного типа МТФ-43А и МТФ-43АК; фрезеров Ф-6,5; ворошилок ВС-9,6; валкователей ВТ-9,8. Данные исследования были проведены на базе ОАО «Васильевский мох». Представленные машины использовались на ряде производственных участков, расположенных на верховых типах залежи со средней степенью разложения торфа около 25 % и при объемной пнистости от 1 до 2 %. Залежи – второго года эксплуатации с эксплуатационной влажностью 80 %, фрезерование проводилось на глубину 0,011 м, уборка торфа производилась при условной влажности около 40 %.

В исследованиях участвовали три группы технологических машин. В первую группу входили четыре бункерных уборочных машины МТФ-43А, два фрезера Ф-6,5 и по одной ворошилке ВС-9,6 с валкователем ВТ-9.8. Во вторую и третью группы входили по четыре бункерных уборочных машин МТФ-43АК, а также по два фрезера Ф-6,5 и по одной ворошилке ВС-9,6 с валкователем ВТ-9,8.

В процессе исследования для каждого из представленных типов машин регистрировалось количество отказов и рассчитывались статистические характеристики: среднее время безотказной работы, среднее время восстановления с учетом ожидания ремонта, среднеквадратическое отклонение наработки на отказ.

Для анализа результатов статистического исследования определялся коэффициент готовности рассматриваемых машин:

$$K_г = \frac{t_{ср}}{t_{ср} + t_в},$$

где $t_{ср}$ – средняя наработка на отказ; $t_в$ – среднее время восстановления машины с учетом ожидания ремонта, ч (табл. 1).

Таблица 1. Статистические характеристики эксплуатации машин

Тип машин	$t_{ср}$, ч	σ	$t_в$, ч	$\sigma_в$, ч	$K_г$
МТФ-43А	12,5	11,2	6,1	5,9	0,67
МТФ-43АК	19,5	18,9	4,6	4,7	0,81
Ф-6,5	17,2	12,6	6,0	4,9	0,74
ВС-9,6	81,3	79,5	3,1	3,3	0,93

Примечание: σ – среднеквадратическое отклонение; $\sigma_в$ – среднеквадратическое отклонение от среднего времени восстановления.

В процессе проведенных исследований был осуществлен анализ узлов, выходящих из строя у рассмотренных машин как элементов, отвечающих за надежность, и построены гистограммы зависимости потока их отказов от *i*-количества элементов, влияющих на безотказность и наработки машины (рис. 1). Кроме того, все отказы условно были распределены по группам в зависимости от времени устранения (первая группа сложности – до 2 ч, вторая – до 8 ч, третья – более 8 ч) и для каждой из этих групп определен поток отказов.

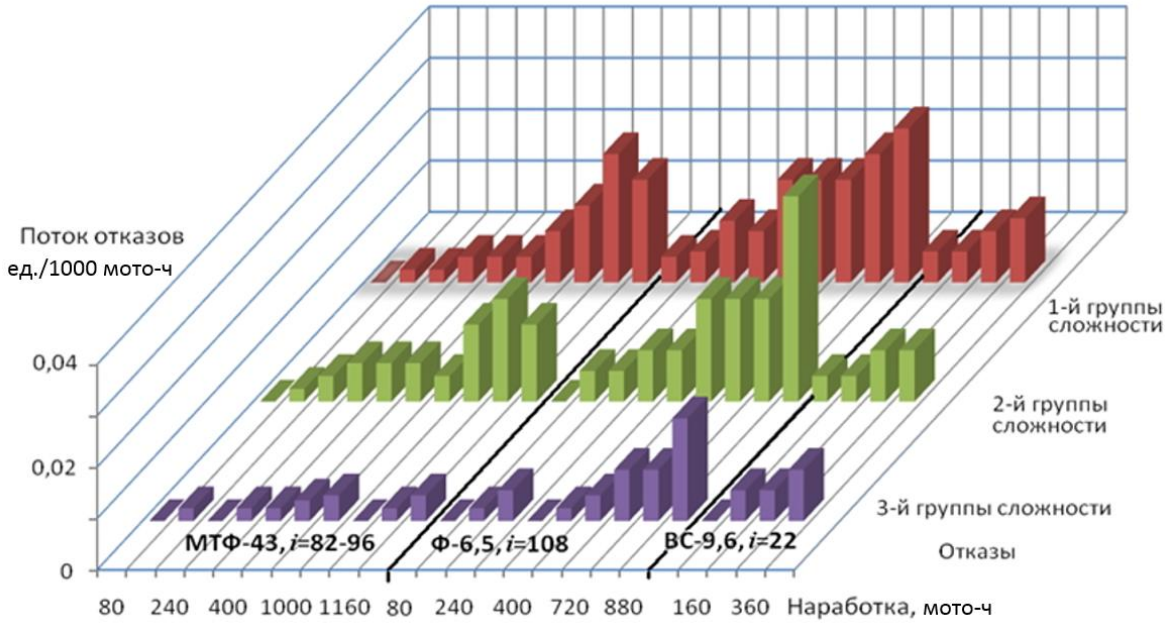


Рис. 1. Зависимость потока отказов торфяных машин от наработки и количества элементов, влияющих на безотказность

Из представленных гистограмм видно, что количество отказов зависит в данном случае не только от наработки машины, но и от общего количества элементов, влияющих на безотказность. Количество выявленных отказов коррелирует с количеством элементов, отвечающих в конкретной машине за надежность.

На основе проведенного исследования было установлено, что при наработке машины менее 50 % от полного ресурса коэффициент готовности ТМ существенно не изменяется и несущественно снижается с ростом количества элементов.

При наработке ТМ более 50 % от полного ресурса коэффициент готовности уменьшается с ростом наработки, причем, более интенсивно с увеличением числа элементов. Из этого следует, что для машин, обладающих 100 и более элементов, а также выработавших более 50 % своего ресурса, коэффициент готовности требуется определять индивидуально и учитывать при планировании добычи фрезерного торфа.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ

Анализ результатов приведенного исследования надежности представленных ТМ показал, что конкретные элементы ТМ имеют различную величину потока отказов (рис. 2). Данное обстоятельство должно учитываться при разработке модели надежности ТМ, что позволит повысить качество прогнозирования.

Использование информационных технологий при эксплуатации торфяных машин позволит оперативно (с учетом конкретного характера изменения технического состояния для каждой ТМ) устанавливать целесообразность дальнейшего их применения при любой с начала эксплуатации наработке, а также стимулировать у обслуживающего персонала ответственное отношение к сохранению ресурса оборудования.

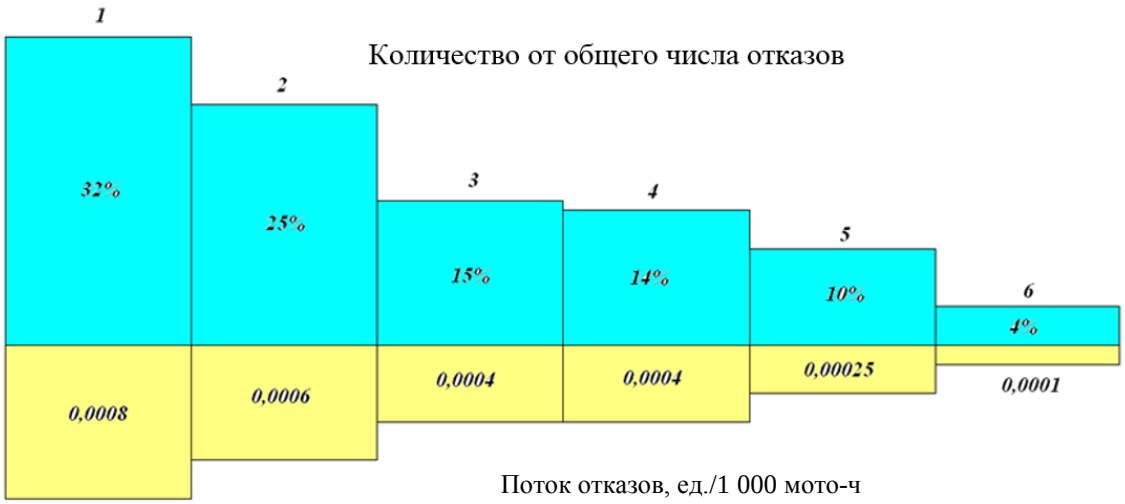


Рис. 2. Распределение отказов по группам элементов:
1 – фрикционных трибоэлементов; 2 – рабочих элементов и элементов трансмиссии из-за перегрузки; 3 – элементов несущей системы;
4 – антифрикционных трибоэлементов скольжения;
5 – антифрикционных трибоэлементов качения; 6 – других элементов

Система управления работоспособностью ТМ может реализовываться с помощью алгоритма [8], в котором предусматривается создание базы данных, изменяющихся в процессе эксплуатации, для каждой технологической машины по соответствующей подсистеме.

Полученные данные должны храниться в базе весь период эксплуатации ТМ, что позволит проводить анализ изменения контролируемых параметров в зависимости от текущей наработки и, как следствие, давать более точный прогноз работоспособности ТМ в запланированный период добычи.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ МАШИН, НЕ ИМЕЮЩИХ ДОСТАТОЧНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для обеспечения нужного уровня надежности ТМ, не имеющих достаточных статистических данных, необходимо найти показатели надежности на основе известных методик, позволяющих использовать данные по аналогичным машинам.

Наиболее доступным является метод расчета показателей надежности по среднегрупповым значениям интенсивности потока отказов. В качестве исходных данных для сложных систем (ТМ как систем, с точки зрения надежности состоящих из элементов), состоящих из r групп, используются известные интенсивности отказов λ_i для количества N_i элементов i-й группы. Значение λ_i выбирается из специальных таблиц справочников. В этом случае суммарный поток отказов можно рассчитать по формуле

$$\lambda = \sum_{i=1}^{r} N_i \lambda_i,$$

наработку на отказ $T_н$ – по формуле

$$T_H = 1/\lambda.$$

Однако полученные таким образом данные дают достаточно грубые результаты, что может приводить к ошибкам при прогнозировании. Таким образом, этот метод можно применять при отсутствии данных, полученных по результатам эксплуатации аналогичных машин.

В большинстве случаев для ТМ, используемых при фрезерном способе добычи, статистические данные эксплуатации для аналогичных машин известны. Тогда нужно использовать методику расчета параметров надежности с учетом данных эксплуатации. Расчет параметров с помощью этой методики бывает двух разновидностей: по среднему уровню надежности аналогичных машин и коэффициентный метод.

При расчете по среднему уровню надежности однотипных систем принимается, что $\lambda_{ai} = \lambda_{ui}$, где λ_{ai} – средняя интенсивность отказов элементов i-й группы машины аналога, λ_{ui} – средняя интенсивность отказов элементов i-й группы исследуемой машины. Тогда при известном среднем количестве элементов аналога N_a и исследуемой машины N_u наработка на отказ исследуемой машины $T_{ни}$ может определяться по формуле

$$T_{ни} = \frac{N_a}{N_u} T_{на},$$

поток отказов – по формуле

$$\lambda_u = \frac{1}{T_{ни}}.$$

Если использовать коэффициентный метод расчета по среднему уровню надежности однотипных систем, то по результатам эксплуатации находится

коэффициент пересчета, который зависит от параметров реальной эксплуатации (например, объемной пнистости залежи). Коэффициент пересчета можно определить с помощью выражения

$$a = \frac{T_{на}^{/}}{T_{на}},$$

где $T_{на}$ – расчетная наработка на отказ машины-аналога (определяется по табличным данным); $T_{на}^{/}$ – опытная наработка на отказ машины-аналога.

$T_{на}$ устанавливается на основе табличных данных по интенсивности отказов λ_i машины-аналога:

$$T_{на} = (\sum_{i=1}^{r} N_{ia}\lambda_i)^{-1}.$$

Наработка на отказ исследуемой машины будет $T_{ни} = aT_{на}$. Можно также использовать коэффициентный метод с расчетами на основе интенсивности отказов базового элемента $\lambda_б$. Исходными для расчета будут N_i – число элементов i-й группы исследуемой машины; λ_i – интенсивность отказов элементов i-й группы исследуемой машины. В этом случае поток отказов можно рассчитать как

$$\lambda = \lambda_б \sum_{i=1}^{r} N_i k_i,$$

где k_i – коэффициент пересчета, который определяется как

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_б}.$$

Коэффициентный метод расчета параметров надежности является наиболее простым, но в тоже время обладает достаточно высокой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор конкретного метода расчета параметров надежности зависит от большого количества факторов (наличия статистических данных по эксплуатации конкретной торфяной машины или ее аналога, возможности получения табличных данных по параметрам эксплуатации, конкретных условий эксплуатации и др.). Поэтому сначала для прогнозирования могут использоваться методы, дающие достаточно грубые результаты, но впоследствии (с увеличением объема статистических данных) могут применяться более точные методики, которые позволят осуществлять достаточное по точности прогнозирование изменения технического состояния ТМ, что позволит снизить потери из-за отказов машин в период добычи торфа.

Просчитав с помощью представленных методик возможные варианты изменения параметров надежности ТМ, можно с высокой долей вероятности принять правильное решение о воздействии на машину с целью поддержания ее работоспособности.

Использование предлагаемых методик анализа параметров надежности ТМ позволит снизить погрешности расчета, повысить точность планирования и качество ТО и ремонтов в зависимости от условий эксплуатации техники.

При разработке планов добычи на сезон необходимо определять объемы уборочных площадей месторождений, а также требуемое количество машин для реализации этих планов. Количество необходимых машин устанавливается в соответствии с их производительностью и с учетом коэффициента технической готовности для соответствующих типов оборудования. При этом нужно обращать внимание на состояние конкретной торфяной машины, что позволит избежать провала планов добычи из-за отказов. С помощью расчетов параметров надежности ТМ можно определить прогнозируемый коэффициент готовности индивидуально (с учетом особенности каждой машины).

Установление с помощью различных исследований индивидуальных параметров надежности торфяных машин позволит с достаточной точностью определять периодичность операций по восстановлению их работоспособности с учетом изменения технического состояния, а также внешних факторов воздействия и дает возможность максимально использовать благоприятные для добычи торфа дни и выбирать оптимальные решения с целью воздействия на состояние машины для достижения наибольшей сезонной производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труханов В.М. Надежность изделий машиностроения. Теория и практика: учебник для вузов. М.: Спектр, 2013. 334 с.

2. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Бондарев Ю.Ю. Состояние технического перевооружения машинно-тракторного парка торфодобывающих компаний // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 229–235.

3. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 82–91.

4. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of Lean Manufacturing and Six Sigma operation with Decision Making Based on the Analytic Hierarchy Process // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. № 12. P. 59–64.

5. Горлов И.В., Болотов А.Н. Информационная составляющая системы управления работоспособностью торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013. № 1. С. 216–221.

6. Исаенко В.Д., Исаенко А.В., Исаенко П.В. Основы теории надежности и диагностика автомобилей: учебное пособие. Томск: ТГАСУ, 2007. 240 с.

7. Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М. Исследование потока отказов элементов конструкций лесных машин // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 7 (1). С. 94–98.

8. Болотов А.Н., Горлов И.В., Полетаева Е.В., Рахутин М.Г. Информационная система анализа эксплуатации технологических машин // *Программные продукты и системы*. 2016. № 1. С. 83–89.

Для цитирования: Горлов И.В. Анализ надежности торфяных машин для фрезерного способа добычи // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 32–39.

THE RELIABILITY ANALYSIS OF PEAT MACHINES FOR MILLING METHOD OF PRODUCTION

I.V. GORLOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: gorloviv@yandex.ru

The methodology for determining of the reliability parameters of peat machines that do not have sufficient statistical data on operation has been proposed. The proposed approach will permit to determine the change of the technical status of a wide range of peat machines for the milling method of extraction. It will enable peat enterprises to operate taking into account their individual condition and plans for the peat production, and will permit to carry out the major repairs of technological equipment in the autumn-winter period without decreasing the works productivity in the mining season. For peat machines that do not have enough statistical data to analyze their operation, one can use the generalized data on similar peat machines to obtain approximate dependencies which permit to predict changes in the technical state of the equipment under study with some accuracy. With an increase of statistical data amount, it is proposed to use the coefficient method using operational data. It permits to improve the quality of forecasting and as a result to reduce the number of downtime due to failures and to increase the seasonal productivity of peat machines.

Keywords: peat machines, operation, reliability, resource, forecasting, productivity, research.

REFERENCES

1. Trukhanov V.M. Nadezhnost izdeliy mashinostroyeniya. Teoriya i praktika: uchebnik dlya vuzov [Reliability of engineering products. Theory and practice: a textbook for universities]. Moscow: Spektr, 2013. 334 p.

2. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Bondarev Yu.Yu. The state of technical re-equipment of the machine and tractor fleet of peat mining companies. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2014. No. 3 (202), pp. 229–235. (In Russian).

3. Mikhaylov A.V., Ivanov S.L., Gabov V.V. Formation and efficient use of the machine park of peat mining companies. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo.* 2015. No. 14, pp. 82–91. (In Russian).

4. Alhuraish I., Robledo C., Kobi A. Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process. *IFAC-PapersOnLine*. 2016. V. 49. No. 12, pp. 59–64.

5. Gorlov I.V., Bolotov A.N. The information component of the peat machine performance management system. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2013. No. 1, pp. 216–221. (In Russian).

6. Isayenko V.D., Isayenko A.V., Isayenko P.V. Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostika avtomobiley: uchebnoye posobiye [Fundamentals of the theory of reliability and car diagnostics: a textbook for universities]. Tomsk: TGASU, 2007. 240 p.

7. Shilovsky V.N., Pitukhin A.V., Kostyukevich V.M. Investigation of the failure flow of structural elements of forest machines. *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii*. 2016. No. 7 (1). pp. 94–98. (In Russian).

8. Bolotov A.N., Gorlov I.V., Poletaeva E.V., Rakhutin M.G. Information system for the analysis of the operation of technological machines. *Programmnye produkty i sistemy*. 2016. No. 1. pp. 83–89. (In Russian).

УДК 622.331.002.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВСАСЫВАЮЩЕГО СОПЛА ТОРФЯНОЙ ПНЕВМОУБОРОЧНОЙ МАШИНЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

Добыча фрезерного торфа пневмоуборочным комплексом машин, в отличие от механического метода, обладает рядом достоинств: исключается подфрезеровывание влажной торфяной залежи при уборке, сокращается номенклатура требуемой техники и укорачивается с двух до одного дня длительность цикла. Последнее особенно важно, поскольку двухдневных периодов с хорошей солнечной погодой в сезоне добычи гораздо меньше, чем однодневных. Поэтому в целом надежность метода с пневматической уборкой торфа выше. Для оценки эффективности работы современной пневмоуборочной машины КТТ-2 был проведен полевой эксперимент по оценке скорости всасывания сопла машины. Результаты исследования дали возможность построить поле скоростей всасывающего факела и определить максимальную скорость на всасывании – 26,74 м/с. Минимальная скорость воздушного потока в исследуемой зоне составляет 0,3 м/с и наблюдается при удалении от сопла на расстоянии 0,5 м. Анализ поля скоростей всасывающего факела позволил выявить зависимость скорости воздушного потока от расстояния удаления от сопла. Выявлен размер активной зоны всасывающего факела и предложены пути оптимизации ее размеров.

Ключевые слова: торф, погодные условия, пневмоуборочная машина, всасывающий факел, сопло, активная зона, фракционный состав, анемометр.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-40-50

ВВЕДЕНИЕ

Отечественная продукция, изготовленная на основе фрезерного торфа, пользуется устойчивым спросом как на российском рынке, так и за рубежом [1, 2]. При этом добыча торфа осуществляется как механическим, так и пневматическим методом, известным еще с 1930-х годов. Самоходные и прицепные пневмоуборочные машины производились ранее из черного металла и имели большие массу и габаритные размеры [3].

Явное преимущество пневматического метода уборки заключалось в том, что продолжительность цикла производства торфа составляла один день вместо двух. Поскольку однодневных промежутков с хорошими погодными условиями в течение сезона больше, чем двухдневных, надежность этого метода была выше [4]. Однако из-за трения торфяной крошки о внутренние стенки желобов возникало статическое электричество, вследствие которого имели место случаи самовозгорания и даже взрывы подобных машин. А появление гироскопического момента от вращения рабочего колеса вентилятора при поворотах машины вело к потере устойчивости. Поэтому в 70-80-х годах прошлого века эти машины постепенно перестали использовать. Только на рубеже 1990-2000-х годов благодаря новым проектам, в частности канадской компании Premier Tech, разработавшей прицепную и самоходную машины SA-200 и SAM-404 с элементами металлоконструкции из нержавеющей стали и алюминиевого

сплава, этот метод обрел вторую жизнь, так как обеспечил минимизацию потерь торфа, отсутствие подфрезеровывания влажной залежи при уборке, ограниченной номенклатуре необходимого оборудования [5].

В России сегодня нет собственного производства пневмоуборочных машин, поэтому торфодобывающие компании закупили и используют белорусские машины МПТУ-30 производства РУП «Могилевэнерго» и КТТ-2 производства эстонской фирмы Kruviks OU (рис. 1). Эти машины являются однотипными и различаются лишь в деталях.

Рис. 1. Внешний вид прицепной пневмоуборочной машины КТТ-2

Мнение ряда руководителей торфодобывающих компаний о том, что указанные выше машины могут собирать не все виды торфа (в частности, трудности возникают при уборке переходных и низинных торфов высокой степени разложения), породило необходимость в проведении экспериментального исследования, цель которого – оценка всасывающей способности одного из данных аппаратов. Для изучения был выбран аппарат, работающий на предприятии ООО «Пиндструп» в Псковской области. Результаты этого исследования и выводы представлены в данной статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Всасывание фрезерной крошки в основном производится соплами без принудительной активизации расстила и обеспечивается разностью вакуумметрического давления, создаваемого вентилятором в пневмосистеме машины и атмосферного давления окружающей среды [6, 7]. Благодаря этому воздух засасывается в сопло и увлекает за собой частицы торфа, расположенные в зоне действия всасывающего факела. На частицы торфа при этом действуют сила веса, подъемная сила, сила трения и сила давления воздушного потока [8], от соотношения величин которых и зависит возможность и интенсивность всасывания. Сила давления воздушного потока должна обеспечивать создание подъемной силы и преодоление силы веса и касательной силы трения. В противном случае всасывание происходить не будет.

Скорость воздушного потока по мере удаления от сопла постепенно уменьшается, разделяя всю область всасывающего факела на две зоны – активного и пассивного действия. Исследованиями Л.О. Горцакаляна и др. [6, 7, 9 и др.] определена необходимая скорость воздушного потока на входе в сопло (25…35 м/с). М.П. Калинушкиным по результатам исследований М.Ф. Бромлея была получена упрощенная формула по оценке скорости воздушного потока в точке, отстоящей от всасывающего сопла на величину *x* по оси всасывающего факела:

$$V_x = \frac{V_o}{1 + \frac{10x^2}{S}},$$

где V_o – скорость воздушного потока в живом сечении сопла; *x* – расстояние от точки до всасывающего сопла по оси факела; *S* – площадь живого сечения всасывающего факела.

В активной зоне скорость воздушного потока достаточна для преодоления сил трения, веса и создания подъемной силы частицы торфа. В пассивной зоне, ввиду гораздо меньшей скорости воздушного потока, не обеспечивается создание подъемной силы. И хотя материал транспортируется во взвешенном состоянии или волоком, всасывания не происходит. Начало пассивной зоны обеспечено, как правило, скоростью воздушного потока около 12…15 м/с [9].

После всасывающих сопел частицы торфа в пневмоуборочных машинах проходят участки вертикального и горизонтального транспортирования, а также разделения торфовоздушной смеси на торф и воздух. Для участков транспортирования крайне важным параметром является скорость витания – скорость восходящего потока, при которой частица находится в состоянии невесомости, т. е. витает. Скорости витания торфяных частиц, в зависимости от их размеров, плотности и влаги, определяются экспериментально, например, на установке, описанной в работах [10, 11]. При проектировании вертикального участка скорость транспортирования частиц принимается на 20…50 % больше скорости витания наиболее крупных частиц, а горизонтального участка – в два раза больше расчетной скорости витания.

При проектировании участка разделения торфовоздушной смеси скорость потока на входе в циклон принимается 15…22 м/с. На машинах КТТ-2 и МПТУ-30 участок разделения торфяной крошки и воздуха представляет собой не циклон, а простейший отделитель, функционирующий за счет касательного ввода пневмопроводов в корпус и многократного увеличения живого сечения потока, благодаря чему частицы с резко снизившимися скоростями движения оседают на дно бункера.

Учитывая, что проблемы при уборке переходного и низинного торфов (имеющих большую плотность, чем верховой) возникают на стадии всасывания, было принято решение исследовать и проанализировать скоростное поле всасывающего факела пневмоуборочной машины КТТ-2.

Для измерения скорости воздуха применялся портативный термо-анемометр GM8903, имеющий возможность совмещения с персональным компьютером и диапазон измеряемой скорости от 0,3 до 30 м/с при точности измерения ±3 %. Для проведения исследований и снятия показаний скорости потока перед всасывающим соплом, была использована металлическая координатная сетка с шагом ячейки 100 мм, в узлах которой устанавливался выносной щуп прибора (рис. 2). Все показания снимались с пятикратной повторяемостью.

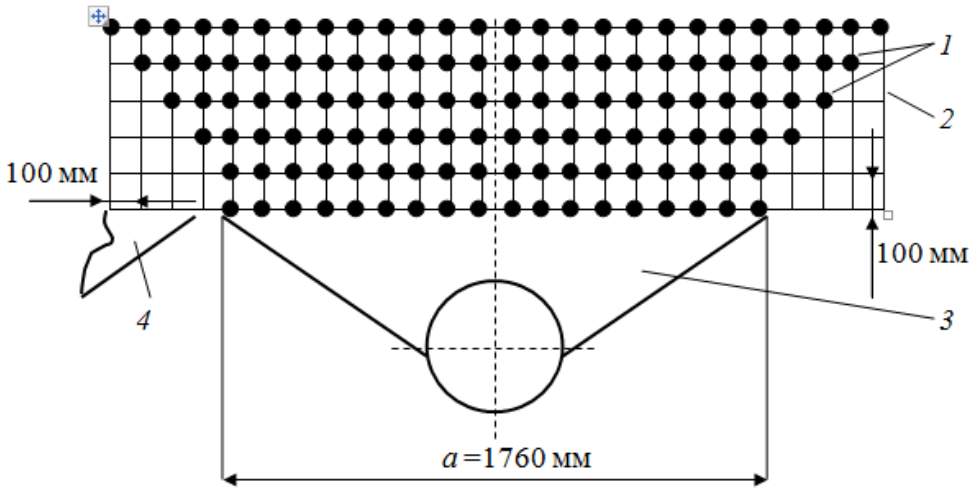


Рис. 2. Схема измерения скорости воздушного потока термоанемометром:
1 – точки (узлы) снятия показаний; 2 – координатная сетка;
3 – всасывающее сопло; 4 – соседнее всасывающее сопло

Для оценки влияния на скорость воздушного потока воздействия соседнего сопла это сопло отгораживалось воздухонепроницаемой перегородкой (рис. 3) и в журнал проведения эксперимента заносились показания с влиянием и без влияния на скорость воздушного потока соседнего сопла.

Рис. 3. Снятие показаний скорости воздушного потока перед соплом

На момент проведения исследования атмосферное давление, определенное по барометру, составляло 751 мм рт. ст., а температура окружающего воздуха – +24 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отображение данных измерений и вычислений поля всасывания в виде изотах, как это традиционно делалось при исследовании пневматических машин, на наш взгляд, менее информативно, чем представление результатов исследования в двухкоординатной плоскости с фиксацией значений скоростей воздушного потока.

Результаты измерений и вычислений (среднего значения по пяти замерам) представлены нами в виде графика зависимости скорости воздушного потока при всасывании от координаты расположения точки по длине сопла и по удалению от него по оси факела (рис. 4).

Ввиду ограниченности объемов статьи поле всасывания по правому соплу пневмоуборочной машины не приведено, но никаких новых обстоятельств и закономерностей при анализе полученных данных не было выявлено, графики практически полностью зеркальные.

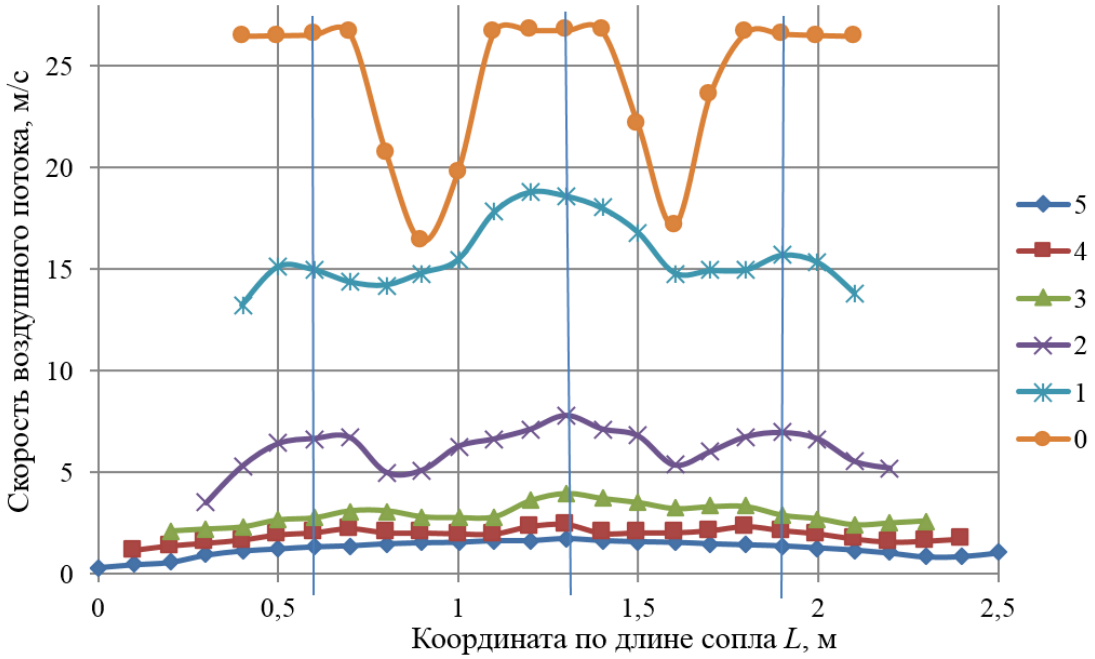


Рис. 4. Зависимость скорости воздушного потока при всасывании левым соплом машины КТТ-2 от координаты по длине сопла и расстояния удаления точки от сопла по линии оси факела: 0 – скорость измерена на входе в сопло; 1 – удаление от сопла 0,1 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,3 м; 4 – 0,4 м; 5 – 0,5 м

Анализ графических зависимостей, отображенных на рис. 4, показал, что во всех кривых присутствуют две зоны «провала» скорости потока, объясняемые наличием воздухонепроницаемых усилительных ребер, связывающих нижнюю и верхнюю кромки стеклопластикового сопла (рис. 5).

Удаление от сопла способствует сглаживанию всех кривых и значительному снижению скорости воздушного потока. Уменьшение скорости воздушного потока по мере приближения к вертикальным ограничивающим стенкам сопла отмечено также во всех случаях и объясняется трением потока о стенки. Численные значения скоростей потока с правой стороны сопла несколько выше, чем с левой, что объясняется влиянием воздушного потока от правого сопла. Установленная воздухонепроницаемая перегородка между соплами и замеры скоростей показали, что в этом случае скорости справа и слева от оси сопла одинаковы.

Рис. 5. Усилительное воздухонепроницаемое ребро,
связывающее верхнюю и нижнюю кромки всасывающего сопла

Для трех осей всасывающего факела (L = 0,6; 1,3; 1,9 м) (см. рис. 4) построены зависимости скорости воздушного потока от расстояния удаления от всасывающего сопла (рис. 6). Координаты данных осей выбраны из соображений снижения влияния на скорость воздушного потока боковых вертикальных стенок сопла и максимальной скорости воздушного потока. Анализ и аппроксимация данных с высокой точностью ($R^2 \geq 0{,}977$) произведена показательными функциями, для каждой из которых получена математическая модель.

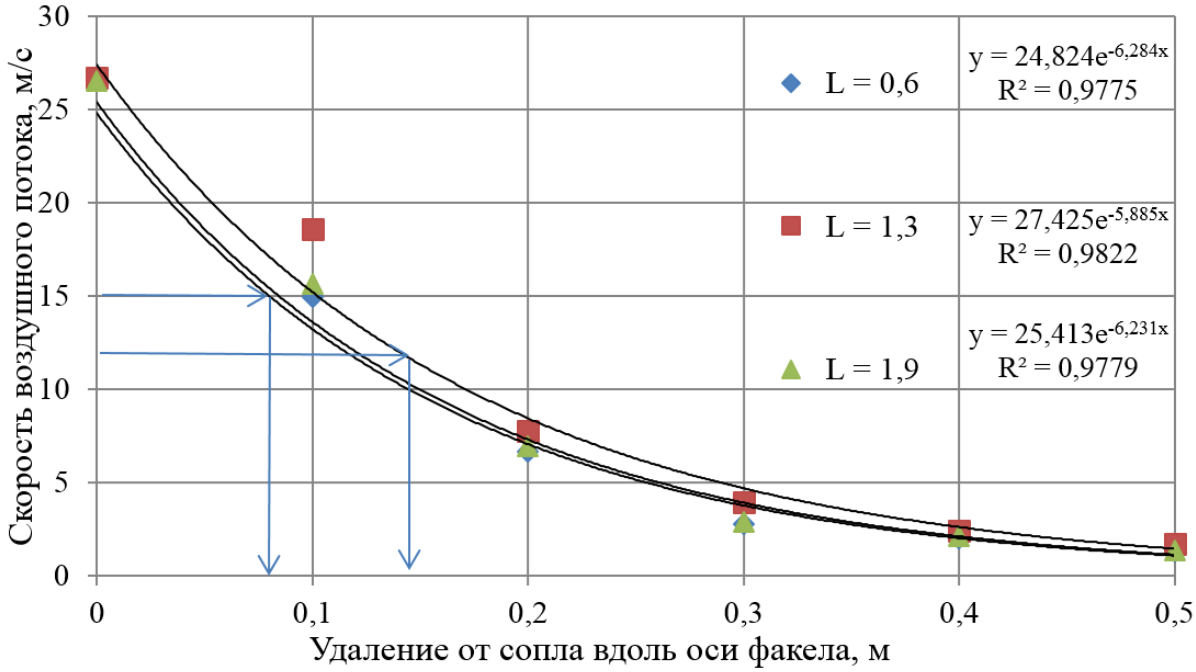


Рис. 6. Зависимость скорости воздушного потока
от расстояния удаления от сопла

Для центральной оси сопла (L = 1,3 м) произведено сравнение скоростей воздушного потока, полученных опытным путем и рассчитанное по выведенной

М.П. Калинушкиным формуле (представлена в начале статьи). Выявлено относительное расхождение между ними:

$$\Delta = \frac{|V_x - V_{on}|}{V_x} \cdot 100\ \%.$$

Результаты опытов и расчетов сведены в таблицу.

Учитывая, что начало пассивной зоны всасывания ограничено скоростью воздушного потока 12…15 м/с, по рис. 7 определена длина активной зоны всасывающего факела при удалении от сопла, которая составила в данном случае 0,078…0,142 м.

Экспериментальные и расчетные данные скорости воздушного потока перед всасывающим соплом пневмоуборочной машины КТТ-2

Удаление от сопла вдоль оси факела, м	Скорость $V_{оп}$ воздушного потока в точке с координатой по длине сопла L			Расчетное значение скорости V_x, м/с	Δ, %
	L = 0,6 м	L = 1,3 м	L = 1,9 м		
0	26,52	26,74	26,56	26,74	0
0,1	14,95	18,6	15,67	17,05	8,84
0,2	6,65	7,78	6,94	8,17	4,79
0,3	2,75	3,95	2,87	4,37	9,69
0,4	2,0	2,4	2,1	2,65	9,43
0,5	1,3	1,7	1,35	1,76	3,35

Полученная опытным путем максимальная скорость всасывания (V_1 = 26,74 м/с) и небольшая зона активного действия всасывающего факела подтверждают возникновение трудностей при уборке более плотных видов торфа. Выход из данной ситуации (для увеличения продуктивности работы предприятия [12]) может быть в увеличении максимальной скорости всасывания и оптимизации зоны активного действия всасывающего сопла. Так, например, при анализе конструкций советских пневмоуборочных машин было выявлено, что высота входной щели их сопел составляла от 0,05 м (БПФ-2) до 0,08 м (ППФ-3), в то время как высота входной щели сопла анализируемой машины h_1 = 0,1 м при площади живого сечения $S_1 = ah_1$ = = 1,76 · 0,1 = 0,176 м^2. Можно предположить, какая максимальная скорость всасывания будет у сопла такой же ширины, но с высотой входной щели, например, 0,08 м при площади сечения $S_2 = ah_2$ = 1,76·0,08 = 0,1408 м^2. Тогда из уравнения неразрывности потока

$$V_2 = \frac{V_1 S_1}{S_2}$$

получаем $V_2 = 33{,}425$ м/с. Данная скорость всасывания находится гораздо дальше от минимальной (25 м/с), чем обеспеченная конструкцией машины КТТ-2, что, несомненно, снизит трудности при уборке более плотных торфов [13].

Оптимизация активной зоны всасывающего факела возможна с помощью специального козырька, монтируемого на верхней части сопла, но для определения его формы и размеров требуются дополнительные лабораторные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследован всасывающий факел пневмоуборочной машины КТТ-2. Определено максимальное (26,74 м/с) и минимальное значение (0,3 м/с) скорости воздушного потока в исследуемой зоне.

2. Получены математические модели, описывающие зависимость скорости воздушного потока в точке от удаления ее от всасывающего сопла. Установлено, что расхождение опытных данных с теоретическими, рассчитанными на основании формулы М.П. Калинушкина, не превышают 10 %, что достаточно для инженерных расчетов.

3. Определена зона активного действия всасывающего факела при удалении от сопла (составляет 0,078…0,142 м).

4. Ввиду невысокого максимального значения скорости всасывания рекомендовано повысить ее путем уменьшения высоты входной щели сопла до 80 мм и оптимизировать активную зону всасывания, для чего следует провести дополнительные лабораторные исследования.

5. Поскольку воздухонепроницаемые усилительные ребра сопел значительно ослабляют всасывающий факел, следует рассмотреть вопрос об изготовлении их с частичной проницаемостью и ориентированными длинной стороной вдоль линий тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 5. С. 105–117.

2. Lindsay R., Birnie R., Clough C. Commercial peat extraction // *IUCN UK Committee Peatland Programme Briefing Note*. 2014. №. 6. P. 1–5.

3. Соловьев К.Н., Яблонев А.Л. Экологические аспекты применения пневматического метода уборки фрезерного торфа // *Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии: сборник научных трудов и материалов III Международной научно-практической конференции (Тверь, 30 марта–2 апреля 2017 г.).* Тверь: ТвГТУ, 2017. С. 316–319.

4. Chertkova E., Sizova V. Production and Technological Parameters of Milled Peat Extraction Depending on Organization of Peat Machines Operations // *E3S Web of Conferences: IVth International Innovative Mining Symposium*. 2019. V. 105. P. 01002.

5. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological approaches to reducing the loss of peat raw materials in fields with hydrological regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. No. 12. P. 89525.

6. Горцакалян Л.О., Чернышев В.В. Исследование скоростного поля всасывающего, нагнетательного и всасывающе-нагнетательного факелов активного сопла пневмоуборочной машины // *Технология и комплексная механизация торфяного производства: межвузовский тематический сборник.* Калинин: КПИ, 1977. С. 28–32.

7. Горцакалян Л.О. Влияние поступательной скорости пневмоуборочной машины на изменение концентрации аэросмеси // *Механизация процессов добычи и переработки торфа: труды Калининского политехнического института.* М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1974. С. 20–24.

8. Соболев А.А., Мельник П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // *Вектор науки ТГУ*. 2011. № 3 (17). С. 82–86.

9. Солопов С.Г., Горцакалян С.Г., Чернышев В.В. Определение минимальной скорости воздушного потока на входе во всасывающее сопло пневмоуборочной машины // *Механизация добычи торфа: сборник научных трудов.* М.: Недра, 1974. Вып. XVII (XIII). С. 5–9.

10. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М., Андрианова А.А. Экспериментальное определение скорости витания торфяных частиц в пневмотранспортных установках. *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы международной конференции / под общ. ред. Р.А. Ковалева.* Тула: ТулГУ, 2018. С. 117–124.

11. Соловьев К.Н., Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование зависимости параметров витания частиц торфа в пневмотранспортных устройствах от качественной характеристики фрезерной крошки // *Проблемы и перспективы устойчивого развития торфяного дела в России: материалы международной научно-практической конференции.* Тверь: ТвГТУ. С. 137–141.

12. Singh K. Allocation and sustainable management of peat resources on public land // *AEP Public Land Management*. 2016. № 9. P. 1–14.

13. Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование всасывающего факела торфяной пневмоуборочной машины КТТ-2 // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № S39. С. 47–58.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Щербакова Д.М. Исследование работы всасывающего сопла торфяной пневмоуборочной машины // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 40–49.

STUDY OF THE OPERATION OF THE SUCTION NOZZLE OF PEAT PNEUMATIC HARVESTER

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., D.M. SCHERBAKOVA

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: alvovich@mail.ru

The extraction of milled peat by the pneumatic harvesting complex of machines has a number of advantages in contrast to the mechanical method. These advantages are as follows: the milling of wet peat deposits during harvesting is excluded, the range of required equipment is reduced, and the cycle time is shortened from two to one day. The latter is especially important, since two-day periods with good sunny weather in the production season are much less than one-day ones. Therefore, in general, the reliability of the method with pneumatic peat harvesting is higher. To evaluate the efficiency of the modern KTT-2 pneumatic harvesting machine, a field experiment was conducted to evaluate the suction speed of the nozzle of the machine. The results of the study made it possible to build the velocity field of the suction torch and determine the maximum suction speed – 26.74 m/s. The minimum air flow velocity in the studied zone is 0.3 m/s and is observed at a distance of 0.5 m from the nozzle. An analysis of the velocity field of the suction torch revealed the dependence of the air flow velocity on the distance from the nozzle. The size of the active zone of the suction plume has been identified and ways to optimize its size have been proposed.

Keywords: peat, weather conditions, pneumatic harvesting machine, suction torch, nozzle, active zone, fractional composition, anemometer

REFERENCES

1. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects for Peat Production in the Russian Federation. *Gorniy Informatsionno-analitichesky byulleten*. 2017. No. 5, pp. 105–117. (In Russian).

2. Lindsay R., Birnie R., Clough C. Commercial peat extraction. *IUCN UK Committee Peatland Programme Briefing Note*. 2014. No. 6, pp. 1–5.

3. Solovyov K.N., Yablonev A.L. Environmental aspects of milled peat pneumatic harvesting method. *Actual problems of life safety and ecology: a collection of scientific papers and materials III International scientific and practical conference.* Tver: TvGTU, 2017, pp. 316–319. (In Russian).

4. Chertkova E., Sizova V. Production and technological parameters of milled peat extraction depending on organization of peat machines operations. *E3S Web of Conferences: IVth International Innovative Mining Symposium.* 2019. V. 105, p. 01002.

5. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological approaches to reducing the loss of peat raw materials in fields with hydrological regime. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. No. 12, pp. 89525.

6. Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Study of the speed field of the suction, pumping and suction-pumping torches of the active nozzle of the pneumatic harvester. *Papers of Intercollegiate Thematic Collection "Technology and complex mechanization of peat production".* Kalinin: KPI, 1977, pp. 28–32. (In Russian).

7. Gortsakalyan L.O. Effect of the progressive speed of the pneumatic harvecter on the change in the concentration of the aircraft mix. *Proceedings of the Kalinin Polytechnical Institute* "*Mechanization of Peat Extraction and Processing".* Moscow: TsNIITEstroymash, 1974. pp. 20–24. (In Russian).

8. Sobolev A.A., Melnik P.A., Tyutyunik A.O. Particle movement in the airflow. *Vektor Nauki TGU*. 2011. No. 3 (17). pp. 82–86. (In Russian).

9. Solopov S.G., Gortsakalyan L.O., Chernishov V.V. Determining the minimum air flow speed at the entrance to the suction nozzle of pneumatic harvester. *Scientific Works* "*Peat mining mechanization".* Moscow: Nedra, 1974. V. XVII (XIII), pp. 5–9. (In Russian).

10. Yablonev A.L., Scherbakova D.M., Andrianova A.A. Experimental determination of the speed of peat particle soaring in air transport installations. *Materials of International Conf*erence *"Social-economic and Environmental Problems of Mining, Construction and Energy".* Tula: TulGU, 2018. pp. 117–124. (In Russian).

11. Solovyov K.N., Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the dependence of the parameters of the soaring of peat particles in air transport devices from the qualitative characteristics of milling crumbs. *Materials of International Conference "Problems and Prospects for Sustainable Development of Peat Business in Russia".* Tver: TvGTU, 2018. pp. 137–141. (In Russian).

12. Singh K. Allocation and sustainable management of peat resources on public land. *AEP Public Land Management*. 2016. No. 9. pp. 1–14.

13. Yablonev A.L., Scherbakova D.M. Study of the suction torch of the peat pneumatic harvesting machine KTT-2. *Gorniy Informatsionno-analitichesky Byulleten*. 2019. No. S39. pp. 47–58. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 13.06.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020; принята/accepted 14.08.2020

УДК 622.331:621.867.8

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ТОРФА НА ОТНОСИТЕЛЬНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ ВОЗДУШНОЙ И ТВЕРДОЙ ФАЗ

С.М. ПЕТРЕНКО, Н.И. БЕРЕЗОВСКИЙ, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь, e-mail: berezovsky@bntu.by

Численными методами определены действительные режимные параметры вертикального пневмотранспорта фрезерного торфа по известным из опыта перепаду давлений на участке пневмотранспортного трубопровода и расходным параметрам. Выполнена оценка влияния основных режимных параметров на коэффициент относительного скольжения воздушной и твердой фаз.

Ключевые слова: вертикальный пневмотранспорт, измельченный торф, действительные режимные параметры, воздушная и твердая фаза, относительное скольжение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-50-58

ВВЕДЕНИЕ

Под режимными параметрами процесса пневмотранспорта сыпучих материалов понимаются факторы, изменение которых приводит к соответствующему изменению потерь давления на единице длины пневмотранспортного трубопровода. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что к ним относятся физические свойства; состояние и расход несущей воздушной фазы; массовая расходная концентрация или производительность по транспортируемому материалу; размерно-плотностные и аэродинамические характеристики транспортируемых частиц; геометрические размеры трубопровода и его расположение в пространстве.

В соответствии с физической моделью регулирования силового взаимодействия в потоке аэросмеси [1] изменение любого режимного параметра или их совокупности вызывает изменение условий взаимодействия поверхностных, массовых и инерционных сил в объеме движущейся аэросмеси, что приводит к переходу к режиму течения с другим значением истинной объемной концентрацией материала и другими удельными затратами энергии (потерями давления на единице длины пневмотранспортного трубопровода). Изменение истинной объемной концентрации частиц материала в потоке аэросмеси реализуется путем перехода к режиму течения с другим относительным скольжением воздушной и твердой фаз.

Скольжение воздушной и твердой фаз принято определять по величине коэффициента относительного скольжения: $\varepsilon = \vartheta_м / \vartheta_в$, где $\vartheta_м$ и $\vartheta_в$ – действительные (с учетом стеснения поперечного сечения пневмотранспортного трубопровода торфяными частицами) скорости частиц материала и воздуха соответственно. Экспериментальное определение истинной объемной концентрации или непосредственное измерение действительных скоростей торфяных частиц и воздуха достаточно сложны в отличие от регистрации так называемых расходных режимных параметров – расходной массовой концентрации $\mu = Q_м / Q_в$ и приведенных (отнесенных ко всему поперечному сечению трубопровода) скоростей воздуха

$V_в = 4Q_в / \pi D^2$ и частиц материала $V_м = 4Q_м / \pi D^2$, где $Q_в$ и $Q_м$ – массовые производительности по воздуху и торфяным частицам, кг/с.

Известны [2] экспериментальные зависимости перепада давления Δp на участке пневмотранспортного трубопровода длиной L от приведенной (отнесенной ко всему поперечному сечению трубопровода) скорости воздуха $V_в$ при различных расходных массовых производительностях $Q_м$ по измельченному торфу. Зависимости $\Delta p / L = f(V_в)$ получены при вертикальном пневмотранспорте образцов измельченного торфа с разными размерно-плотностными (средним диаметром d и плотностью торфяных частиц $\rho_м$) и аэродинамическими (приведенной скоростью витания V_{sn}) характеристиками в трубопроводах различных диаметров D. Типичный вид таких зависимостей $\Delta p / L = f(V_в)$ представлен на рис. 1.

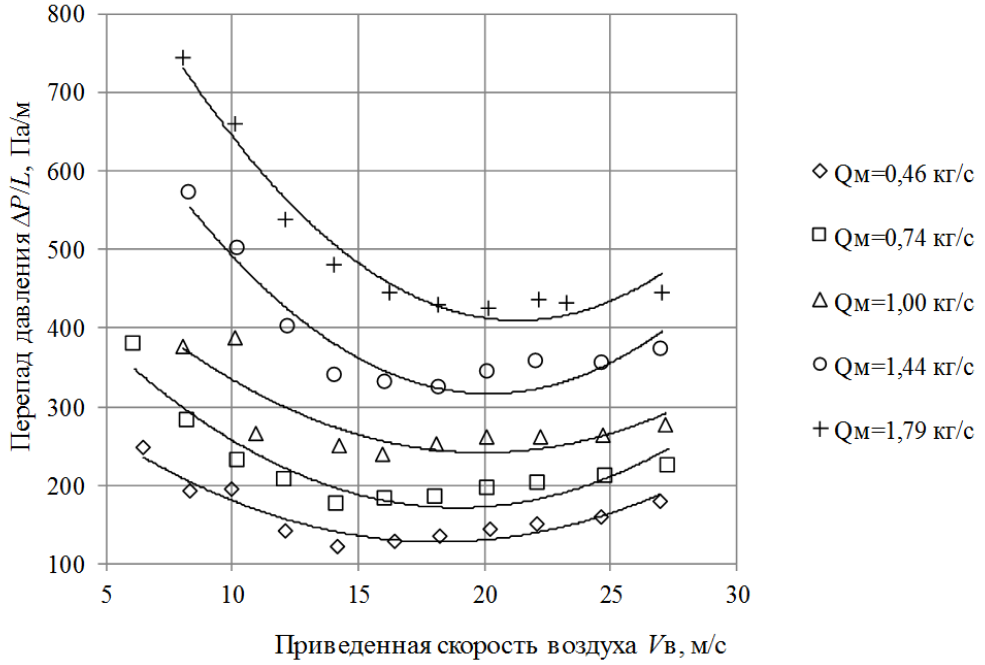


Рис. 1. Зависимости перепада давления на участке пневмотранспортного трубопровода от приведенной скорости воздуха при различных расходных массовых производительностях по измельченному торфу

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ФАЗ

Для определения действительных скоростей частиц материала и воздуха из экспериментальных зависимостей $\Delta p / L = f(V_в)$ был реализован описанный ниже алгоритм [3].

При полной стабилизации течения аэросмеси за разгонным участком вертикального пневмотранспортного трубопровода уравнение движения торфовоздушной смеси имеет вид [4]

$$\frac{\Delta p}{L} = (1-\varphi)\,\rho_в\, g + \varphi\rho_м\, g + (1-\varphi)\lambda_в\rho_в\,\frac{\vartheta_в^2}{2D} + \varphi\lambda_м\rho_м\,\frac{\vartheta_м^2}{2D}, \qquad (1)$$

где φ – истинная объемная концентрация торфяных частиц в аэросмеси; $\rho_в$ и $\rho_м$ – плотности воздушной и твердой фаз соответственно; g – ускорение свободного

падения; $\lambda_в$ – коэффициент сопротивления перемещению воздушной фазы; $\lambda_м$ – коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы.

Коэффициент сопротивления перемещению воздушной фазы определяется по действительной скорости воздуха эмпирическими зависимостями вида $\lambda_в = f(\mathrm{Re}, \Delta / D)$, где $Re = \vartheta_в D \rho_в / \eta$ – критерий Рейнольдса; η – динамическая вязкость воздуха; Δ – шероховатость стенок трубопровода .

Коэффициент сопротивления перемещению частиц твердой фазы в уравнении (1) находится из выражения [4]

$$\lambda_м = 2\frac{gD}{\vartheta_м^2}\frac{(\vartheta_в - \vartheta_м)\,Abs\,(\vartheta_в - \vartheta_м)}{\vartheta_s^2(1-\varphi)} - 2\frac{gD}{\vartheta_м^2}(1-\frac{\rho_в}{\rho_м}) + \lambda_в \frac{\rho_в}{\rho_м}\frac{\vartheta_в^{\,2}}{\vartheta_м^2}, \qquad (2)$$

где $\vartheta_s = \vartheta_{sn}(1-\varphi)^3(1-(d_э / D)^2)^{3/2}$ – действительная (с учетом стеснения потока частицами транспортируемого материала) скорость витания; ϑ_{sn} – приведенная (без учета стеснения потока) скорость витания; $d_э$ – эквивалентный диаметр полидисперсной смеси торфяных частиц.

Значения $d_э$, $\rho_м$ и ϑ_{sn} определяются по известным степени разложения, степени механической переработки, влажности и гранулометрическому составу образца измельченного торфа [5].

Принято допущение об изотермическом процессе расширения воздуха при течении аэросмеси в вертикальном пневмотранспортном трубопроводе. Тогда среднее по длине участка L, на котором измеряется перепад давления Δp, давление воздуха

$$p_{ср} = \frac{2{,}3\, p_н \lg \dfrac{p_н}{p_к}}{\left(p_н / p_к - 1\right)},$$

где $p_н$ и $p_к$ – давление соответственно в начале и конце участка, на котором измеряется перепад давления.

Расчетная плотность воздуха на участке трубопровода

$$\rho_в = \rho_{вк}\frac{p_{ср}}{p_к}, \qquad (3)$$

где $\rho_{вк}$ – плотность воздуха при давлении $p_к$.

Действительная скорость воздуха устанавливается по известной из опыта приведенной скорости $V_в$:

$$\vartheta_в = \frac{V_в}{(1-\varphi)}.$$

Действительная скорость материала определяется по известной из опыта приведенной скорости материала $V_м$:

$$\vartheta_м = \frac{V_м}{\varphi} = \frac{4Q_м}{\pi D^2 \rho_м \varphi}.$$

Для каждой пары значений $(\Delta p / L)_{оп}$ и $V_в$ при известном $Q_м$ циклическими итерациями вычисляются значения действительных скоростей витания, воздуха и материала для каждого текущего значения истинной объемной концентрации при изменении последней от $\varphi_{\max}$ до $\varphi_{\min}$ с заданным шагом $d\varphi$. Затем вычисляются значения *Re* и коэффициента сопротивления воздушной фазы при текущем значении истинной концентрации.

Полученные значения используются для вычисления по уравнению (2) коэффициента сопротивления перемещению частиц твердой фазы при расчетной плотности воздуха (см. уравнение (3)). Далее вычисленные значения подставляются в (1) для определения расчетного значения $(\Delta p / L)_p$ при текущем значении истинной концентрации.

Расчетное значение $(\Delta p / L)_p$ сравнивается с опытным $(\Delta p / L)_{оп}$. Если абсолютное значение разности расчетного и опытного значений $(\Delta p / L)_p - (\Delta p / L)_{оп}$ превышает заданную погрешность вычислений δ, итерации повторяются с новым значением истинной объемной концентрации. Если текущее значение истинной объемной концентрации достигло $\varphi_{\min}$ и условие $|(\Delta p / L)_p - (\Delta p / L)_{оп}| <= \delta$ не выполняется, шаг изменения истинной объемной концентрации уменьшается и вычисления повторяются заново при изменении концентрации от $\varphi_{\max}$ до $\varphi_{\min}$.

Значение истинной объемной концентрации φ, при котором выполняется условие $|(\Delta p / L)_p - (\Delta p / L)_{оп}| <= \delta$, удовлетворяет уравнениям (1) и (2) и соответствует реализуемой в данном конкретном случае пневмотранспорта совокупности действительных режимных параметров. По известному значению φ и расходным параметрам можно определить действительные скорости воздуха и материала, коэффициент относительного скольжения воздушной и твердой фаз и другие важные для понимания закономерностей процесса пневмотранспорта действительные параметры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Типичный вид зависимостей $\varepsilon = f(\vartheta_в)$ при вертикальном пневмотранспорте одного из образцов (образец – фрезерный верховой торф, средний диаметр d = 1,8 мм, средняя плотность частиц $\rho_м$ = 845 кг/м^3) в трубопроводах разных диаметров D с различными массовыми производительностями $Q_м$, полученный обработкой экспериментальных зависимостей $\Delta p / L = f(V_в)$ по изложенной методике, представлен на рис. 2.

С увеличением действительной скорости воздуха коэффициент относительно скольжения возрастает при всех реализованных совокупностях режимных параметров пневмотранспорта.

Влияние на относительное скольжение фаз размеров и плотности торфяных частиц при вертикальном пневмотранспорте в трубопроводе одного диаметра (D = 0,053 м) при близкий значениях массовой производительности по транспортируемому материалу характеризует рис. 3. Более мелкие, но менее плотные частицы фрезерного торфа со средним диаметром d = 1,8 мм и плотностью $\rho_м$ = 845 кг/м^3 достигают более высокой скорости и имеют при прочих равных условиях большее значение коэффициента относительного скольжения. Более крупные частицы дробленого верхового торфа со средним диаметром d = 5,5 мм имеют большую

плотность ($\rho_м$ = 935 кг/м^3) вследствие механической переработки и, следовательно, меньшее значение коэффициента относительного скольжения (обозначение плотности на рис. 3 – г).

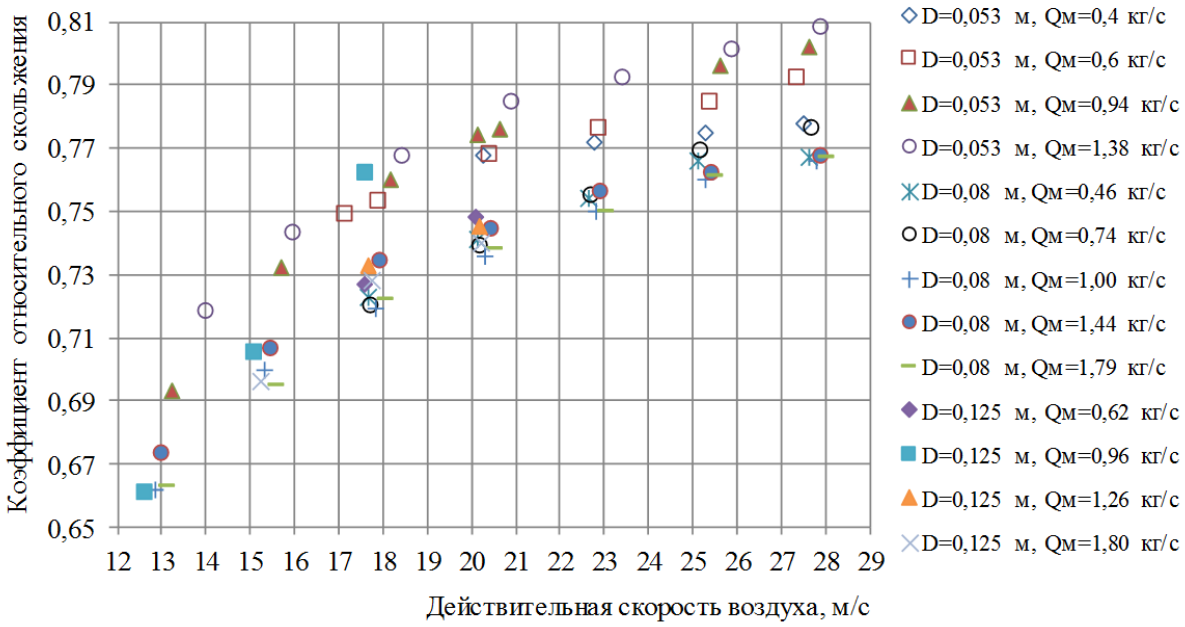


Рис. 2. Зависимости коэффициента относительного скольжения от действительной скорости воздуха при вертикальном пневмотранспорте фрезерного верхового торфа в трубопроводах разных диаметров

Рис. 3. Влияние на коэффициент относительного скольжения размера и плотности торфяных частиц

Приведенная скорость витания торфяных частиц ϑ_{sn} определяется соотношением их размеров и плотности [5]. Торфяные частицы с меньшими значениями скорости витания при вертикальном пневмотранспорте в трубопроводах одинакового диаметра с близкими значениями массовых производительностей разгоняются до больших скоростей при одной и той же скорости несущей воздушной фазы (рис. 4).

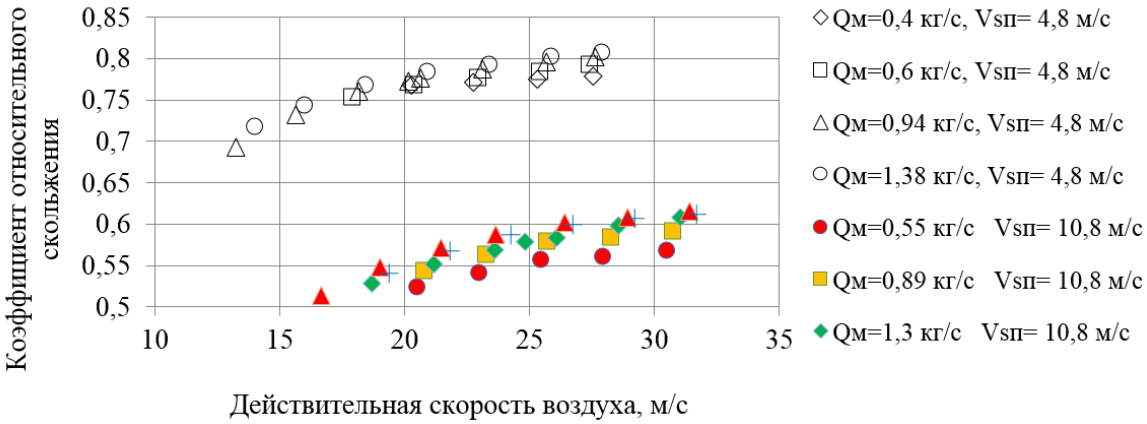


Рис. 4. Влияние приведенной скорости витания
на коэффициент относительного скольжения

Влияние диаметра трубопровода на относительное скольжение фаз при вертикальном пневмотранспорте несущественно. На рис. 5 представлена зависимость $\varepsilon = f(\vartheta_в)$ для одного и того же образца измельченного торфа при пневмотранспорте его в трубопроводах диаметрами D = 0,053 м и D = 0,125 м при схожих производительностях по материалу $Q_м$.

Рис. 5. Влияние диаметра пневмотранспортного трубопровода
на коэффициент относительного скольжения

Опытные точки (см. рис. 1) для реализованных значений $Q_м$ получены при разных значениях приведенной скорости воздуха $V_в$. Поэтому для оценки влияния на относительное скольжение производительности $Q_м$ экспериментальные зависимости $\Delta p / L = f(V_в)$ аппроксимировались полиномами (величина достоверности аппроксимации $R2$ = 0,895…0,964). По полученным аппроксимирующим зависимостям вычислялись значения $\Delta p / L$ при различных $Q_м$ для одинаковых фиксированных значений приведенной скорости $V_в$. Для вычисленных по полиномам значений $\Delta p / L$ при заданных значениях $V_в$ и $Q_м$ определялись соответствующие им значения коэффициентов относительного скольжения.

Коэффициенты относительного скольжения $\varepsilon = \vartheta_м / \vartheta_в$ при одинаковых фиксированных значениях скорости несущей воздушной фазы возрастают с увеличением массовой производительности (рис. 6).

Рис. 6. Влияние массовой производительности по торфяным частицам на коэффициент относительного скольжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что изменение любого режимного параметра процесса вертикального пневмотранспорта измельченного торфа или их совокупности приводит к соответствующему изменению относительного скольжения воздушной и твердой фаз. Наибольшее влияние на величину коэффициента относительного скольжения оказывают приведенная скорость витания торфяных частиц и массовая производительность, наименьшее – диаметр пневмотранспортного трубопровода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко С.М. Формирование режимов движения аэросмеси при пневмотранспорте сыпучих материалов // *Машины и технология торфяного производства*. Вып. 16. Минск: Вышэйшая школа, 1987. С. 73–77.

2. Бакшанский В.И. Исследование пневматического транспортирования измельченного торфа при повышенных концентрациях аэросмеси: дисс… канд. техн. наук. Минск, 1978. 259 с.

3. Петренко С.М. Методика определения действительных режимных параметров пневмотранспорта измельченного торфа // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики*: *сборник научных трудов 9-й Международной научно-технической конференции: в 2 т. Т. 1.* Минск: БНТУ, 2013. С. 478–482.

4. Петренко С.М. Уравнения движения двухфазной среды в пневмотранспортном трубопроводе // *Проблемы технологии и механизации разработки месторождений полезных ископаемых: сборник научных трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Опейко Федора Александровича (Республика Беларусь, г. Минск, 20–23 февраля 2008 г.): в 2 ч. Ч. 1* / редкол. И.И. Лиштван и др. Минск, 2009. С. 106–109.

5. Кислов Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / под. ред. И.И. Лиштвана. Минск: Наука и техника, 1987. 175 с.

Для цитирования: Петренко С.М., Березовский Н.И. Влияние режимных параметров вертикального пневмотранспорта измельченного торфа на относительное скольжение воздушной и твердой фаз // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 50–57.

EFFECT OF OPERATING PARAMETERS OF VERTICAL PNEUMATIC TRANSPORT OF CRUSHED PEAT ON RELATIVE SLIDING OF AIR AND SOLID PHASES

S.M. PETRENKO, N.I. BEREZOVSKY, Dr. Sc.

Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Belarus, e-mail: berezovsky@bntu.by

The actual operating parameters of the vertical pneumatic conveying of milled peat are determined by numerical methods on the grounds of the pressure differential in the pneumatic conveying pipeline section and flow rates known from experience. The assessment of the influence of the main operating parameters on the coefficient of relative slip of the air and solid phases is carried out.

Keywords: vertical pneumatic conveying, crushed peat, actual operating parameters, air and solid phase, relative slip.

REFERENCES

1. Petrenko S.M. The formation of the modes of movement of air mixtures during pneumatic transport of bulk materials. *Machines and technology of peat production*. V. 16. Minsk: Vysheyshaya shkola, 1987, pp. 73–77. (In Russian).

2. Bakshansky V.I. The study of pneumatic transportation of ground peat at elevated concentrations of air mixture: cand. dis. Minsk. 1978. 259 p. (In Russian).

3. Petrenko S.M. The methodology for determining the actual operating parameters of pneumatic transport of crushed peat. *Socio-economic and environmental problems of mining, construction and energy*: Papers of 9th International scientific and technical conference: In 2 parts. V. 1. Minsk: BNTU, 2013, pp. 478–482. (In Russian).

4. Petrenko S.M. Equations of motion of a two-phase medium in a pneumatic conveying pipeline. *Problems of technology and mechanization of mineral deposits development: collection of scientific papers of the International scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of Fedor Opeyko (Republic of Belarus, Minsk, February 20–23, 2008):* in 2 parts. V. 1, ed. I.I. Lishtvan et al. Minsk, *2009*, pp. 106–109. (In Russian).

5. Kislov N.V. Aerodinamika izmelchennogo torfa [Aerodynamics of crushed peat] under. ed. I.I. Lishtvan. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987. 175 p.

Поступила в редакцию/received: 16.06.2020; после рецензирования/revised: 15.07.2020;
принята/accepted 14.08.2020

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.054:378.1

УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МЕТОДИКА ПОДГОТОВКИ НА ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПЛЕКС СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

В.А. МОРЕНКОВ, канд. воен. наук, И.С. ЖИХАРЕВ, адъюнкт

Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,
170003, Тверь, ул. Жигарева, 50, e-mail: ruslink83@mail.ru

Описана существующая методика подготовки на перспективный комплекс средств автоматизации пункта управления соединения противовоздушной обороны, показаны пути ее совершенствования на основе применения современных информационных технологий тренажерного обучения в свете принятия на вооружение перспективного комплекса средств автоматизации, а также учета организационных и технических недостатков, являющихся причинами невысокого уровня практической подготовки обучающихся.

Ключевые слова: комплекс средств автоматизации, информационные технологии, тренажер, практический уровень подготовки, методика подготовки, экспертный метод.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-58-66

ВВЕДЕНИЕ

Освоение современного объема накопленных человечеством знаний не может происходить стихийно, вне какой-либо организованной системы. Функцию создания такой системы образования берет на себя государство, которое формирует политику в области образования, определяет структуру и взаимосвязь элементов этой системы, направления (перспективы) ее развития [1].

Процесс модернизации военного образования и науки в России является объективной социальной потребностью как ответ вызовам XXI века. Россия в своем цивилизационном развитии, как и другие страны, вовлеченная в процесс глобализации, идет к формированию основ информационного общества. В таких условиях имеется объективная потребность в модернизации социальных институтов, в том числе института военного образования и науки.

Высшее военное учебное заведение (ввуз) в г. Твери в настоящее время переживает этап бурного роста по всем направлениям развития, поэтому совершенствование методик подготовки обучающихся является жизненной необходимостью [2].

Проведенный анализ методики подготовки обучающихся ввуз на комплекс средств автоматизации (КСА) пункта управления (ПУ) соединения противовоздушной обороны (ПВО) выявил ряд существенных недостатков как организационного, так и технического характера. Данные недостатки негативно влияют на уровень практической подготовки обучающихся ввуз при использовании автоматизированного

способа управления в воздушно-космических силах (ВКС) посредством применения КСА.

Организационные недостатки связаны прежде всего с перегруженностью системы учебных командных пунктов ввуз и, как следствие, отсутствием возможности заниматься подготовкой на КСА в часы самостоятельной работы, превышением количества обучающихся на одно автоматизированное рабочее место, неготовностью личного состава ввуз обучать на перспективный КСА и др.

Технические недостатки связаны с невысокими обучающими возможностями тренажерно-имитационной аппаратуры существующих КСА и с отсутствием в ввуз тренажеров и тренажерно-обучающих комплексов (систем) на базе современных информационных технологий тренажерного обучения [3].

Выявленные недостатки являются основными причинами недостаточно высокого уровня подготовки слушателей, курсантов и офицеров войск, обучающихся в ввуз на курсах повышения квалификации [4].

В настоящее время ВКС готовятся к принятию на вооружение ряда перспективных КСА (в первую очередь для соединения ПВО). Данный факт делает вопрос совершенствования существующей методики подготовки на КСА ПУ соединения ПВО актуальным и требует улучшения существующей методики. Совершенствовать существующую методику предлагается за счет устранения выявленных недостатков в образовательной деятельности с целью повышения уровня подготовки обучающихся на основе применения современных информационных технологий тренажерного обучения и за счет учета особенностей перспективного КСА [5].

Пути устранения организационных недостатков известны и требуют напряженных усилий руководящего состава ввуза, в частности кафедр, вовлеченных в подготовку на конкретный КСА.

Устранение технических недостатков требует проработки вопросов применения современных информационных технологий тренажерного обучения [6]. Главным преимуществом этих технологий является относительно низкая стоимость подготовки и высокий коэффициент полезной нагрузки. Поэтому основная цель создания и применения тренажера – повышение практической подготовки обучающихся.

Устранение выявленных недостатков – научная задача, так как требует поиска рациональной методики подготовки, позволяющей комплексировать различные влияющие на образовательную деятельность ввуза факторы как организационного, так и технического характера. Для выбора рациональной методики подготовки на перспективный КСА ПУ соединения ПВО, которая позволит устранить выявленные недостатки, необходимо сформировать множество возможных методик подготовки. В методиках подготовки должны быть учтены состав групп обучающихся (для подготовки к решению задач боевых расчетов), характер решаемых при подготовке задач и цели подготовки. Затем необходимо выбрать только те методики, которые удовлетворяют ограничениям на время, затраченное на обучение, и ее стоимость.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ

Выбор рациональной методики подготовки обучающихся из множества сформированных необходимо осуществлять по максимуму показателя уровня подготовки обучающихся, достигнутого с помощью данной методики.

Формирование множества предпочтительных вариантов методик подготовки, обеспечивающих требуемый уровень подготовки за располагаемое время, путем перебора и оценки всех возможных вариантов – процесс трудоемкий. В связи с этим при выборе предпочтительных вариантов методик подготовки предлагается использовать метод экспертной оценки [7].

Подбор количественного и качественного состава экспертов проводится по результатам контрольных экспертиз, а группа экспертов определяется на основе индивидуальных характеристик: опыта исполнения служебных обязанностей по должности, компетентности, самокритичности, конструктивности мышления; результатов опроса.

Для выбора предпочтительных методик подготовки, подлежащих дальнейшей оценке, применен метод балльного оценивания, осуществляемый в два этапа.

На первом этапе определяются коэффициенты относительной важности методов подготовки, технических и программных средств, с помощью которых возможно проведение занятий по различным вариантам методик подготовки обучающихся из множества V.

Значение коэффициента относительной важности каждого метода, технического и программного средства (подготовки) оценивается по десятибалльной шкале. За оценку g_{mi}, g_{sj}, g_{pl} показателей принимаются средние значения:

$$g_{mi} = \frac{\sum_{u=1}^{U} \mu_{mi}}{U};$$

$$g_{sj} = \frac{\sum_{u=1}^{U} \mu_{sj}}{U};$$

$$g_{pl} = \frac{\sum_{u=1}^{U} \mu_{pl}}{U};$$

где g_{mi} – коэффициент относительной важности *i*-го метода; g_{sj} – коэффициент относительной важности *j*-го технического средства; g_{pl} – коэффициент относительной важности l-го метода; *U* – количество экспертов; μ_{mi} – балл, выставляемый *u*-м экспертом *i*-му методу подготовки; μ_{sj} – балл, выставляемый *u*-м экспертом *j*-му техническому средству; μ_{pl} – балл, выставляемый *u*-м экспертом l-му программному средству.

На втором этапе формируется методом бального оценивания [8] множество предпочтительных вариантов методик подготовки. Методика формирования вариантов методик подготовки дана на рис. 1.

Оценка качества деятельности и уровня подготовки обучающихся. Для оценки оперативности деятельности необходимы обоснованные оперативно-тактические нормативы, которые в настоящее время полностью отсутствуют или имеются частично, что затрудняет определение уровня их подготовки. Их установление предлагается по известной методике.

Определение качества деятельности и уровня подготовки обучающихся может быть основано на сравнении требуемого и достигнутого качества их деятельности по индивидуальным показателям. Для ее оценки будем исходить из показателей оперативности управления $К_{оу\,k}$ и безошибочности работы $К_{бр\,k}$.

Методика оценки уровня подготовки обучающихся представлена на рис. 2.

Для выбора рациональной методики подготовки из множества предпочтительных методик необходимо провести натурный эксперимент, т. е. обучить различные группы с помощью выбранных предпочтительных методик. После чего по максимальному значению показателя уровня подготовки $К_п$ следует выбрать рациональную методику подготовки обучающихся на КСА ПУ соединения ПВО.

Методика подготовки на основе информационных технологий тренажерного обучения

Варьируемые параметры		Неварьируемые параметры			
Методы подготовки	Средства подготовки	Предметы подготовки	Время подготовки	Формы подготовки	Состав группы

Формирование множества предпочтительных вариантов методик подготовки группы на основе информационных технологий тренажерного обучения

Формирование экспертной группы | Оценка компетентности экспертов | Выбор способа экспертного опроса

Проведение экспертного опроса

Определение коэффициентов относительной важности методов, технических и программных средств подготовки, применение которых возможно при подготовке группы обучающихся на основе информационных технологий тренажерного обучения

Определение множества методов подготовки | Определение множества технических средств подготовки | Определение множества программных средств подготовки

Формирование методами комбинаторики и логического анализа множества предпочтительных вариантов методик подготовки *V*. Критерием формирования каждого варианта методик является возможность совместимости в рамках одной комбинации различных методов и средств подготовки.

Множество предпочтительных вариантов методик подготовки

Вариант $v_{п1}: m_1, s_1, p_1$ | Вариант $v_{п2}: m_2, s_2, p_2$ | . . . | Вариант $v_{пV}: m_I, s_J, p_L$

Рис. 1. Методика формирования
предпочтительных вариантов методик подготовки

Структура усовершенствованной методики формирования рациональной методики подготовки на перспективный КСА ПУ соединения ПВО представлена на рис. 3.

Определение степени важности предлагаемых показателей можно выполнить методом экспертных оценок, который позволяет найти количественные значения весовых коэффициентов γ_j, λ_d, α_i [9].

Для комплексной оценки уровня подготовки обучающихся представляется целесообразным применение совокупности дифференциальных показателей, характеризующих оперативность управления, безошибочность работы, уровень теоретической подготовки, полноту решения задач управления.

Для оценки качества деятельности группы обучающихся, например, при обучении задачам боевого расчета, используется коэффициент подготовки, учитывающий групповую деятельность обучающихся [10].

Рис. 2. Методика оценки уровня подготовки обучающихся

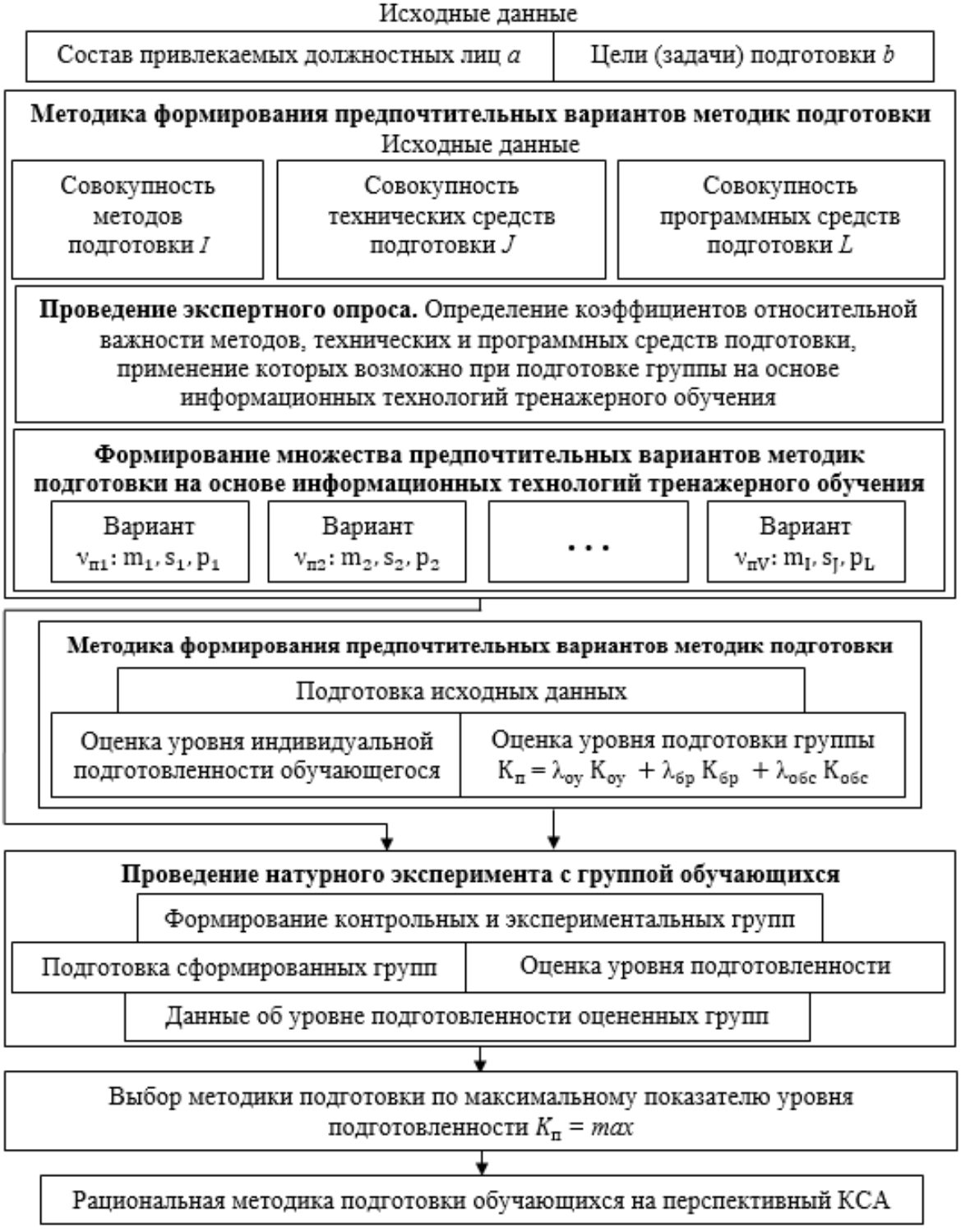


Рис. 3. Структура усовершенствованной методики формирования рациональной методики подготовки на перспективный КСА ПУ соединения ПВО

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для комплексной оценки уровня подготовки обучающихся предлагается применить совокупность дифференциальных показателей, характеризующих оперативность управления, безошибочность работы и полноту решения задач управления. Для оценки качества деятельности обучающихся в составе расчета КСА

используется коэффициент подготовки, учитывающий групповую деятельность должностных лиц расчета.

Существующая методика оценки уровня подготовки обучающихся ввуза не обеспечивает высокую достоверность оценки как дифференциальных, так и интегрального показателей оценки качества деятельности обучающихся. Усовершенствованная методика лишена этого недостатка, так как в ней применяется компьютерная информационная технология, позволяющая повысить достоверность получаемых результатов на этапе описания (формализации) алгоритмов деятельности обучающихся на КСА.

Отсутствие научно обоснованных оперативно-тактических нормативов для оценки качества деятельности обучающихся при работе на штатных автоматизированных рабочих местах затрудняет определение уровня подготовки. Усовершенствованная методика позволяет обосновать оперативно-тактические нормативы, учесть их при оценке качества деятельности и установлении уровня подготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет различных факторов организационного и технического характера позволит рационально выстроить подготовку на перспективный КСА, объединив различные кафедры для преподавания действительно сложного в освоении образца перспективного КСА и, как следствие, повысить уровень практической подготовки обучающихся на КСА ПУ соединения ПВО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об образовании в Российской Федерации: Федер. закон [принят Гос. Думой 21.12.2012]. URL: http://www.pravo.gov.ru/ (дата обращения: 19.06.2020).

2. Моренков В.А. Поколения и возможные направления развития автоматизированной системы управления истребительной авиацией // *Военная мысль*. 2019. № 10. С. 65–73.

3. Полич В.В. Проблемы военного образования и науки (социально-философский анализ) // *Профессиональное образование в современном мире*. 2015. № 2. С. 122–131.

4. Бурмистров С.К. Справочник офицера воздушно-космической обороны. Тверь: ВА ВКО, 2006. 569 с.

5. Моренков В.А., Жихарев И.С. Анализ возможностей программного обеспечения КСА ПУ дивизии ПВО по тактико-специальной подготовке боевого расчета // *Сборник статей Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны.* Ярославль: ЯВВУ, 2019.

6. Аксюхин А.А., Вицен А.А., Мекшенева Ж.В. Информационные технологии в образовании и науке. // *Современные наукоемкие технологии*. 2009. № 11. С. 50–52.

7. Дюйзен Е.Ю. Метод экспертного оценивания: руководство к действию // *Креативная экономика*. 2014. № 2 (86). С. 24–34.

8. Бугаев К.В. Системы оценивания успеваемости студентов: проблемы и перспективы. // *Вестник Сибирского института бизнеса и информационных технологий*. 2017. № 2 (22). С. 107–113.

9. Жихарев И.С. Вариант повышения эффективности тактико-специальной подготовки боевого расчета пункта управления дивизии ПВО // *Сборник статей конференции центра исследования военного потенциала зарубежных стран*. Москва. 2019. № 46. С 102.

10. Сорокатая Е.А. Содержание и виды групповой учебной деятельности студентов // *Молодой ученый*. 2015. №. 6. С. 686–689.

Для цитирования: Моренков В.А., Жихарев И.С. Усовершенствованная методика подготовки на перспективный комплекс средств автоматизации пункта управления соединения противовоздушной обороны // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 58–65.

THE IMPROVED METHODOLOGY OF PREPARATION FOR THE PERSPECTIVE COMPLEX OF AUTOMATION TOOLS OF THE CONTROL POINT OF THE AIR DEFENSE FORMATION

V.A. MORENKOV, Cand. Sc., I.S. ZHIKHAREV, Adjunct

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation, e-mail: ruslink83@mail.ru

The article describes the existing training methodology for a promising set of automation tools for a control point of an air defense unit, shows ways to improve it on the base of use of modern information technology of training in the light of adopting a promising complex of automation tools, as well as taking into account organizational and technical shortcomings, which are the reasons for the low level of practical training of students.

Keywords: a complex of automation tools, information technology, simulator, practical level of training, training methodology, expert method.

REFERENCES

1. About education in the Russian Federation: Feder. the law [adopted by the State Duma 21.12.2012]. URL: http://www.pravo.gov.ru/ (date of accessed: 19.06. 2020).

2. Morenkov V.A. Generations and possible directions of development of an automated control system for fighter aircraft. *Voyennaya mysl*. 2019. No. 10, pp. 65–73. (In Russian).

3. Polich VV Problems of military education and science (socio-philosophical analysis). *Professionalnoye obrazovaniye v sovremennom mire*. 2015. No. 2, pp. 122–131. (In Russian).

4. Burmistrov S.K. Spravochnik ofitsera vozdushno-kosmicheskoy oborony. [Handbook of an aerospace defense officer]. Tver: VA VKO. 2006. 569 p.

5. Morenkov V.A., Zhikharev I.S. Analysis of the capabilities of the KSA software of the air defense division for tactical and special training of combat crew. *Sbornik statey Yaroslavskogo vysshego voyennogo uchilishcha protivovozdushnoy oborony*. Yaroslavl: YAVVU, 2019. (In Russian).

6. Aksyukhin A.A., Vitsen A.A., Meksheneva J.V. Information technology in education and science. *Sovremennyye naukoyemkiye tekhnologii.* 2009. No. 11, pp. 50–52. (In Russian).

7. Duyzen E.Yu. Expert Assessment Method: A Guide to Action. *Kreativnaya ekonomika.* 2014. No. 2 (86), pp. 24–34. (In Russian).

8. Bugaev K.V. Student Assessment Systems: Problems and Prospects. *Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologiy.* 2017. No. 2 (22), pp. 107–113.

9. Zhikharev I.S. Variant of increasing the effectiveness of tactical and special training for combat crew of a control point of an air defense division. *Sb. statey konferentsii tsentra issledovaniya voyennogo potentsiala zarubezhnykh stran.* Moscow. 2019. No. 46, pp. 102. (In Russian).

10. Sorokataya EA The content and types of group educational activities of students. *Molodoy uchenyy.* 2015. No. 6, pp. 686–689. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 29.06.2020; после рецензирования/revised: 02.07.2020; принята/accepted 03.08.2020

УДК 004.032.2

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАЗВЕТВЛЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОБЪЕДИНЕНИЯ ВКС

С.Е. МИХАЙЛОВ, адъюнкт

Военная академия воздушно-космической обороны
имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова,
170003, Тверь, ул. Жигарева, 50, e-mail: krot-baraban@yandex.ru

Разработана методика, позволяющая повысить устойчивость цифровой сети передачи данных, которая будет учитывать связность при изменении ее структуры, за счет рациональной кластеризации узлов связи с использованием нейронных сетей.

Ключевые слова: система управления, система связи, радиорелейная сеть, нейронные сети, кластеризация узлов связи.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-66-73

ВВЕДЕНИЕ

Протоколы маршрутизации играют значительную роль в функционировании цифровой радиорелейной сети передачи данных (ЦРРСПД) объединения военно-космических сил (ВКС). Благодаря этим протоколам осуществляются самоорганизация сети и распределение информационных потоков оптимальными маршрутами в соответствии с алгоритмами, используемыми в соответствующем протоколе [1].

Есть несколько моделей связности узлов связи (УС) ЦРРСПД, которые определяют порядок следования информационных потоков при доставке их от источника к получателю. Среди этих моделей наиболее известные – одно- и многоинтервальные модели; последние подразделяются на плоские и иерархические.

В одноинтервальных моделях УС при достаточном расстоянии и условии прямой видимости передают свои данные напрямую к узлу-получателю. Такие модели можно применять только при размещении каждого из УС ЦРРСПД на достаточном расстоянии. В противном случае узлы просто не будут включены в состав сети. Эти модели являются неэффективными при использовании крупных сетей, поскольку может отсутствовать условие прямой видимости или тактико-технические характеристики средств радиорелейной связи не позволят организовать радиорелейное направление на заданное расстояние. Сети, построенные на основании данной топологии, являются немасштабируемыми.

В многоинтервальных моделях данные от каждого УС ЦРРСПД передаются опосредованно. В многоинтервальной плоской модели беспроводная среда разделяется и управляется отдельными узлами. Назначаются так называемые опорные узлы связи (ОУС), которые выступают в роли транзитных узлов связи (ТУС); задача последних – обеспечить транзит информационных потоков. Транзитные узлы связи ЦРРСПД необходимы для передачи (приема) информационных потоков ЦРРСПД между территориально разнесенными УС ЦРРСПД и выбираются с точки зрения сокращения числа транзитов. В теории сетей процесс объединения группы территориально разнесенных УС вокруг ОУС получил название – процесс кластеризации [1].

В иерархических протоколах (протоколах, основанных на кластеризации) сеть делится на кластеры (группы УС). Как уже говорилось, взаимное расположение

УС ЦРРСПД имеет определяющее значение в части ее потенциальных возможностей. Использование беспроводных технологий связи между УС обусловливает требования к топологическим характеристикам ЦРРСПД, которые зависят от свойств беспроводных каналов и требований к показателям качества обслуживания трафика.

В общем случае при обслуживании трафика доставка данных в сети производится по некоторым маршрутам, которые выбираются используемым протоколом сетевого уровня, реализующим тот или иной метод выбора маршрутов [2]. При этом маршрут может содержать некоторое количество транзитных участков (хопов), включающих в себя УС ЦРРСПД и соединяющие их каналы. Прохождение каждого из таких участков требует затрат времени, которые в совокупности определяют задержку доставки данных от отправителя к получателю. На каждом из участков также может произойти потеря данных, вероятность которой обусловливает возможные потери данных на маршруте.

Разделение сети на кластеры может производиться на основании определенных критериев:

географическое местоположение УС ЦРРСПД (те УС, которые расположены рядом друг с другом, т. е. являются соседями, попадают в один и тот же кластер);

условие прямой видимости;

мощность сигнала (узлы попадают в один и тот же кластер на основании «досягаемости» друг друга по мощности сигнала).

Во главу каждого кластера ставится главный кластерный узел (ГКУ), на который передаются данные с других УС ЦРРСПД в рамках данного кластера. Главный кластерный узел собирает данные со своего кластера и передает их дальше по ЦРРСПД. При этом ГКУ может оптимизировать данные, производя операции сжатия и фильтрации.

В иерархических протоколах отдельное место занимает понятие связности. Связность делится на две категории: внутри- и межкластерная связность.

Внутрикластерная связность обеспечивает передачу данных между УС внутри кластера, а межкластерная – между другими кластерами [2]. Первая может быть одно- или многоинтервальной. При одноинтервальной связности пакеты с данными передаются напрямую от УС источника к ГКУ, а при многоинтервальной – опосредованно, через другие УС ЦРРСПД, принадлежащие данному кластеру.

Межкластерная связность (так же, как и внутрикластерная) может быть одно- или многоинтервальной. При одноинтервальной связности данные, агрегированные ГКУ, передаются напрямую на вышестоящий кластер. Данный подход имеет существенный недостаток – ГКУ не всегда смогут передавать данные напрямую на вышестоящий узел ввиду их удаленности друг от друга [3]. Это существенное ограничение снижает как возможности использования протоколов с одноинтервальной межкластерной связностью, так и их масштабируемость.

Многоинтервальная связность позволяет каждому ГКУ, вне зависимости от его удаленности, передавать данные на вышестоящий кластер. Пакеты с данными передаются опосредованно (через другие ГКУ). Но здесь возникает другая проблема: в зависимости от дальности организации связи ГКУ может не хватить мощности средств радиорелейной связи, чтобы связаться друг с другом. Данная проблема межкластерной связности может возникнуть из-за особенностей деления на кластеры. Решением этой проблемы будет использование ТУС, через которые данные между двумя ГКУ будут передаваться опосредованно. Такие ТУС могут быть двух категорий: распределенные и общие. Общими ТУС называются такие УС, которые располагаются между радиусами передачи двух смежных ГКУ и реализуют двухинтервальную передачу: ГКУ1, ТУС, ГКУ2 (рис. 1).

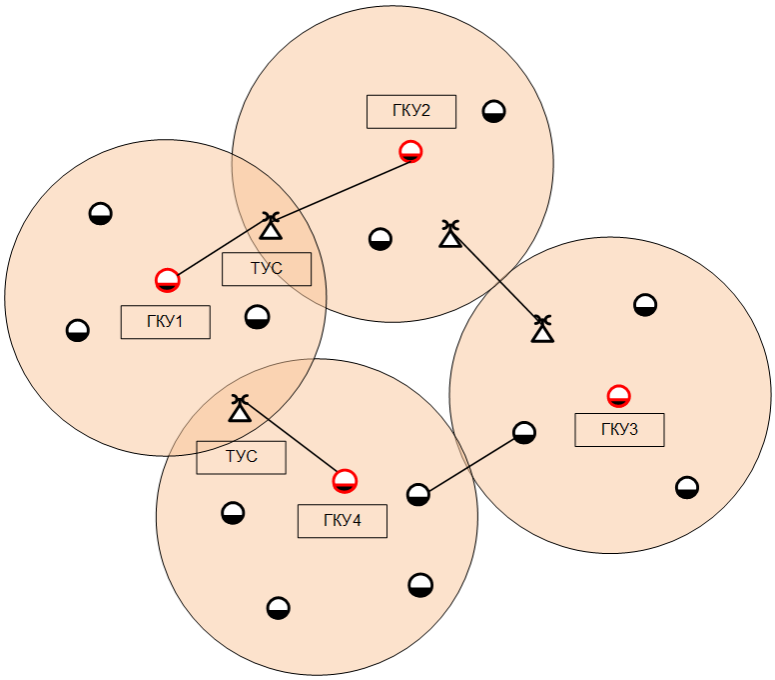


Рис. 1. Реализация двухинтервальной радиорелейной связи ЦРРСПД
с помощью транзитного узла связи

Когда два соседних кластера УС ЦРРСПД не имеют общего ТУС, то они могут связаться друг с другом через три интервала (три хопа) с помощью распределенных ТУС, каждый из которых расположен в своем кластере со своим ГКУ. Каждый из распределенных ТУС доступен только для своего ГКУ в рамках кластера.

Таким образом, распределенными ТУС называются УС, которые реализуют трехинтервальную передачу: ГКУ2, ТУС2, ТУС3, ГКУ3 (рис. 2).

Меж- и внутрикластерная связности, объединяясь, образуют иерархию, что соответствует названию данной группы протоколов. Узлы связи ЦРРСПД, подчиненные ГКУ в рамках кластера верхнего уровня, могут быть субкластерами (кластерами нижнего уровня), которые в свою очередь могут иметь собственные субкластеры с соответствующими ГКУ. Субкластеры будут представлять собой внутрикластерную связность отдельного ГКУ и при этом иметь свою меж- и внутрикластерную связности [4].

Таким образом, установлено, что протоколы маршрутизации играют значительную роль в функционировании ЦРРСПД объединения ВКС. Благодаря этим протоколам осуществляются самоорганизация сети и организация информационных потоков оптимальными маршрутами [5].

Многоинтервальная иерархическая модель является для ЦРРСПД наиболее эффективной, так как при обслуживании трафика доставка данных в ЦРРСПД производится по некоторым маршрутам, которые выбираются используемым протоколом сетевого уровня, реализующим тот или иной метод выбора маршрутов. Данная модель связности, в отличие от одноинтервальных моделей, предоставляет возможности развертывания ЦРРСПД объединения ВКС в удаленных широкомасштабных областях, что говорит о высокой масштабируемости сети.

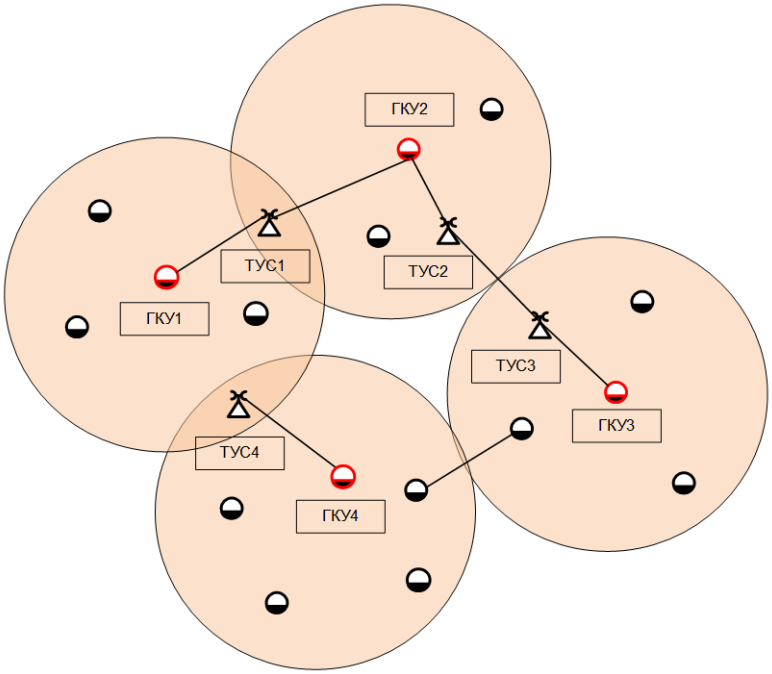


Рис. 2. Реализация трехинтервальной радиорелейной связи ЦРРСПД с помощью транзитного узла связи

Учитывая, что ЦРРСПД объединения ВКС является частью сети общего пользования и по ее каналам должна обеспечиваться связь, как правило, с большинством объединений, соединений и частей, расположенных во всей полосе оперативного построения войск, разветвленность является важнейшим свойством сети. Качество сети по данному свойству характеризуется возможностью доступа УС центра управления, командного пункта (КП), пункта управления (ПУ) подразделений и частей объединения ВКС к каналам ЦРРСПД объединения ВКС [6]. Расчет разветвленности ЦРРСПД объединения ВКС $S_{Р\ ЦРРС}$ осуществляется с использованием особого показателя – коэффициента доступности C_N.

C_N обусловливается допустимой дальностью действия имеющихся на УС ЦРРСПД объединения ВКС и ОУС, средств привязки. Коэффициент доступности рассчитывается по формуле

$$C_N = \frac{N_{УС\ Д}}{N_{УС\ ОБЩ}},$$

где $N_{УС\ Д}$ – количество УС, имеющих доступ к ЦРРСПД; $N_{УС\ \ ОБЩ}$ – общее количество УС, развернутых в полосе боевых действий.

Решение задачи обеспечения разветвленности ЦРРСПД объединения ВКС в общем виде реализуется с учетом сформированной основы ЦРРСПД с помощью методики нейросетевой кластеризации УС ЦРРСПД и осуществляется в два этапа: расчета внутрикластерной разветвленности и расчета межкластерной разветвленности [7, 8, 9].

На обоих этапах расчета кластерной разветвленности необходимо выполнить ряд процедур. В соответствии с матрицей информационной связанности и потребностями вторичных сетей формируем матрицу направлений связи, на которых

необходимо выделение каналов ЦРРСПД объединения ВКС. Исходя из наличия средств привязки в войсках связи объединения ВКС, рассчитываются и строятся зоны доступа УС ЦРРСПД. При построении ЦРРСПД зоны доступа могут составлять радиусы до 50 км (дальность связи радиорелейных станций согласно тактико-техническим характеристикам), так как используются радиорелейные средства.

Производится оценка ЦРРСПД по доступности УС ЦРРСПД путем расчета разветвленности. Если выполняется условие $S_{Р\,ЦРРС} \geq S^{ТР}_{Р\,ЦРРС}$, то определяется количество УС ЦРРСПД; если не выполняется данное условие, то осуществляется наращивание дополнительными полевыми узлами связи до выполнения данного условия [10].

Выбор рациональной привязки происходит по критерию минимальной суммарной протяженности линий между УС ПУ объединения ВКС и УС КП (ПУ) (УС Единой сети электросвязи РФ), который находим по следующей процедуре:

1. Составляем матрицу ρ, в которой столбцы соответствуют выбранным УС ЦРРСПД, строки главного кластерного УС (ГКУС) ЦРРСПД объединения ВКС, элементы протяженности линий привязки:

$$\rho = \left| a_{ij} \right|, i = \overline{1, N};\ j = \overline{1, M},$$

где ρ – матрица расстояний между всеми УС ЦРРСПД объединения ВКС и ГКУС ЦРРСПД; a – расстояние между i-м УС ЦРРСПД объединения ВКС и j-м ГКУС ЦРРСПД; N – количество УС ЦРРСПД объединения ВКС; M – количество ГКУС ЦРРСПД объединения ВКС.

2. Устанавливаем суммарное расстояние между всеми УС ЦРРСПД объединения ВКС и ГКУС ЦРРСПД:

$$Q_j = \sum_{i=1}^{N} a_{ij}, \forall\ j = \overline{1, M},$$

3. Анализируем все Q по критерию минимальной протяженности линий привязки и выбираем такой УС ЦРРСПД, для которого выполняется условие

$$Q_k^* = \min_j Q_j, \forall\ j = \overline{1, M},$$

где Q_k^* – минимальная протяженность k-й линии привязки.

4. Вычисляем суммарную протяженность линий привязки для всех выбранных УС ЦРРСПД:

$$Q_\Sigma^* = \sum_{k=1}^{N} Q_k^*. \tag{5}$$

Совокупность выбранных УС ЦРРСПД и ГКУС ЦРРСПД объединения ВКС составляют узловую основу ЦРРСПД. После определения узловой основы разрабатывается сетка линий связи между УС ЦРРСПД объединения ВКС и тем самым решается задача связности сети.

Реализация рассмотренных направлений, определяющих построение ЦРРСПД объединения ВКС, позволит значительно расширить возможности сети связи

объединения ВКС по устойчивости, что особенно актуально на современном этапе развития военных телекоммуникационных сетей [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика позволяет на основе базового варианта кластерной основы ЦРРСПД объединения ВКС произвести расчет разветвленности ЦРРС, что в свою очередь позволит значительно расширить возможности ЦРРСПД объединения ВКС по устойчивости. Новизна методики заключается в том, что расчет разветвленности ЦРРСПД объединения ВКС производится в два этапа: расчета внутрикластерной разветвленности сформированных кластеров и расчета межкластерной разветвленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Younis O., Krunz M., Ramasubramanian S. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges // *IEEE network*. 2006. V. 20. №. 3. P. 20–25.
2. Salami A.F., Anwar F., Priantoro A.U. An investigation into clustering routing protocols for wireless sensor networks // *Sensors & Transducers Journal*. 2009. V. 106. №. 7. P. 48–61.
3. Чубукова И.А. Data Mining. М.: Интернет-Университет Информационных Технологий: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 383 с. URL: http://biblioclub.ru /index.php?page=book&id=233055 (дата обращения: 21.06.2020).
4. Ланчев В.М., Михайлов С.Е., Демидов А.В. Один из подходов к разработке метода построения цифровой радиорелейной сети объединения ВКС в общей системе ПВО стран СНГ // *Сборник статей IV МВНК ВА ВКО*, 2019.
5. Ермишян А.Г. Теоретические основы построения систем военной связи в объединениях и соединениях. Ч. 1. Методологические основы построения организационно-технических систем военной связи: учебник. СПб: Военная академия связи, 2005. 740 с.
6. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильямс, 2001. 287 с.
7. Кальченко Д.И. Нейронные сети: на пороге будущего // *КомпьютерПресс*. 2005. Т. 1. С. 86–90.
8. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2008. 655 с.
9. Воронцов К.В. Лекции по искусственным нейронным сетям. М.: Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН, 2014.
10. Дистель Р. Теория графов. Новосибирск: Институт математики, 2002. 336 с.

Для цитирования: Михайлов С.Е. Методика расчета разветвленности цифровой радиорелейной сети передачи данных объединения ВКС // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 66–72.

METHODOLOGY OF CALCULATING OF THE RAMIFICATION OF THE DIGITAL RADIO RELAY DATA TRANSMISSION NETWORK OF THE AEROSPACE FORCES ASSOCIATION

S.E. MIKHAILOV, Adjunct

Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov, 50, Zhigareva st., 170003, Tver, Russian Federation,
e-mail: krot-baraban@yandex.ru

The article considers a methodology for increasing the stability of a digital data transmission network, which will take into account connectivity when changing its structure, due to rational clustering of communication centers using neural networks.

Keywords: control system, communication system, radio relay network, neural network, clustering of communication centers.

REFERENCES

1. Younis O., Krunz M., Ramasubramanian S. Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges. *IEEE network*. 2006. V. 20. No. 3, pp. 20–25.

2. Salami A.F., Anwar F., Priantoro A.U. An investigation into clustering routing protocols for wireless sensor networks. *Sensors & Transducers Journal*. 2009. V. 106. No. 7, pp. 48–61.

3. Chubukova I.A. Data mining. Moscow: Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologiy: Binom. Laboratoriya znaniy, 2008. 383 p. URL: http://biblioclub.ru /index.php?page=book&id=233055 (accessed: 21.06.2020).

4. Lancev V.M., Mikhailov S.E., Demidov A.V. One of the approaches to the development of a method for constructing a digital radio-relay network for combining an aerospace network in a common air defense system of CIS countries. *Sbornik statey IV MVNK VA VKO,* 2019. (In Russian).

5. Ermishyan A.G. The theoretical foundations of building military communications systems in associations and formations. Textbook. Part 1. Methodological foundations for the construction of organizational and technical systems of military communications. St. Petersburg: Voyennaya akademiya svyazi. 2005. 740 p.

6. Callan R. Osnovnyye kontseptsii neyronnykh setey [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Vilyams, 2001. 287 p.

7. Kalchenko D.I. Neural networks: on the verge of the future. *ComputerPress*. 2005. V. 1. pp. 86–90. (In Russian).

8. Kohonen T. Samoorganizuyushchiyesya karty [Self-organizing cards]. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy, 2008. 655 p.

9. Vorontsov K.V. Lektsii po iskusstvennym neyronnym setyam [Lectures on artificial neural networks]. Moscow: Vychislitelnyy tsentr im. A.A. Dorodnitsyna RAN, 2014.

10. Distel R. Teoriya grafov [Graph Theory]. Novosibirsk: Institut matematiki, 2002. 336 p.

Поступила в редакцию/received: 11.06.2020; после рецензирования/revised: 09.07.2020; принята/accepted 03.08.2020

УДК 004.052

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

М.А. АЛЛЯМШИН, П.М. МУРАШЕВ, В.Н. БОГАТИКОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vnbgtk@mail.ru

Рассматривается нечеткая модель системы управления технологией хлебобулочных изделий как один из инструментов, используемый в экспертной системе для принятия решений. На основе выбранных параметров производятся оценка технологического процесса производства хлебобулочных изделий в малой пекарне и сравнение результатов экспериментов и работы нечеткой модели управления.

Ключевые слова: система контроля качества, технологический процесс, хлебобулочное изделие, случайные возмущения, математическое ожидание, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, декомпозиция, контекстная диаграмма, нечеткие правила.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-73-88

ВВЕДЕНИЕ

Хлебобулочные изделия входят в индивидуальный рацион питания человека, удовлетворяют его потребность в получении пищевых веществ: белков, жиров углеводов.

Для повышения качества работы системы управления технологией хлебобулочных изделий в работе рассматривается подход, основанный на применении экспертных систем [1, 2]. В настоящее время интеллектуализация систем управления является одним из основных инструментов, который позволяет решить проблемы управления в условиях неопределенности [3, 4].

Экспертиза – это система контроля качества сырья или продукции. Для организации эффективной работы системы контроля и управления на основе экспертных систем производства хлебобулочных изделий разрабатывается системная модель процесса [5]. Экспертиза в данном случае необходима для улучшения оценки качества готовой продукции через совершенствование системы контроля и выдачи рекомендаций по управлению технологией ведения процесса [4].

Характерные особенности промышленных технологий производства хлебобулочных изделий – наличие случайных возмущений, вызванных отклонениями по компонентному составу или нарушениями технологических параметров, сбоев в системах управления, поломка оборудования [6–9].

Цель работы – совершенствование контроля качества технологических процессов производства хлебобулочных изделий.

Задачи исследования:

1. На основании проведенного анализа современных подходов в принятии решений при управлении сложным динамическим объектом в условиях неопределенности, разработать функциональную структуру и правила принятия решений.

2. Обосновать целесообразность применения нечетко-логических моделей для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности процессов принятия решений и разработать нечеткую модель технологического процесса.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Общая аппаратурно-технологическая схема поточного производства хлеба на современном комплексно-механизированном хлебозаводе приведена на рис. 1. Она дает представление о последовательности отдельных стадий и рабочих операций процесса производства хлеба и о видах оборудования, которая охватывает весь цикл этапов и операций – от приема сырья хлебозаводом до отправки готовой продукции в торговую сеть [10]. Технологическая линия включает в себя бункерный тестоприготовительный агрегат 1. Управление работой тестомесильных машин 2, дозаторов муки 4, воды 3, раствора соли 6 и опары 11, смесителя 10 и насоса 9 для подачи воды на замес теста автоматизировано и ведется по заданной по времени программе с помощью командных приборов, установленных на центральном пульте 5. Механическая укладка кусков теста в формы 7 при помощи делительно-посадочного автомата и выгрузка готовых изделий на ленточный транспортер 8 исключают на этих участках ручные операции [11].

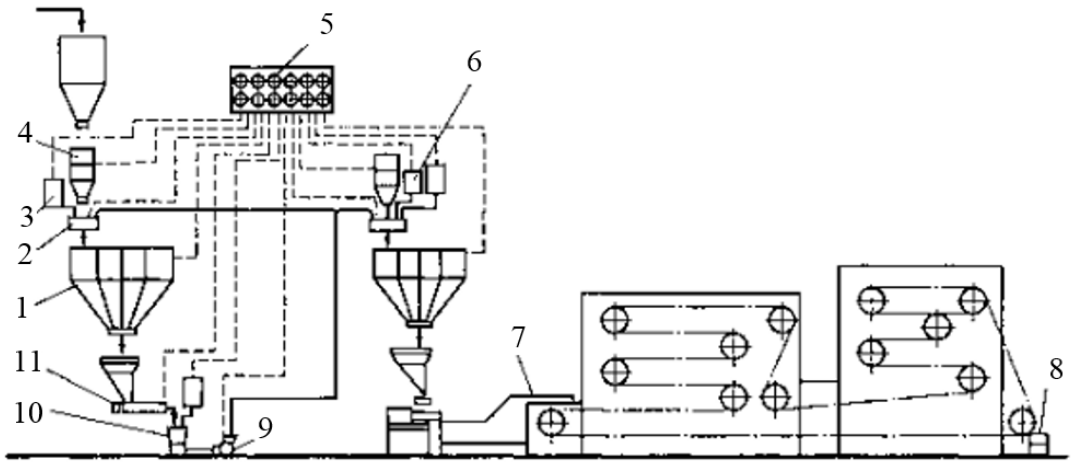


Рис. 1. Схема технологической линии для производства хлебобулочных изделий в малой пекарне [11]

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Экструзивную обработку смеси на производстве осуществляют на одношнековом экструдере.

Результаты статистического исследования динамических режимов действующих агрегатов приведены на рис. 2 [9, 12]. Анализ рис. 2 выявил, что реально действующий агрегат находится под постоянным влиянием достаточно большого числа внешних возмущений, что приводит к «плаванию» технологических переменных в довольно широких пределах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наличие неопределенности параметров технологического процесса производства хлебобулочных изделий в малой пекарне [5, 13] объясняется отсутствием или неполнотой знаний о физико-химических параметрах процесса, широким спектром возмущающих воздействий и сложным характером их влияния [14, 15]. Для эффективного функционирования системы управления процессом производства

хлебобулочных изделий в малой пекарне необходимо разработать математические модели, методы и алгоритмы оценки состояний процесса, методы и алгоритмы принятия решений в целях обеспечения эффективной работы в различных производственно-технологических ситуациях [1, 16].

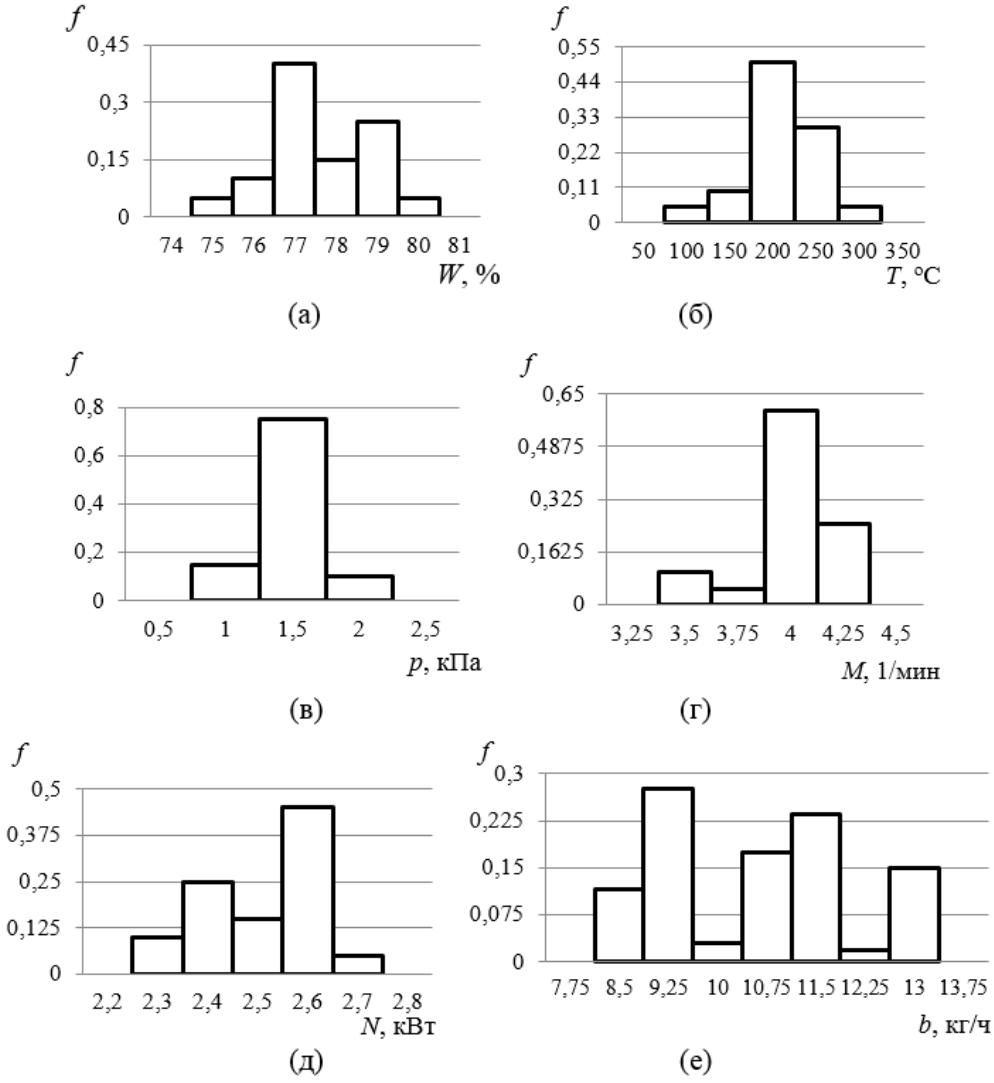


Рис. 2. Результаты статистического исследования входного участка пекарской камеры влажности W (а), температуры T (б), давления p (в), числа оборотов вращения M (г), потребляемой мощности N (д), расхода топлива b (е); f – частота попадания параметра в заданный интервал

В работе для идентификации состояний и управления процессом предлагается использовать методы нечетко-логического моделирования [9, 17]. При этом необходимо:

обосновать применения нечетко-логических моделей для оценки состояний объекта управления в условиях неопределенности процессом принятия решений и разработать соответствующую модель;

проверить адекватность разработанной модели;

разработать функциональную структуру и решающие правила принятия решений, используя результаты проведенного анализа современных подходов в принятии решений при управлении сложным динамическим объектом в условиях неопределенности [18, 19].

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В МАЛОЙ ПЕКАРНЕ

Состояние процесса управления будем оценивать шестью технологическими параметрами: X = {W, T, p, M, N, b}, где W – влажность технологического процесса печи, %; T – температура технологического процесса печи, ^{o}C; p – давление технологического процесса печи, кПа; M – число оборотов вращения технологического процесса печи, 1/мин; N – мощность технологического процесса печи, кВт; b – расход топлива технологического процесса печи, кг/ч;

Для оценки состояния процесса введем лингвистические переменные, определим их терм-множества и зададим функции принадлежности каждому терм-множеству лингвистической переменной [20]. Формализация данных лингвистических переменных представлена в табл. 1–6.

Таблица 1. Формализация лингвистической переменной «Влажность технологического процесса печи»

Область регламентного состояния W	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[75; 80]	Низкое	[75; 77,5]	1, при 75<W<76 1 / (1 + exp(15 * (W – 76,75))) при 76 < W < 77,5
	Среднее	[76; 79]	1 / (1 + exp(–15 * (W – 76,75))) при 76 < W< 77,5 1 / (1 + exp(15 * (W – 77,75))) при 77,5 < W < 79
	Высокое	[77,5; 80]	1 / (1 + exp(–15 * (W – 77,75))) при 77,5 < W < 79 1 при 79 < W < 80

Таблица 2. Формализация лингвистической переменной «Температура технологического процесса печи»

Область регламентного состояния T	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[100; 300]	Низкое	[100; 200]	1 при 100 < T < 150 1 / (1 + exp(–2 * (T – 125))) при 150 < T < 200
	Среднее	[150; 250]	1 / (1 + exp(2 * (T – 125))) при 150 < T < 200 1 / (1 + exp(2 * (T – 225))) при 200 < T < 250
	Высокое	[200; 300]	1 / (1 + exp(–2 * (T – 225))) при 200 < T < 250 1 при 250 < T < 300

Таблица 3. Формализация лингвистической переменной
«Давление технологического процесса печи»

Область регламентного состояния p	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[1; 2]	Низкое	[1; 1,5]	1 при $1 < p < 1{,}25$ $1 / (1 + \exp(70*(p - 1{,}125)))$ при $1{,}25 < p < 1{,}5$
	Среднее	[1,25; 1,75]	$1 / (1 + \exp(-70 * (p - 1{,}125)))$ при $1{,}25 < p < 1{,}5$ $1 / (1 + \exp(70 * (p - 1{,}875)))$ при $1{,}5 < p < 1{,}75$
	Высокое	[1,5; 2]	$1 / (1 + \exp(-70 * (p - 1{,}875)))$ при $1{,}5 < p < 1{,}75$ 1 при $1{,}75 < p < 2$

Таблица 4. Формализация лингвистической переменной
«Число оборотов вращения технологического процесса печи»

Область регламентного состояния M	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[3,5; 5]	Низкое	[3,5; 4,25]	1 при $3{,}5 < M < 3{,}875$ $1 / (1 + \exp(25 * (M - 3{,}6875)))$ при $3{,}875 < M < 4{,}25$
	Среднее	[3,875; 4,625]	$1 / (1 + \exp(-25 * (M - 3{,}6875)))$ при $3{,}875 < M < 4{,}25$ $1 / (1+\exp(25 * (M - 4{,}8125)))$ при $4{,}25 < M < 4{,}625$
	Высокое	[4,25; 5]	$1 / (1 + \exp(-25 * (M - 4{,}8125)))$ при $4{,}25 < M < 4{,}625$ 1 при $4{,}625 < M < 5$

Таблица 5. Формализация лингвистической переменной
«Потребляемая мощность технологического процесса печи»

Область регламентного состояния N	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[23; 27]	Низкое	[23; 25]	1 при $23 < N < 24$ $1 / (1 + \exp(20 * (N - 24{,}5)))$ при $24 < N < 25$
	Среднее	[24; 26]	$1 / (1 + \exp(-20 * (N - 24{,}5)))$ при $24 < N < 25$ $1 / (1 + \exp(20 * (N - 25{,}5)))$ при $25 < N < 26$
	Высокое	[25; 27]	$1 / (1 + \exp(-20 * (N - 25{,}5)))$ при $25 < N < 26$ 1 при $26 < N < 27$

Таблица 6. Формализация лингвистической переменной
«Расход топлива технологического процесса печи»

Область регламентного состояния b	Терм-множество	Область определения терм-множества	Функция принадлежности терм-множества
[8,5; 13]	Низкое	[8,5; 10,75]	1 при $8,5 < b < 9,25$ $1 / (1 + \exp(10 * (b–10)))$ при $9,25 < b < 10,75$
	Среднее	[9,25; 12,25]	$1 / (1 + \exp(–10 * (b–10)))$ при $9,25 < b < 10,75$ $1 / (1 + \exp(10 * (b – 11,5)))$ при $10,75 < b < 12,25$
	Высокое	[10,75; 13]	$1 / (1 + \exp(–10 * (b – 11,5)))$ при $10,75 < b < 12,75$ 1 при $12,25 < b < 13$

По табл. 7–12, составленным на основе знаний экспертов, делается нечеткий логический вывод. Таким образом, определяется значение нечеткой переменной; приведение к четкости проводится центроидным методом. Полученная в результате максимальная удельная производительность и является центром технологической безопасности по данному параметру.

Таблица 7. Решающая таблица нечеткого логического вывода
нечеткой переменной влажности

Параметр	Значение		
	$N1$	$N2$	$N3$
$T1$	Низкое	Низкое	Среднее
$T2$	Среднее	Высокое	Среднее
$T3$	Среднее	Низкое	Низкое

Примечание: $T1$ – влажность; $T2$ – температура; $T3$ – масса; $N1$, $N2$, $N3$ – легкий средний, тяжелый вес соответственно.

Делаем, согласно табл. 7, нечеткий логический вывод:

1. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги.

2. Если «температура хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно либо добавить количество влаги, либо убавить газ в хлебопекарной печи.

3. Если «масса хлебобулочного изделия имеет легкую массу» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить или убавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги. Если «температура хлебобулочного изделия имеет

среднюю массу» – «высокое», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить газ в хлебопекарной печи.

5. Если «масса хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

6. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет тяжелую массу» – «среднее», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить количество влаги или убавить газ в хлебопекарной печи.

7. Если «температура хлебобулочного изделия имеет тяжелую массу» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить газ в хлебопекарной печи.

8. Если «масса хлебобулочного изделия имеет среднюю массу» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

Таблица 8. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной температуры

Параметр	Значение		
	*N*1	*N*2	*N*3
*T*1	Среднее	Среднее	Высокое
*T*2	Высокое	Среднее	Низкое
*T*3	Низкое	Среднее	Среднее

Примечание: *T*1 – масса; *T*2 – температура; *T*3 – давление; *N*1 – сухой; *N*2 – влажный; *N*3 – насыщенный.

Делаем, согласно табл. 8, нечеткий логический вывод:

1. Если «масса хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление или уменьшить температуру.

2. Если «температура хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «высокое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление либо убавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

3. Если «давление хлебобулочного изделия имеет сухую консистенцию» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру в печи или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «масса хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить или уменьшить давление в зависимости от массы изделия.

5. Если «температура хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно нужно понизить давление либо добавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

6. Если «температура хлебобулочного изделия имеет влажную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка температуры на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру и повысить давление в печи.

7. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «высокое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление или повысить температуру.

8. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление либо убавить температуру в хлебопекарной печи.

9. Если «давление хлебобулочного изделия имеет насыщенную консистенцию» – «среднее», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить температуру в печи или уменьшить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

Таблица 9. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной давления

Параметр	Значение		
	*N*1	*N*2	*N*3
*T*1	Низкое	Высокое	Низкое
*T*2	Низкое	Среднее	Низкое
*T*3	Высокое	Низкое	Высокое

Примечание: *T*1 – влажность; *T*2 – давление; *T*3 – масса; *N*1 – прохладная; *N*2 – теплая; *N*3 – горячая.

Делаем, согласно табл. 9, нечеткий логический вывод:

1. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление или повысить температуру печи.

2. Если «давление хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «низкое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно добавить температуру или убавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

3. Если «масса хлебобулочного изделия имеет прохладную выпечку» – «высокое», тогда «оценка влажности на технологическом процессе», следовательно, нужно убавить температуру в печи или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

4. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «высокое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить температуру в печи или уменьшить вес в зависимости от массы изделия.

5. Если «давление хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «среднее», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить давление либо добавить рецептуру в зависимости от массы изделия.

6. Если «масса хлебобулочного изделия имеет теплую выпечку» – «низкое», тогда «оценка давления на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить температуру и понизить давление в печи.

7. Если «влажность хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно понизить количество давления и температуру.

8. Если «давление хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «низкое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление или добавить вес в зависимости от рецептуры хлебобулочного изделия.

9. Если «масса хлебобулочного изделия имеет горячую выпечку» – «высокое», тогда «оценка массы на технологическом процессе», следовательно, нужно повысить давление и температуру в печи.

Таблица 10. Решающая таблица нечеткого логического вывода нечеткой переменной число оборотов вращений

Параметр	Значение		
	$N1$	$N2$	$N3$
$T1$	Высокое	Низкое	Высокое
$T2$	Высокое	Среднее	Высокое
$T3$	Низкое	Высокое	Низкое

Примечание: $T1$ – мощность; $T2$ – время; $T3$ – скорость; $N1$ – двигатель работает медленно; $N2$ – двигатель работает ускоренно; $N3$ – двигатель работает быстро.

Делаем, согласно табл. 10, нечеткий логический вывод:

1. Если «мощность хлебопекарной печи двигатель работает медленно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно понизить скорость вращения двигателя.

2. Если «время хлебопекарной печи двигатель работает медленно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить электроэнергию в печи.

3. Если «скорость хлебопекарной печи работает медленно» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно уменьшить время приготовления хлебобулочного изделия.

4. Если «мощность хлебопекарной печи работает ускоренно» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить скорость вращения двигателя.

5. Если «время хлебопекарной печи работает ускоренно» – «среднее», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно понизить электроэнергию в печи.

6. Если «скорость хлебопекарной печи работает ускоренно» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить время приготовления хлебобулочного изделия.

7. Если «мощность хлебопекарной печи работает быстро» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно увеличить время приготовления изделия.

8. Если «время хлебопекарной печи работает быстро» – «высокое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить скорость вращения двигателя.

9. Если «скорость хлебопекарной печи работает быстро» – «низкое», тогда «частота оборотов вращения», следовательно, нужно повысить электроэнергию в печи.

Таблица 11. Решающая таблица нечеткого логического вывода
нечеткой переменной мощности

Параметр	Значение		
	*N*1	*N*2	*N*3
*T*1	Низкое	Среднее	Низкое
*T*2	Среднее	Высокое	Среднее
*T*3	Высокое	Среднее	Высокое

Примечание: *T*1 – напряжение; *T*2 – сила тока; *T*3 – сопротивление; *N*1, *N*2, *N*3 – низкая, средняя, высокая потребляемая мощность соответственно.

Делаем, согласно табл. 11, нечеткий логический вывод:

1. Если «напряжение хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «низкое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить силу тока в цепи.
2. Если «сила тока хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить напряжение или понизить силу тока в цепи.
3. Если «сопротивление хлебопекарной печи – низкая потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение и силу тока в цепи.
4. Если «напряжение хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить скорость вращения двигателя.
5. Если «сила тока хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить электроэнергию в печи.
6. Если «сопротивление хлебопекарной печи – средняя потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно повысить силу тока в цепи или понизить напряжение.
7. Если «напряжение печи – высокая потребляемая мощность» – «низкое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить силу тока в цепи.
8. Если «сила тока хлебопекарной печи – высокая потребляемая мощность» – «среднее», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение или повысить силу тока в цепи.
9. Если «сопротивление хлебопекарной печи – высокая потребляемая мощность» – «высокое», тогда «электропотребление», следовательно, нужно понизить напряжение.

Таблица 12. Решающая таблица нечеткого логического вывода
нечеткой переменной расхода топлива

Параметр	Значение		
	*N*1	*N*2	*N*3
*T*1	Высокое	Среднее	Высокое
*T*2	Среднее	Низкое	Среднее
*T*3	Низкое	Среднее	Низкое

Примечание: *T*1 – количество теплоты; *T*2 – объем; *T*3 – производительность; *N*1 – медленно; *N*2 – средне; *N*3 – быстро.

Делаем, согласно табл. 12, нечеткий логический вывод:

1. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется медленно» – «высокое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расхода объема топлива и производительность хлебобулочного изделия.

2. Если «объем хлебопекарной печи расходует медленно» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты в печи или понизить производительность хлебобулочного изделия.

3. Если «производительность хлебопекарной печи расходуется медленно» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты и понизить объем расход топлива в печи.

4. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется средне» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расход объема топлива и производительность хлебобулочного изделия.

5. Если «объем хлебопекарной печи расходуется средне» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить производительность хлебобулочного изделия или понизить количество теплоты в печи.

6. Если «производительность хлебопекарной печи расходуется средне» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно понизить количество теплоты и повысить объем расход топлива в печи.

7. Если «количества теплоты хлебопекарной печи расходуется быстро» – «высокое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно уменьшить расход объема топлива или производительность хлебобулочного изделия.

8. Если «объем хлебопекарной печи расходуется быстро» – «среднее», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты или расход объема топлива.

9. Если «производительность хлебопекарной печи расходуется быстро» – «низкое», тогда «потребление расхода топлива», следовательно, нужно повысить количество теплоты или понизить объем расход топлива в печи.

Структура экспертной системы на основе нечеткой модели процесса выпечки представлена на рис. 3.

Рис. 3. Блок-схема определения системы управления процессом производства хлебобулочных изделий в малой пекарне

ВЫВОДЫ

Для улучшения показателей качества управления современными технологическими процессами довольно часто необходимы разработка и реализация систем автоматического регулирования, построенных на базе нетиповых законов

регулирования. В ряде случаев на каком-либо из уровней регулирования целесообразно использование регулятора с предсказанием или нечетких регуляторов.

Сравнение результатов экспериментов и результатов работы нечеткой модели управления позволяет сделать вывод, что предлагаемая модель химико-технологических процессов адекватна технологическому процессу (рис. 4).

Результаты исследования:

1. Исходная система: влажность хлебопекарной печи → M(X) = 77; D(x) = 1,2 [13].

2. Модельные расчеты: влажность хлебопекарной печи → M(X) = 78; D(X) = 0,7 [13].

3. Исходная система: температуры хлебопекарной печи → M(X) = 190; D(X) = 57 [13].

4. Модельные расчеты: температуры хлебопекарной печи → M(X) = 205; D(X) = 27 [13].

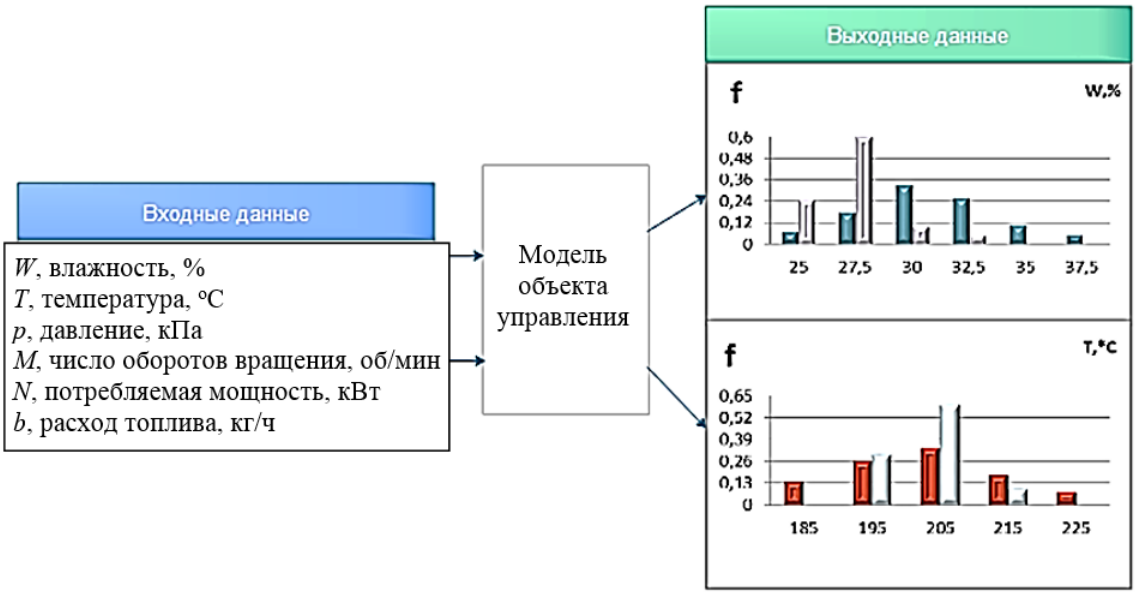


Рис. 4. Проверка нечеткой модели на адекватность:
результаты с реального объекта (– влажность; – температура)
и результаты, полученные с помощью модели (– влажность; – температура)

Основное заключение: нечеткая модель работы процесса может быть применена в экспертной системе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-07-00914

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасова Э.И., Егорычева А.А. Управление качеством хлебобулочных изделий на основе процессного подхода // *Наука без границ*. 2019. № 12 (40). С. 66–70.

2. Ogu E.C., Adekunle Y.A. Basic concepts of expert system shells and an efficient model for knowledge acquisition // *International Journal of Science and Research*. 2013. V. 2. №. 4. P. 554–559.

3. Coffey K., Smith R., Maglaras L., Janicke H. Vulnerability analysis of network scanning on SCADA systems // *Security and Communication Networks*. 2018. V. 2018. 21 p.

4. Балыхин М.Г., Благовещенский И.Г., Борзов А.Б. Архитектура и основная концепция создания интеллектуальной экспертной системы контроля качества пищевой продукции // *Пищевая промышленность*. 2017. №. 11. С. 60–63.

5. Dulova E.V., Kiseleva M.Y., Nasyrova Y.G., Kuzmina S., Prazdnichkova N. Quality and consumer properties of bread baked from mixture of rye and wheat flour using iodine-containing additives // *BIO Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2020. V. 17. P. 45.

6. Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. Интеллектуализация проектирования и мониторинга технологического процесса на основе применения SCADA-системы // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2011. Т. 3. №. 2 (58). С. 241–244.

7. Патент РФ 2527298. *Состав для производства хлебобулочных изделий из смеси ржаной и пшеничной муки* / Березина Н.А., Жданова О.В. Заявл. 03.09.2012. Опубл. 28.08.2014, Бюл. № 24.

8. Bread fermentation methods. URL: https://www.hengel.com/en/bread-fermentation-methods.html. (дата обращения: 21.06.2020).

9. Casper H. Statistics Basics - Variance and Standard Deviation // Statistics. URL: https://mlfromscratch.com/statistics-variance-standard-deviation/#/ (дата обращения: 21.06.2020).

10. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства: учебник / под общ. ред. Л.И. Пучковой. СПб.: Профессия, 2005. 416 с.

11. Ant Z. Production lines for bakery production // Technological equipment: bakery and pasta. URL: https://en.baker-group.net/bread-and-bakery-products/technology-manuals/production-lines-for-bakery-production.html (дата обращения: 21.06.2020).

12. Математическая статистика: учеб. пособие / под ред. Т.В. Умергалиной. Уфа: УГНТУ, 2016. 92 с.

13. Патент РФ 2544090. *Способ производства специализированного хлеба геродиетического назначения* / Костюченко М.Н., Работкин Ю.В. Шлеленко Л.А. Тюрина О.Е. Борисова А.Е. Якушин М.А. Заявл. 23.05.2012. Опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7.

14. Патент РФ 2345526. *Устройство для замешивания, медленной ферментации и производства тестовой заготовки* / Луазеле М. Заявл. 27.05.2005. Опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4.

15. Bakery Production Equipment. URL: https://www.readingbakery.com/ resources/bakery-production-equipment.html (дата обращения: 29.06.2020).

16. Патент РФ 2688361. *Устройство для интенсификации охлаждения хлебобулочных изделий* / Кононов А.В., Пахомов В.И., Лобов А.А., Николюк О.И., Давыдов Е.О., Целыковских А.А., Спатлов А.Н., Романчиков С.А. Заявл. 20.09.2018. Опубл. 21.05.2019, Бюл. № 15.

17. Патент РФ 2564881. *Устройство контроля степени расстойки тестовых заготовок при производстве хлебобулочных изделий* / Брязун В.А., Савекин А.В., Жуланов А.А. Аднодворцев М.Ф. Заявл. 04.04.2014. Опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.

18. Патент РФ 73593 на полезную модель. *Технологическая линия для производства хлебобулочных изделий в малой пекарне* / Францева Т. П., Прудникова Т.Н. Заявл. 26.02.2008. Опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15.

19. Kulushtayeva B., Nurymkhan G., Smolnikova F., Okuskhanova E., Kozubayeva L., Abilova M., Kisimov B. Technology of production, nutritional value and food safety of gluten free bread // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. V. 7. №. 6. P. 1338–1344.

20. Zarandi M.H.F., Mohammadhasan N., Bastani S. A fuzzy rule-based expert system for evaluating intellectual capital // *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. V. 2012. 11 p.

Для цитирования: Аллямшин М.А., Мурашев П.М., Богатиков В.Н. Система контроля качества технологического процесса изготовления хлебобулочных изделий на основе нечетко-логических моделей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 73–87.

QUALITY CONTROL SYSTEM FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE BAKERY PRODUCTS MANUFACTURE BASED ON FUZZY LOGIC MODELS

M.A. ALLYAMSHIN, P.M. MURASHEV, V.N. BOGATIKOV, Dr. Sc.,

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, Russian Federation, e-mail: vnbgtk@mail.ru

The paper considers a fuzzy model of a system for the control of bakery products technology, as one of the tools for use in an expert system for making decisions. On the grounds of the selected parameters the technological process of the manufacture of bakery products in a small bakery is evaluated and the results of experiments and the operation of the fuzzy control model are compared.

Keywords: quality control system; technological process; bakery product; random disturbances; expectation; variance; standard deviation; decomposition of context diagram; context diagram; fuzzy rules

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 20-07-00914

REFERENCES

1. Cherkasova E.I., Egorycheva A.A. Quality management of bakery products based on the process approach. *Nauka bez granits*. 2019. No. 12 (40), pp. 66–70. (In Russian).

2. Ogu E.C., Adekunle Y.A. Basic concepts of expert system shells and an efficient model for knowledge acquisition. *International Journal of Science and Research*. 2013. V. 2. No. 4, pp. 554–559.

3. Coffey K., Smith R., Maglaras L., Janicke H. Vulnerability analysis of network scanning on SCADA systems. *Security and Communication Networks*. 2018. V. 2018. 21 p.

4. Balykhin M.G., Blagoveshchensky I.G., Borzov A.B. Architecture and the basic concept of creating an intelligent expert system for controlling the quality of food products // *Pishchevaya promyshlennost*. 2017. No. 11, pp. 60–63. (In Russian).

5. Dulova E.V., Kiseleva M.Y., Nasyrova Y.G., Kuzmina S., Prazdnichkova N. Quality and consumer properties of bread baked from mixture of rye and wheat flour using iodine-containing additives. *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*, 2020. V. 17, pp. 45.

6. Samoilova E.M., Ignatiev A.A. Intellectualization of design and monitoring of the technological process based on the application of the SCADA system. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2011. V. 3. No. 2 (58). pp. 241–244. (In Russian).

7. Patent RF 2527298. *Sostav dlya proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy iz smesi rzhanoy i pshenichnoy muki* [Composition for the production of bakery products from a mixture of rye and wheat flour]. Berezina N.A., Zhdanova O.V. Declared 03.09.2012. Published 28.08.2014, Bulletin No. 24.

8. Bread fermentation methods. URL: https://www.hengel.com/en/bread-fermentation-methods.html (date accessed: 21.06.2020).

9. Casper H. Statistics Basics – Variance and Standard Deviation. *Statistic*s. URL: https://mlfromscratch.com/statistics-variance-standard-deviation/#/ (date accessed: 21.06.2020).

10. Auerman L.Ya. Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva: uchebnik [Bakery Technology: Textbook] / ed. L.I. Puchkova. St. Petersburg: Professiya, 2005. 416 p.

11. Ant Z. Production lines for bakery production // Technological equipment: bakery and pasta. URL: https://en.baker-group.net/bread-and-bakery-products/technology-manuals/production-lines-for-bakery-production.html (date accessed: 21.06.2020).

12. Matematicheskaya statistika: ucheb. posobiye [Mathematical statistics: textbook] under total. ed. T.V. Umergalina. Ufa: USTU, 2016. 92 p.

13. Patent RF 2544090. *Sposob proizvodstva spetsializirovannogo khleba gerodiyeticheskogo naznacheniya* [Method for the production of specialized bread for gerodietetic purposes]. Kostyuchenko MN, Rabotkin Yu.V. Shlelenko L.A. Tyurina O.E. Borisova A.E., Yakushin M.A. Declared 23.05.2012. Published 10.03.2015, Bulletin No. 7.

14. Patent RF 2345526. *Ustroystvo dlya zameshivaniya, medlennoy fermentatsii i proizvodstva testovoy zagotovki* [A device for kneading, slow fermentation and the production of dough pieces]. Loisele M. Declared 27.05.2005. Published 10.02.2009, Bulletin No. 4.

15. Bakery Production Equipment. URL: https://www.readingbakery.com /resources/bakery-production-equipment.html (date accessed: 29.06.2020).

16. Patent RF 2688361. *Ustroystvo dlya intensifikatsii okhlazhdeniya khlebo-bulochnykh izdeliy* [A device for intensifying the cooling of bakery products]. Kononov A.V., Pakhomov V.I., Lobov A.A., Nikolyuk O.I., Davydov E.O., Tselykovskikh A.A., Spatlov A.N., Romanchikov S.A. Declared 20.09.2018. Published 21.05.2019, Bulletin No. 15.

17. Patent RF 2564881. *Ustroystvo kontrolya stepeni rasstoyki testovykh zagotovok pri proizvodstve khlebobulochnykh izdeliy* [Device for controlling the degree of proofing of dough pieces in the production of bakery products]. Bryazun V.A., Savekin A.V., Zhulanov A.A. Adnodvortsev M.F. Declared 04.04.2014. Published 10.10.2015, Bulletin No. 28.

18. Patent RF 73593 for a utility model. *Tekhnologicheskaya liniya dlya proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy v maloy pekarne* [Technological line for the production of bakery products in a small bakery]. Frantseva T.P., Prudnikova T.N. Declared 26.02.2008. Published 27.05.2008, Bulletin No. 15.

19. Kulushtayeva B., Nurymkhan G., Smolnikova F., Okuskhanova E., Kozubayeva L., Abilova M., Kisimov B. Technology of production, nutritional value and food safety of gluten free bread. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. V. 7. No. 6, pp. 1338–1344.

20. Zarandi M.H.F., Mohammadhasan N., Bastani S. A fuzzy rule-based expert system for evaluating intellectual capital. *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. V. 2012. 11 p.

Поступила в редакцию/received: 26.06.2020; после рецензирования/revised: 07.07.2020; принята/accepted 05.08.2020

УДК 658.5.012.7

АЛГОРИТМЫ ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

Представлен подход к диспетчированию работы механообрабатывающих технологических подразделений машиностроительного единичного и мелкосерийного многономенклатурного производства. Даны алгоритмы диспетчирования технологических процессов, основанные на аппарате нечеткого управления. Определены входные и выходные нечеткие переменные, показаны их функции принадлежности, алгоритм управления в виде нечетких правил. Приведен пример реализации этого алгоритма.

Ключевые слова: машиностроительное многономенклатурное производство, диспетчирование, продукционные правила, технологический процесс.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-88-96

ВВЕДЕНИЕ

Машиностроительное производство (как и любое другое) нуждается в планировании. Традиционно применяются три вида планирования: объемное планирование по совокупному выполняемых работ на достаточно большие периоды; календарное планирование – распределение всего объема работ во времени (на срок до недели-десяти дней); оперативное планирование на глубину до десяти дней – распределение станочных работ по рабочим местам с привязкой по времени.

Для осуществления управления технологическими процессами (ТПр) предусматривается обратная связь по времени начала и окончания выполнения операций на рабочих местах технологических подразделений – диспетчирование.

Таким образом, в машиностроительном производстве диспетчирование – это оценка и анализ сроков выполнения ТПр, имеющие целью приведение в соответствие планируемых и фактических времен выполнения операций ТПр.

К сожалению, применяемые в настоящее время автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), применяемые в многономенклатурном машиностроительном производстве (ММП), как правило, предназначены лишь для фиксации графиков выполнения технологических операций в период интервала оперативного планирования (ИОП). Спланированные ранее графики выполнения операций, называемые календарными планами-графиками (КПГ), и являются объектом управления. Однако промышленные АСУТП не имеют в своем составе инструментальных средств, позволяющих управлять дискретными ТПр, поэтому выработкой управляющих действий занимаются цеховые диспетчеры.

Можно отметить, что в ММП действует большое число возмущающих факторов, так как они весьма динамичны по ряду параметров (большому числу заказов, изменению сроков их выполнения и т. д.), что весьма затрудняет принятие решений цеховыми работниками. Поэтому авторами исследования ставилась задача повышения качества принимаемых решений при управлении ТПр.

АЛГОРИТМ ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Принято полагать, что диспетчирование времен выполнения операций целесообразно выполнять при знании точных временных параметров ТПр, которые отражают множество параметров. Однако в единичном и мелкосерийном производстве не предполагается закрепление операций за рабочими местами, а лишь за типом станков в пределах группы. В этом случае выполняется диспетчирование не по рабочим местам, а по группам и типам оборудования с использованием аппарата нечеткого управления [1–4].

Рассматриваемую методику диспетчирования целесообразно применять в следующих случаях:

1) выявление и анализ строгих данных диспетчирования невозможен;

2) общее число типов станков в пределах всех групп не более 40;

3) линейные мастера и диспетчеры имеют квалификацию не ниже средней.

В основу положены разработанные ранее [5, 6] процедуры диспетчирования.

Диспетчирование, как указывалось выше, осуществляется по типам и группам металлорежущего оборудования.

Объект управления – времена начала и окончания операций механической обработки, т. е. КПГ.

Предлагаются следующие входные данные – входные лингвистические переменные:

$\{X_I^1\}$ – множество относительных запаздываний (–) или опережений (+) КПГ по станочным работам по *i*-му типу металлорежущего оборудования от начала ведения диспетчирования – *расхождение КПГ по типу металлорежущего оборудования*;

$\{X_{IJ}^1\}$ – множество относительных запаздываний (–) или опережений (+) КПГ по станочным работам по *i*-му типу *j*-й группы металлорежущего оборудования от начала ведения диспетчирования – *расхождение КПГ по группам металлорежущего оборудования*;

$\{X_I^2\}$ – множество средних относительных запаздываний (–) или опережений (+) КПГ по объемам работ по *i*-му типу металлорежущего оборудования за один интервал оперативного планирования – *скорость изменения расхождения по типу металлорежущего оборудования*;

$\{X_{IJ}^2\}$ – множество средних относительных запаздываний (–) или опережений (+) КПГ по объемам работ по *i*-му типу *j*-й группы металлорежущего оборудования за один интервал оперативного планирования – *скорость изменения расхождения по группе металлорежущего оборудования*;

$\{X_I^3\}$ – множество изменений относительных отступлений от КПГ («–» – наращивание запаздывания (сокращение опережения); «+» – сокращение запаздывания (наращивание опережения)) по *i*-му типу металлорежущего оборудования за текущий интервал оперативного планирования – *относительное изменение по типу металлорежущего оборудования*;

$\{X_{IJ}^3\}$ – множество изменений относительных отступлений от КПГ («–» – наращивание запаздывания (сокращение опережения); «+» – сокращение запаздывания (наращивание опережения)) по *j*-й группе *i*-го типа металлорежущего оборудования текущий интервал оперативного планирования – *относительное изменение по группе металлорежущего оборудования*.

Выходные управляющие воздействия – выходные лингвистические переменные:

$\{Y_I\}$ – множество относительных уменьшений (–) или увеличения планов (+) по объемам станочных работ по *i*-му типу металлорежущего оборудования на последующий выполняемый интервал оперативного планирования – *скорость модификации объемов станочных работ по типу станочного оборудования*;

$\{Y_{IJ}\}$ – множество относительных уменьшений (–) или увеличения планов (+) по объемам станочных работ по *j*-й группе *i*-го типа станков на последующий выполняемый интервал оперативного планирования – *скорость модификации объемов станочных работ по группе станочного оборудования*.

Значения входных переменных:

$$\left\{ X_I^1 \right\} = \left\{ \Delta P_I / (N_I \times \Phi_I) \right\}; \{X_{IJ}^1\} = \left\{ \Delta P_{IJ} / (N_{IJ} \times \Phi_{IJ}) \right\}; \{ X_I^2 \} = \left\{ X_I^1 \right\} / q;$$
$$\{ X_{IJ}^2 \} = \{X_{IJ}^1\} / q; \{ X_I^3 \} \left\{ (\Delta P_I^{Kq} - \Delta P_I^{Hq}) / (N_I \times \Phi_I) \right\};$$
$$\{ X_{IJ}^3 \} = \left\{ (\Delta P_{IJ}^{Kq} - \Delta P_{IJ}^{Hq}) / (N_{IJ} \times \Phi_{IJ}) \right\},$$

где $\Delta P_I, \Delta P_{IJ}$ – запаздывание (–) или более быстрое выполнение (+) КПГ по объемам станочных работ, станко-ч, по *i*-му типу и по *j*-й группе *i*-го типа металлорежущего оборудования с момента осуществления диспетчирования; N_I, N_{ij} – среднее число функционирующих единиц станочного оборудования *i*-го типа и *j*-й группы *i*-го типа с момента осуществления диспетчирования, станко-ч; q – номер настоящего интервала оперативного планирования; Φ_I, Φ_{IJ} – фактические фонд времени работы станочного оборудования *i*-го типа и *j*-й группы от момента выполнения диспетчирования, ч; $\Delta P_I^{Kq}, \Delta P_I^{Hq}$ – запаздывания (–) или более быстрое выполнение (+) КПГ по объемам станочных работ, станко-ч, по группе *i*-го типа металлорежущего оборудования на момент окончания и начала *q*-го интервала оперативного планирования; $\Delta P_{IJ}^{Kq}, \Delta P_{IJ}^{Hq}$ – запаздывания (–) или более быстрое выполнение (+) КПГ по объемам работ, станко-ч, по *j*-й группе *i*-го типа металлорежущих станков на момент окончания и начала *q*-го интервала оперативного планирования.

Скажем несколько слов о размерности введенных переменных.

У переменных $\left\{ X_I^1 \right\}, \{ X_I^3 \}$ и $\{ X_{IJ}^1 \}, \{ X_{IJ}^3 \}$ размерность – [1/единицу станочного оборудования за интервал диспетчирования], у переменных $\{ X_I^2 \}, \{ X_{IJ}^2 \}$, $\{ Y_I \}, \{ Y_{IJ} \}$ – [1/единицу станочного оборудования за один интервал оперативного планирования].

Физический смысл переменных $\left\{ X_I^1 \right\}$ и $\{ X_{IJ}^1 \}$ – запаздывание или более раннее выполнение как часть от фактического фонда времени каждой единицы станочного оборудования *i*-го типа и *j*-й группы *i*-го типа от начала ведения диспетчирования; а переменных $\{ X_I^2 \}, \{ X_{IJ}^2 \}$ – запаздывание или более раннее выполнение как часть от фактического фонда времени каждой единицы станочного оборудования *i*-го типа и *j*-й группы *i*-го типа от начала ведения диспетчирования, отнесенное к одному интервалу оперативного планирования.

Переменные $\{ Y_I \}$ и $\{ Y_{IJ} \}$ – множество уменьшений или увеличений объемов планов, приходящееся на каждую единицу оборудования *i*-го типа и *j*-й группы *i*-го

типа в последующем интервале оперативного планирования, как часть фактического фонда времени за один интервал оперативного планирования.

Входные переменные продукционных правил $X_I^1, X_{IJ}^1, X_I^2, X_{IJ}^2, X_I^3, X_{IJ}^3$ имеют по три терма (*NB,ZR,PB*), выходные переменные Y_I и Y_{IJ} – по пять (*NB, NM, ZR, PM, PB*).

Функции принадлежности входных и выходной переменных, полученные с помощью экспертов, показаны на рис. 1–3.

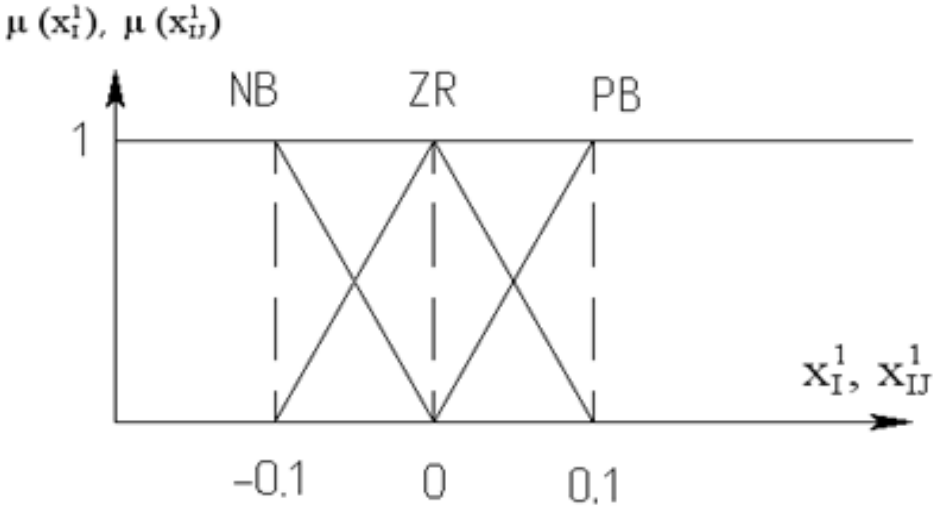


Рис. 1. Функции принадлежности μ входных переменных X_I^1 и X_{IJ}^1

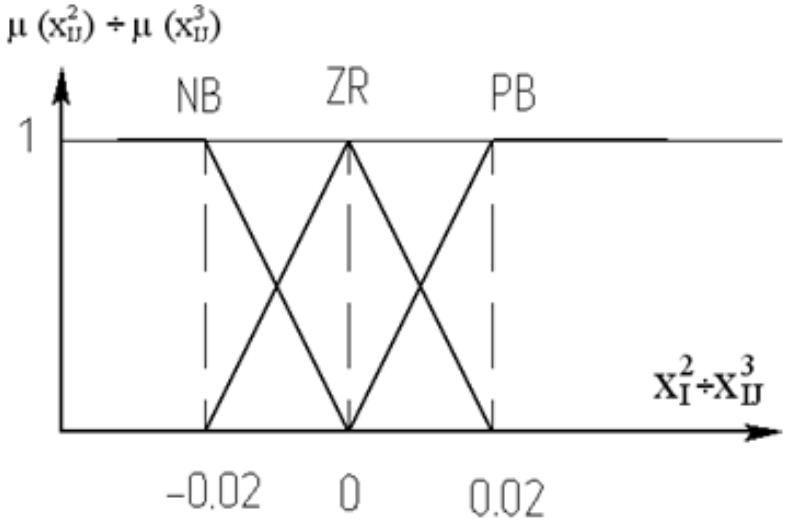


Рис. 2. Функции принадлежности μ входных переменных $X_I^2, X_{IJ}^2, X_I^3, X_{IJ}^3$

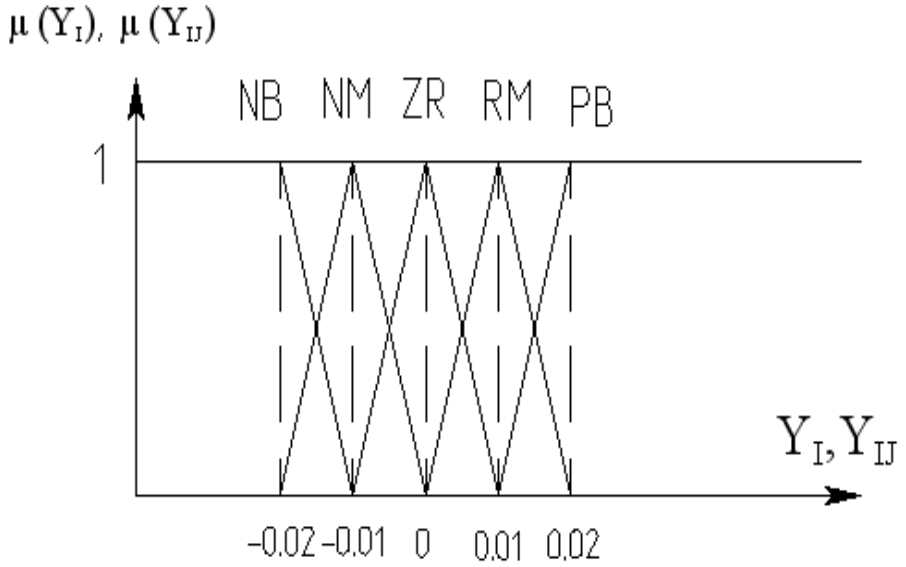


Рис. 3. Функции принадлежности μ выходных переменных Y_I и Y_{IJ}

Если говорить о применении методики в условиях других машиностроительных предприятий, то необходимо отметить, что в этом случае значения функций принадлежности следует уточнить.

В формальной постановке задачи управление ТПр осуществляется по входным параметрам X_I^1, X_I^2, X_I^3 (выход Y_I) и (или) по входным параметрам X_{IJ}^1, X_{IJ}^2, X_{IJ}^3 (выход Y_{IJ}).

Предложена база знаний для управления технологическими процессами, представленная перечисленными ниже нечеткими правилами (индексы *I, J* опущены).

Осуществление различных вариантов действий в производственной системе приводит к запаздыванию либо более раннему выполнению запланированных КПГ по каждому типу и группе станков, а также к увеличению либо уменьшению запаздывания (опережения).

База знаний выглядит следующим образом.

1. Если X^1 = ZR и X^2 = ZR и X^3 = ZR, то Y = ZR или.
2. Если X^1 = ZR и X^2 = ZR и X^3 = NB, то Y = PM или.
3. Если X^1 = ZR и X^2 = ZR и X^3 = PB, то Y = PM или.
4. Если X^1 = ZR и X^2 = PB и X^3 = ZR, то Y = ZR или.
5. Если X^1 = ZR и X^2 = PB и X^3 = PB, то Y = ZR или.
6. Если X^1 = ZR и X^2 = PB и X^3 = NB, то Y = PM или.
7. Если X^1 = ZR и X^2 = NB и X^3 = ZR, то Y = ZR или.
8. Если X^1 = ZR и X^2 = NB и X^3 = PB, то Y = ZR или.
9. Если X^1 = ZR и X^2 = NB и X^3 = NB, то Y = PM или.
10. Если X^1 = PB и X^2 = ZR и X^3 = ZR, то Y = ZR или.
11. Если X^1 = PB и X^2 = ZR и X^3 = NB, то Y = PM или.
12. Если X^1 = PB и X^2 = ZR и X^3= PB, то Y = ZR или.
13. Если X^1 = PB и X^2 = PB, то Y = ZR или.
14. Если X^1 = NB и X^2 = NB, то Y = PB или.
15. Если X^1 = NB и X^2 = ZR и X^3 = ZR, то Y = PB или.
16. Если X^1 = NB и X^2 = ZR и X^3 = NB, то Y = PB или.
17. Если X^1 = NB и X^2 = ZR и X^3 = PB, то Y = PM.

Если выполняются условия 1) $\mu(X^1 = PB) > 0$ и $\mu(X^2 = NB)$ или 2) $\mu(X^1 = NB) > 0$ и $\mu(X^2 = PB) > 0$, то выдается комментарий об ошибке во входных параметрах.

При фази-логической конъюнкции подусловий используется правило минимума, при определении функций совместной принадлежности – правило нечеткой импликации Мамдани, для дефазификации выходного параметра – центроидный метод.

Предполагается задание входной информации в АСУТП линейными мастерами или диспетчерами необходимой квалификации.

Реализуя управляющие воздействия, добиваются введения производственной системы в норму. Сроки введения в расчетные КПГ зависят от возможностей увеличения производственных мощностей по механообработке.

ПРИМЕР ДИСПЕТЧИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Покажем выявление управляющего воздействия на конкретном примере (рис. 4).

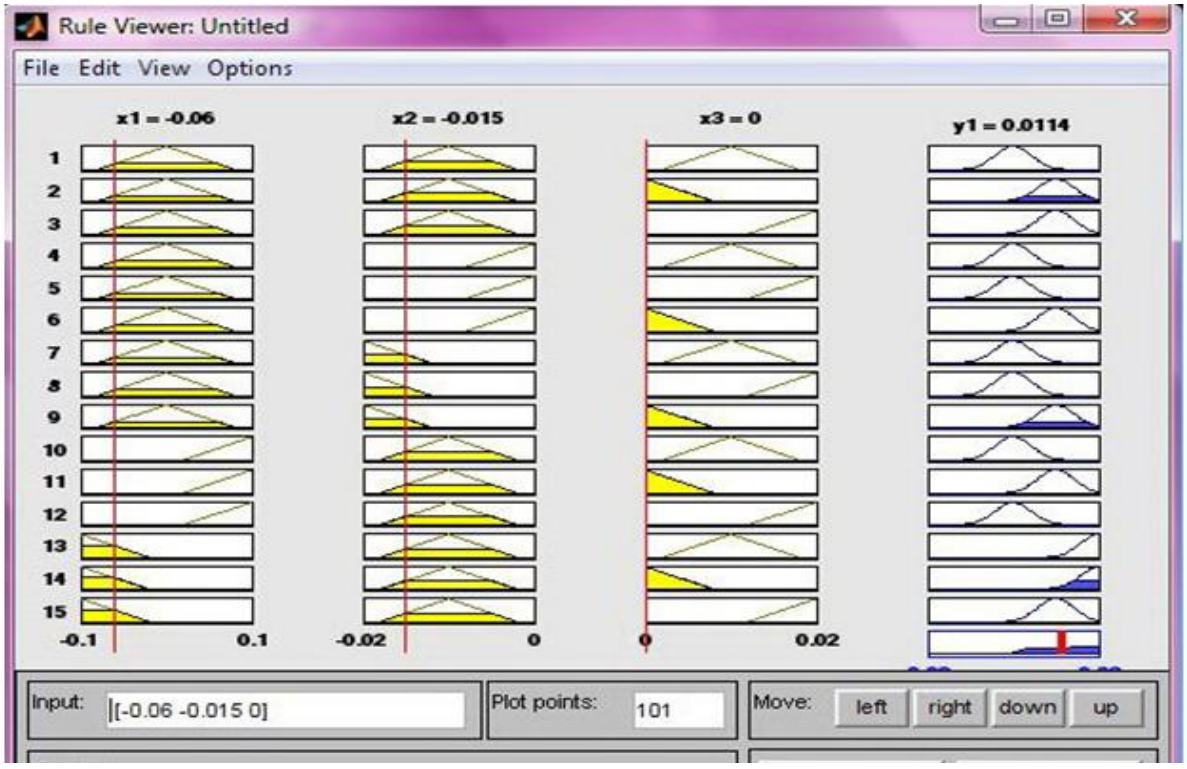


Рис. 4. Реализация в среде MATLAB

По данным выполнения процедур диспетчирования за два ИОП были получены следующие значения входных переменных:

$X_I^1\}: X_1^1 = 0{,}06; X_2^1 = 0{,}02; X_3^1 = 0{,}02$ (три типа станков: токарные, фрезерные, координатно-расточные);

$\{X_{IJ}^1\}: X_{11}^1 = 0{,}04; X_{12}^1 = 0{,}07$ (две группы); $X_{21}^1 = 0{,}017; X_{22}^1 = 0{,}022$ (две группы);

$\{X_I^2\}: X_1^2 = -0{,}015; X_2^2 = 0{,}005; X_3^2 = -0{,}024;$

$\{X_{IJ}^2\}: X_{11}^2 = -0{,}016; X_{12}^2 = -0{,}08; X_{21}^2 = 0{,}007; X_{22}^2 = 0{,}004;$

$\{X_I^3\}: X_1^3 = -0{,}005; X_2^3 = -0{,}01; X_3^3 = -0{,}017;$

$\{X_{IJ}^3\}: X_{11}^3 = -0{,}005; X_{12}^3 = -0{,}005; X_{21}^3 = -0{,}009; X_{22}^3 = -0{,}012.$

В среде MATLAB [5] были сформированы управляющие действия (выходные параметры).

$\{Y_I\}$: Y_1 = 0,0114; Y_2 = 0,00485; Y_3 = 0,00989 – множество относительных увеличений планов по станочным работам по *i*-му типу станочного оборудования за последующий интервал оперативного планирования.

$\{Y_{IJ}\}$: Y_{11} = 0,0121; Y_{12} = 0,0097; Y_{21} = 0,00411; Y_{22} = 0,00543 – множество относительных увеличений объемов станочных работ по *j*-й группе *i*-го типа металлорежущего оборудования за последующий интервал оперативного планирования (см. рис. 4).

Реализация полученных управляющих воздействий привела к сокращению отставания по рассматриваемым типам станков на 28 % за следующий ИОП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика отличается простотой и позволяет управлять загрузкой металлорежущего оборудования по типам и группам.

Управление загрузкой отдельных рабочих мест не предусматривается ввиду того, что в единичном и мелкосерийном производстве оно не реализуется. Это связано с тем, что закрепление операций за рабочими местами на этапе проектирования ТПр не выполняется.

Методика достаточна прозрачна и понятна линейным мастерам средней квалификации, однако в то же время является весьма эффективным рычагом управления производством.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к понятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

2. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.

3. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем: учебное пособие. М.: Финансы и статистика; Инфра-М, 2010. 432 с.

4. Zadeh L.A. Fuzzy probabilities // *Information processing and management*. 1984. V. 3. P. 363–372.

5. Бурдо Г.Б. Принципы построения автоматизированной системы управления технологическими процессами в многономенклатурных производствах // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* 2010. № 3 (48). С. 113–118.

6. Burdo G. Improving the technological preparations for manufacturing production // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. № 1. P. 49–56.

7. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 480 с.

Для цитирования: Бурдо Г.Б. Алгоритмы диспетчирования работы производственных подразделений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 88–95.

DISPATCHING ALGORITHMS FOR THE PRODUCTION UNITS WORK

G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail:gbtms@yandex.ru

Presents the approach to dispatching the work of mechanical processing technological divisions of machine-building single and small-scale multi-product production plants. Algorithms for technological processes dispatching based on the fuzzy control method are shown. Input and output fuzzy variables are defined and their membership functions are shown. The control algorithm is given in the form of fuzzy rules. An example of the algorithm implementation is shown.

Keywords: machine-building multi-nomenclature production, dispatching, production rules, technological process.

REFERENCES

1. Zade L. Ponyatiye lingvisticheskoy peremennoy i yeye primeneniye k ponyatiyu priblizhennykh resheniy [The concept of a linguistic variable and its application to the concept of approximate solutions]. Moscow: Mir, 1976. 165 p.

2. Prikladnyye nechetkiye sistemy [Applied fuzzy systems], under the editorship of T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. Moscow: Mir, 1993. 368 p.

3. Rybina G.V. Osnovy postroyeniya intellektualnykh sistem: uchebnoye posobiye [Fundamentals of building intelligent systems: texbook]. Moscow: Finansy i statistika; Infra-M, 2010. 432 p.

4. Zadeh L.A. Fuzzy probabilities. *Information processing and management*. 1984. V. 3, pp. 363–372.

5. Burdo G.B. The principles of building an automated process control system in multinomenclature production. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2010. No. 3 (48), pp. 113–118. (In Russian).

6. Burdo G. Improving the technological preparations for manufacturing production. *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. No. 1, pp. 49–56.

7. Dyakonov V.P., Kruglov V.V. Matematicheskiye pakety rasshireniya MATLAB: spetsialnyy spravochnik [Mathematical expansion packages MATLAB: special reference]. St. Petersburg: Piter, 2001. 480 p.

Поступила в редакцию/received: 07.05.2020; после рецензирования/revised: 01.07.2020;
принята/accepted 03.08.2020

УДК 004.891.3:544.33

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА ГАЗОВ И ПАРОВ

Л.В. ИЛЯСОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lvi450714@mail.ru

Показана методика оценки решений при проектировании. Приводятся результаты экспериментальных исследований инфракрасного термохимического детектора газов и паров (ИКТХД), принцип действия которого основан на измерении интенсивности инфракрасного излучения, возникающего при каталитическом сгорании горючих газов и паров на поверхности пеллистора. Описывается схема ИКТХД, который содержит измерительную и сравнительную ячейки с размещенными в них пеллисторами и инфракрасными фотодиодами, работающими в фотогальваническом режиме и включенными встречно, что обеспечивает формирование разности их сигналов, которая после усиления регистрируются потенциометром. В результате экспериментальных исследований, выполненных с использованием импульсного метода ввода пробы анализируемых газов, были определены зависимости сигнала ИКТХД от наиболее важных режимных параметров, а именно зависимости сигнала: от концентрации анализируемого газа в потоке газа-носителя (воздуха), напряжения питания пеллисторов, расстояния между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода и расхода газа-носителя. Установлена возможность использования ИКТХД в составе сигнализаторов и анализаторов микроконцентраций горючих газов и паров в воздухе. Экспериментально получена зависимость сигнала детектора от объемной концентрации водорода, метана и пропана в воздухе. Продемонстрирована возможность использования ИТХД в газовой хроматографии путем анализа калибровочной газовоздушной смеси. Определены основные метрологические характеристики ИКТХД и получены их следующие значения: порог чувствительности $4 \cdot 10^{-5}$ % об.; максимальная концентрация в пределах линейности статической характеристики – 0,4 % об.; линейный динамический диапазон – $1 \cdot 10^{4}$; дрейф условного нулевого сигнала – 0,6 мВ/ч; постоянная времени – 0,3…1 с (зависит от расхода газа носителя). Объем камер измерительной и сравнительной ячеек составляет 0,3 мл.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, детектор газов, термохимический детектор, инфракрасный детектор, эксперимент, установка, концентрация.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-96-107

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологий переработки угля, нефти и природного газа требует расширения арсенала технических средств контроля качества сырья и продуктов этих технологий, что, в свою очередь, определяет необходимость расширения спектров физических эффектов, используемых для получения измерительной информации.

На кафедре «Автоматизация технологических процессов» Тверского государственного технического университета в течение двух десятков лет проводятся

исследования, целью которых является создание новых средств контроля физико-химических свойств и концентраций жидкостей и газов. Одно из разрабатываемых в настоящее время направлений – совершенствование термохимического контроля газовых сред. При этом огромное внимание уделяется эффектам, сопровождающим реакцию каталитического горения горючих газов. В результате уже созданы термохимический детектор [1], базирующийся на измерении температуры продуктов каталитического сгорания, термохимический детектор [2], названный мультипеллисторным (позволяет измерять плотность газов), а также установлена возможность измерения концентрации горючих газов при их каталитическом сгорании по значению ионного тока, возникающего между пеллистором и коллектором [3].

По итогам экспериментальных исследований, выполненных в 2018–2019 годах, была обнаружена возможность использования для получения измерительной информации эффекта возникновения инфракрасного излучения при каталитическом сгорании горючих газов и паров на поверхности пеллистора [4]. Поскольку в настоящее время отсутствует математическая модель этого эффекта, то было признано целесообразным проведение экспериментальных исследований детектора газов и паров, в которых применяется названный эффект.

РЕЗУЛЬТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ научно-технической литературы, посвященной средствам контроля физико-химических свойств и концентраций газовых сред [5–8], позволил установить, что в настоящее время термохимические детекторы и газоанализаторы являются наиболее распространенными средствами контроля газовых сред, содержащих горючие газы и пары. Теория работы этих средств измерения достаточно полно разработана [9], а различные фирмы выпускают многочисленные средства термохимического контроля газов. Чаще всего встречаются термохимические детекторы с одним или несколькими пеллисторами, включенными в схему неравновесного моста [10, 11], и газоанализаторы с насыпным катализатором [12, 13]. Известны также термохимические сигнализаторы взрывоопасных концентраций горючих газов и паров, в которых используется измерение инфракрасного излучения, возникающего при горении газов [14], и термохимические газоанализаторы, в которых инфракрасное излучение пеллисторов применяется для балансировки неуравновешенных электрических мостов [15]. В этих устройствах для измерения инфракрасного излучения предназначены фоторезисторы. Этим фактом обусловлен параметрический сигнал таких средств термохимического контроля. В разработанном автором термохимическом детекторе газов и паров [4] для измерения инфракрасного излучения пеллисторов используются инфракрасные фотодиоды, работающие в фотогальваническом (вентильном) режиме, чем определяется генераторный сигнал детектора, что упрощает конструкцию детектора и обработку его сигнала. Этот детектор был назван инфракрасным термохимическим детектором (ИКТХД).

Для экспериментальных исследований ИКТХД была собрана лабораторная установка, обеспечивающая измерение сигнала названного детектора при различных значениях режимных параметров (рис. 1). Все исследования проводились с использованием пеллисторов типа ТТЧЭ-24ХЛ4 и инфракрасных фотодиодов типа ФД-265 А. Для упрощения и ускорения экспериментальных исследований применялся импульсный метод ввода проб анализируемых газов в поток газа-носителя (воздуха) [16], позволяющий минимизировать расход чистых анализируемых газов. Экспериментальная установка содержала ИКТХД, стабилизированный источник напряжения типа Б5-47, электронный усилитель типа ИМТ-05, электронный потенциометр типа КСП-4, стабилизатор давления газа-носителя, осушитель газа-

носителя, переменные дроссели для установки значения расхода газа-носителя, устройство ввода проб анализируемых газов и колонка, которая представляла собой пластмассовую трубку с внутренним диаметром 3 мм и длиной 2 м.

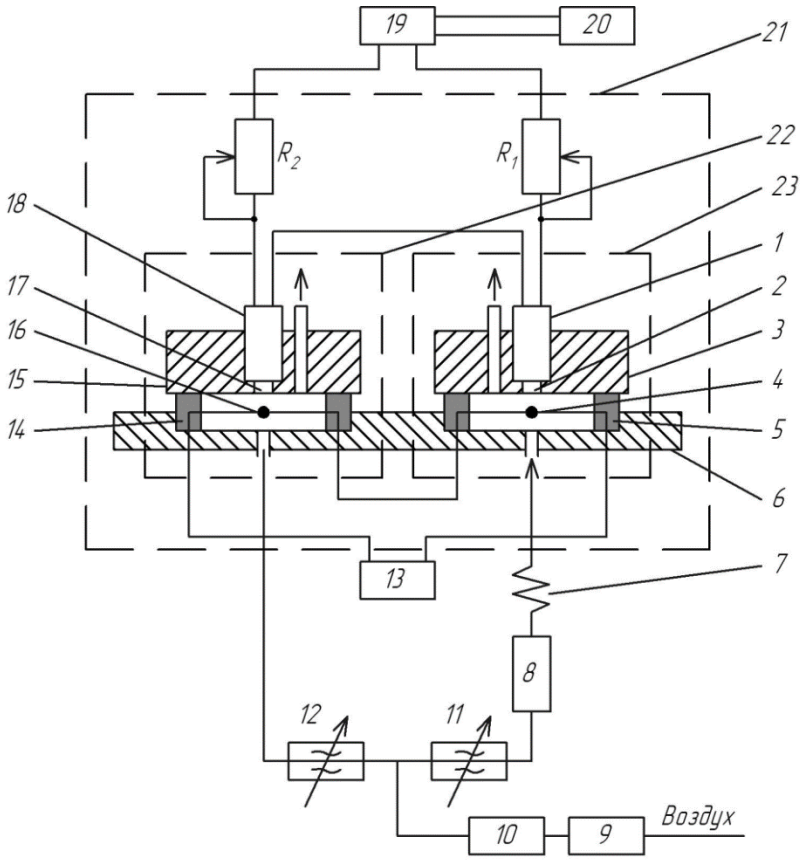


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования ИКТХД:
1 и 18 – инфракрасные фотодиоды; 2 и 17 – отверстия в крышках;
3 и 15 – крышки ячеек; 4 и 16 – измерительный и сравнительный пеллисторы;
5 и 14 – обоймы пеллисторов; 6 – основание ячеек; 7 – колонка;
8 – устройство ввода проб газа; 9 – стабилизатор давления газа-носителя;
10 – осушитель газа-носителя; 11 и 12 – переменные дроссели;
13 – стабилизированный источник электропитания;
19 – электронный усилитель; 20 – электронный потенциометр; 21 – экран;
22 и 23 – сравнительная и измерительная ячейки детектора соответственно;
R_1 и R_2 – переменные резисторы сопротивлением 2,5 мОм

Инфракрасный термохимический детектор был собран по дифференциальной схеме и состоял из измерительной и сравнительной ячеек, в каждой из которых размещались измерительный и сравнительный пеллисторы соответственно. В процессе исследований с помощью переменных дросселей устанавливались постоянные и равные друг другу расходы газа-носителя в измерительную и сравнительную ячейки. При этом в сравнительную ячейку газ-носитель поступал непосредственно, а в измерительную – через устройство ввода пробы и колонку. Пеллисторы включались последовательно и подключались к стабилизированному источнику напряжения. Инфракрасные фотодиоды размещались в крышках ячеек и имели оптический контакт с пеллисторами через отверстия в этих крышках. Фотодиоды включались встречно, а в их внешние цепи включались переменные резисторы сопротивлением 2,5 мОм.

После включения установки в работу измерения начинались через 20…30 мин. В соответствии с используемым импульсным методом ввода проб в поток газа-носителя, поступающего в измерительную ячейку, вводилась постоянная по объему проба анализируемого газа, которая подхватывалась потоком газа-носителя и через колонку транспортировалась в измерительную ячейку ИКТХД. При сгорании горючего анализируемого газа на измерительном пеллисторе возрастала его температура, что вызвало увеличение поток инфракрасного излучения и, как следствие, сигнала измерительного фотодиода. При этом температура сравнительного пеллистора не изменяется, поэтому поток инфракрасного излучения от него оставался постоянным. Поскольку измерительный и сравнительный фотодиоды включались встречно, то ток, протекающий через входную цепь электронного усилителя, увеличивался. Сигнал усилителя измерялся и регистрировался потенциометром. Этот сигнал имел форму импульса, а в качестве информативных параметров сигнала применялись амплитуда *h,* мм, и площадь *S*, мм^2, на диаграммной ленте потенциометра.

Отправным моментом в экспериментальных исследованиях ИКТХД явился тот факт, что используемые для экспериментов пеллисторы имеют ограничения по значению рабочего тока. Этот ток не должен превосходить 180 мА, что определяет значение напряжения, подаваемого к двум последовательно включенным пеллисторам (не должно превышать 3,6 В). Поэтому статическая характеристика ИКТХД определялась при напряжении, близком к напряжению питания и равном 3,5 В. Определение статической характеристики ИКТХД осуществлялось при следующих значениях режимных параметров: расход газа-носителя (воздуха) в каждую ячейку детектора – 2 л/ч; расстояние между пеллистором и окном фотодиода – 5 мм; объем проб анализируемых газов – 10…50 мкл; температура детектора – 20 ^{o}C (при этой температуре были выполнены все описанные ниже исследования); скорость диаграммной ленты потенциометра – 1800 мм/ ч. В опытах использовались следующие газы: водород, метан и пропан. Выбор этих газов обусловлен тем, что водород – наиболее легко каталитически окисляемый газ, метан обладает наибольшей стойкостью к каталитическому окислению, а пропан – типичной стойкостью к этому окислению.

Определение статической характеристики ИКТХД осуществлялось следующим образом. В поток газа-носителя, поступающего в измерительную ячейку детектора, последовательно вводились пробы калиброванным шприцом анализируемых газов объемом 10, 20, 30, 40, 50 мкл, причем пробы объемом 10…40 мкл разбавлялись воздухом до объема 50 мкл. Введенная проба транспортировалась по колонке, а затем поступала в измерительную ячейку детектора. Горючее вещество пробы частично сгорало на пеллисторе. При этом увеличивался поток инфракрасного излучения от пеллистора, что вызывало сигнал инфракрасного фотодиода, а это приводило к изменению сигнала детектора.

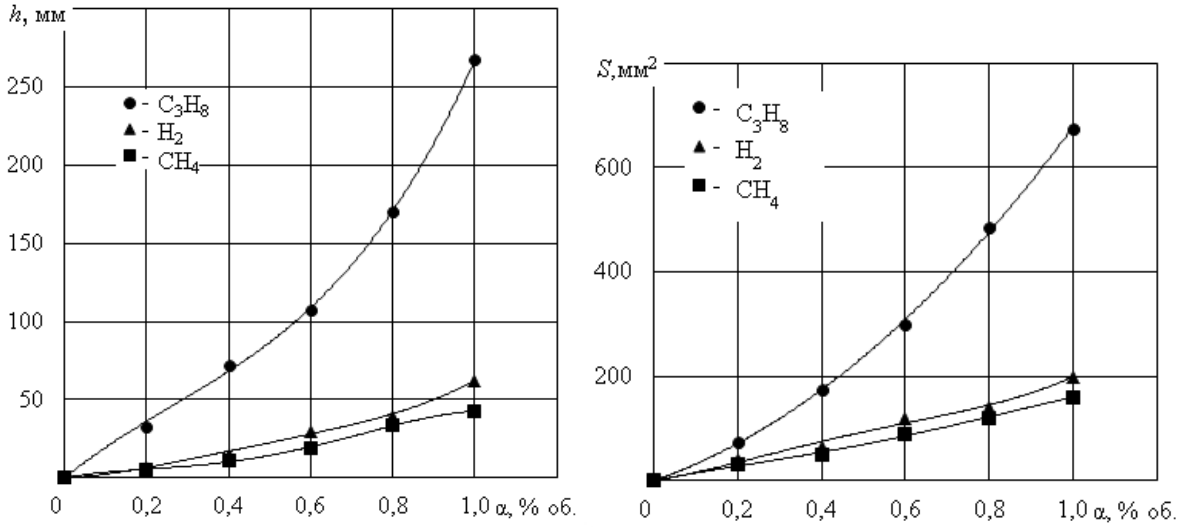
На рис. 2а и б показаны зависимости амплитуды h и площади S импульсного сигнала детектора от объемной концентрации горючих газов α в потоке газа носителя. Объемная концентрация рассчитывалась по известному расходу газа-носителя и объему пробы газа по формуле [16]

$$\alpha = 2 \cdot \frac{V_{\text{П}}}{Q_{\text{г}-\text{н}} \cdot \tau},$$

где α – объемная концентрация компонента, вызывающая максимальную амплитуду сигнала; $V_{\text{П}}$ – объем пробы анализируемого газа; τ – длительность импульсного сигнала; $Q_{\text{г}-\text{н}}$ – объемный расход газа-носителя.

На графиках, приведенных на рис. 2 (как и на всех последующих), значение для каждой точки устанавливалось по результатам трех измерений и последующего усреднения.

Как видно из рис. 2, полученная зависимость является нелинейной. В тоже время на приведенных кривых имеется участок, расположенный между объемными концентрациями от 0 до 0,4 % об., где наблюдается пропорциональная зависимость сигнала детектора (как по амплитуде, так и по площади) от объемной концентрации компонентов в газе-носителе.



(а) (б)

Рис. 2. Зависимости амплитуды (а) и площади (б) сигнала ИКТХД от концентрации горючих газов в потоке газа-носителя

Поскольку описанные выше исследования проводились при максимальном значении напряжении питания пеллисторов, равном 3,5 В, было признано целесообразным изучить зависимости сигнала детектора от напряжения питания при различных его значениях, что было сделано при следующих условиях: объем пробы анализируемого газа – 20 мкл (соответствует объемной концентрации α, при которой сохраняется линейность статической характеристики детектора); диапазон измерений выходного сигнала детектора – 0…50 мВ.

На рис. 3 показана зависимость амплитуды сигнала детектора, вызванного анализируемыми газами от значения напряжения питания пеллисторов. Из рис. 3 видно, что эта зависимость является нелинейной, а напряжение питания существенно влияет на сигнал ИКТХД, что обусловило необходимость его стабилизации. Видно также, что водород способен вызвать сигнал детектора даже при очень малых значениях напряжения питания, при которых как метан, так и пропан вызывает сигналы, близкие к нулевому значению.

Ввиду того, что сигнал ИКТХД формируется за счет измерения инфракрасного излучения пеллистора, представлялось естественным определение зависимости этого сигнала от расстояния между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода. Эти исследования были выполнены при следующих условиях: расход газа-носителя (в каждую ячейку) – 2 л/ч; напряжение питания пеллисторов – 3,5 В; объем пробы анализируемого газа (пропан) – 20 мкл; диапазон измерений выходного сигнала – 0…50 мВ. Из-за конструктивных возможностей детектора расстояние между пеллистором и окном инфракрасного диода не могло быть меньше чем 3 мм.

Полученная зависимость амплитуды сигнала ИКТХД от расстояния δ приведена на рис. 4. Как видно из этого рисунка, сигнал детектора существенно уменьшается с увеличением этого расстояния.

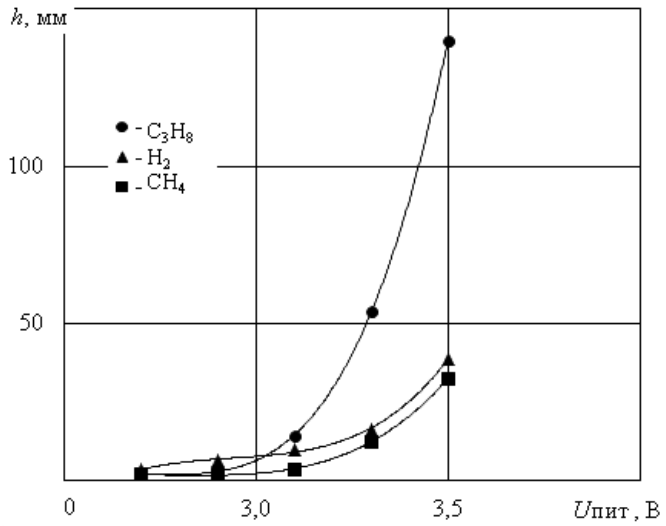


Рис. 3. Зависимости амплитуды сигнала ИКТХД
от напряжения питания пеллисторов $U_{пит}$ для водорода метана и пропана

В силу того, что ИКТХД можно будет использовать в составе газоанализаторов различных горючих газов и сигнализаторов, работа которых может осуществляться при постоянных расходах анализируемых газовоздушных смесей, а также в составе хроматографов, в которых расход газа-носителя зависит от условий разделения многокомпонентных газовых смесей, необходимо определение зависимости сигнала ИКТХД от расхода газа-носителя. Исследование этой зависимости осуществлялось при следующих условиях: объемы проб анализируемых газов – 20 мкл; напряжение питания пеллисторов – 3,5 В; диапазон измерений выходного сигнала детектора – 0…50 мВ; значение расхода газа-носителя – 1, 2 и 3 л/ч; скорость диаграммы ленты потенциометра – 1 800 мм/ч.

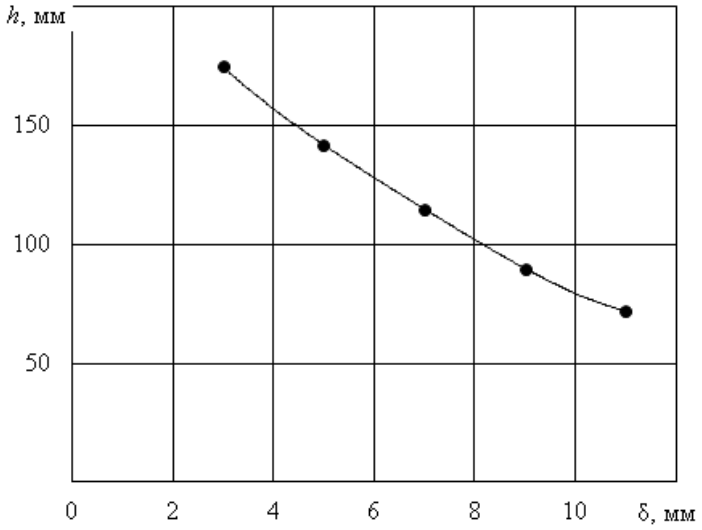
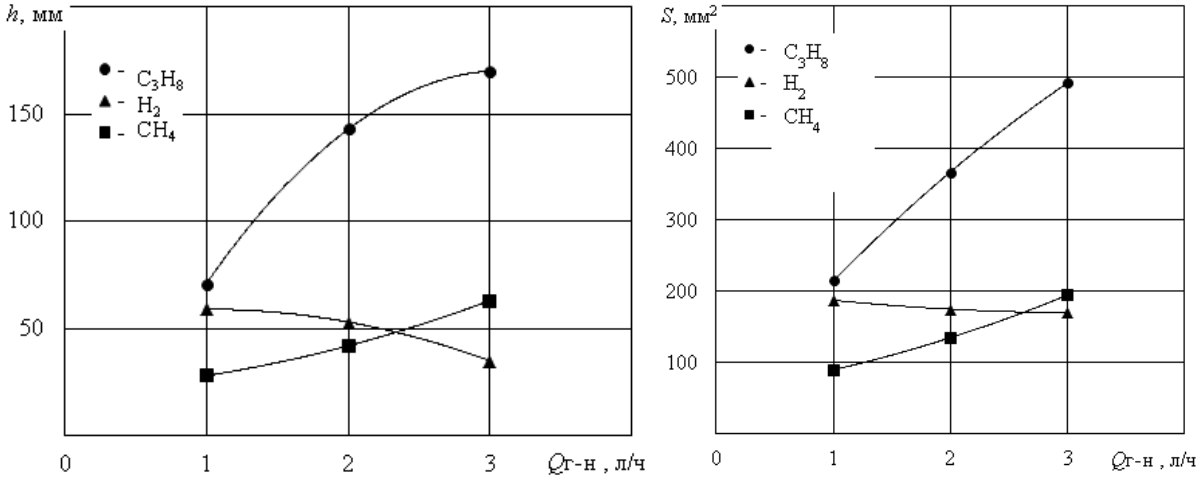


Рис. 4. Зависимость амплитуды сигнала ИКТХД от расстояния δ
между пеллистором и окном инфракрасного фотодиода

В опытах исследовались зависимости амплитуды h и площади S сигнала детектора от расхода газа-носителя (воздух). На рис. 5 приведены эти зависимости. Как видно из рис. 5, с увеличением расхода газа-носителя амплитуда h и площадь S сигнала для метана и пропана увеличиваются, а для водорода – несколько уменьшаются, что, по-видимому, связано с тем, что коэффициент диффузии водорода в воздух существенно превышает коэффициенты диффузии метана и пропана в этот газ.

Для установления возможности использования ИТХД в составе газоанализаторов микроконцентраций горючих газов в воздухе были выполнены опыты, в которых в импульсном режиме работы детектора в него вводились пробы водорода, метана и пропана с различными концентрациями этих компонентов в воздухе. Объемы проб составляли 20 мкл, расход газа-носителя принимался равным 2 л/ч, а напряжение питания было равно 3,5 В; диапазон измерений выходного сигнала составлял 0…50 мВ. В этих опытах в качестве информационного сигнала использовалась амплитуда. Результаты этих измерений представлены на рис. 6. Из этого рисунка следует, что для всех газов найденные зависимости являются пропорциональными. При этом максимальная концентрация C анализируемых газов в газе-носителе не превышает значения 0,4 % об., что определяется линейным участком диапазона статической характеристики ИКТХД, приведенной выше.

Известно, что наиболее жесткие требования к детекторам газов предъявляются при использовании их в газовой хроматографии. Были определены, в соответствии с действующими нормативными документами на газовые хроматографы, основные метрологические характеристики ИКТХД. При этом были получены следующие значения: порог чувствительности – $4 \cdot 10^{-5}$ % об.; максимальная концентрация в пределах линейности статической характеристики – 0,4 % об.; линейный динамический диапазон – $1 \cdot 10^{4}$; дрейф условного нулевого сигнала – 0,6 мВ/ч; постоянная времени – 0,3…1 с (зависит от расхода газа-носителя). Объем камер измерительной и сравнительной ячеек детектора – 0,3 мл.



(а) (б)

Рис. 5. Зависимости амплитуды (а) и площади (б) сигнала ИКТХД от расхода газа-носителя

Для проверки возможности использования ИКТХД в составе газоанализаторов и газосигнализаторов микроконцентраций паров жидких горючих веществ в воздухе в детектор в импульсном режиме вводились паровоздушные смеси следующих жидких веществ: гексана, гептана, октана, нонана, бензола, толуола, ксилола, ацетона, этанола,

циклогексана, бензина и др. В этих опытах объем пробы паров в воздухе составлял 0,21 мл. Пробы отбирались из паровой фазы сосудов с названными веществами. При этом обеспечивалась регистрация их сигналов ИКТХД для всех указанных веществ. Последнее определяется тем, что концентрация паров этих веществ на несколько порядков больше, чем чувствительность данного детектора.

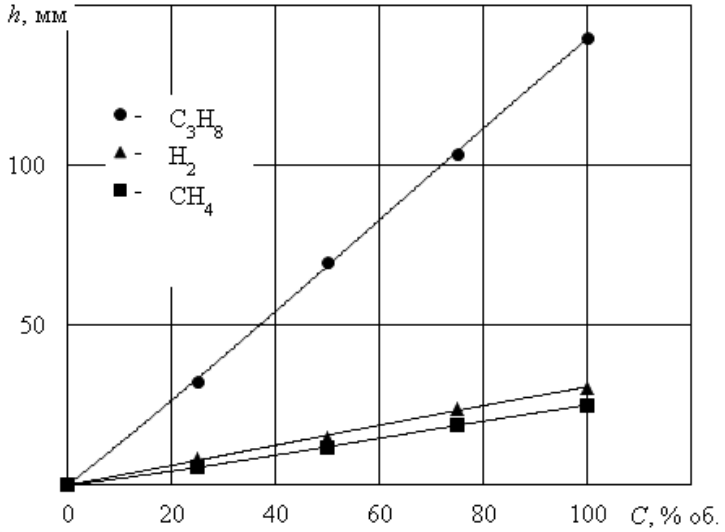


Рис. 6. Зависимости амплитуды сигнала ИКТХД от концентрации горючих газов в анализируемых газовоздушных смесях

Для демонстрации возможности использования ИТХД в газовой хроматографии этот детектор размещался в газовом хроматографе и в него посылалась смесь газов, разделенных на хроматографической колонке длиной 400 мм с внутренним диаметром 3 мм, заполненной силикагелем. Анализ осуществлялся при температуре 20 ^{o}C, расходе газа-носителя 1 л/ч, диапазоне измерений выходного сигнала детектора 0…50 мВ, объеме пробы 1 мл. На рис. 7 показана хроматограмма калибровочной газовой смеси, состоящей из метана, этана, пропана и бутана с концентрациями, равными 2,78, 0,14, 0,16, 0,09 % об. соответственно.

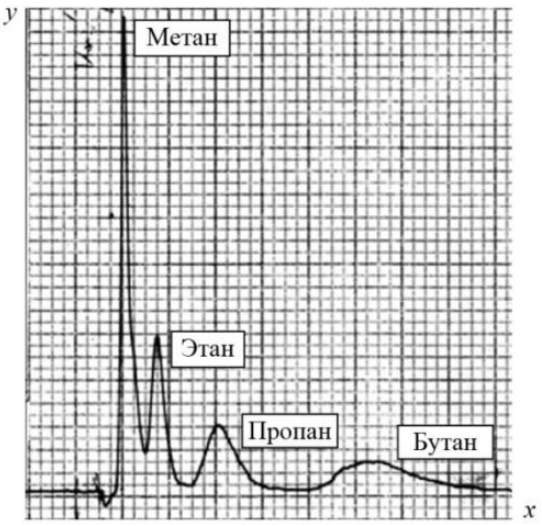


Рис. 7. Хроматограмма газовоздушной калибровочной смеси

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье детектор является новым техническим средством и может найти широкое применение в аналитической технике, так как характеризуется простотой, высокой чувствительностью и малой инерционностью. Детектор может быть реализован на основе выпускаемых промышленностью пеллисторов и инфракрасных фотодиодов. Приводимые в статье результаты экспериментальных исследований, по-видимому, следует рассматривать как предварительные. Для выявления всех возможностей ИКТХД необходимо разработать математическую модель его сигнала; исследовать зависимости сигнала детектора от температуры; разработать конструкции детектора, обеспечивающие возможность применения батареи инфракрасных фотодиодов для измерения инфракрасного излучения пеллистора.

ЛИТЕРАТУРА

1 Патент РФ 184021. *Термохимический детектор газов* / Давыденков А.К., Илясов Л.В. Заявл. 31.08.2018. Опубл. 11.10.2018, Бюл. № 29.

2. Патент РФ 127470 *Термохимический газоанализатор* / Илясов Л.В., Аль-Дахми Абдулгани М.С. Заявл. 26.11.2012. Опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.

3. Патент РФ 102261 на полезную модель. *Термохимический детектор* / Илясов Л.В., Аль-Дахми Абдулгани М.С., Денисова Д.А. Заявл. 20.10.2010. Опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

4. Патент РФ 196305 на полезную модель. *Термохимический газоанализатор* / Илясов Л.В., Ефремов А.А. Заявл. 19.12.2019. Опубл. 25.02.2020, Бюл. № 6.

5. Тхоржевский В.П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. М.: Химия, 1976. 272 с.

6. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. 424 с.

7. Автоматизация и средства контроля производственных процессов в нефтехимической и химической промышленности: справочник. Т. 4. М.: Недра, 1973. 624 с.

8. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В., Азим-заде А.Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 96 с.

9. Тарасевич В.Н. Металлические терморезисторные преобразователи горючих газов. Киев: Наукова думка, 1988. 284 с.

10. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение. 1992. 320 с.

11. Аль-Дахми Абдулгани. М.С. Разработка термохимического детектора теплоты сгорания газов: дис. … канд. техн. наук. Тамбов, 2015. 153 с.

12. Тхоржевский В.П. Автоматический анализ химического состава газов. М.: Химия, 1969. 323 с.

13. Авторское свидетельство СССР 430226 *Сигнализатор взрывоопасных концентраций горючих газов в воздухе* Бурцев Е.Ф. Заявл. 06.07.1967. Опубл. 30.05.1974, Бюл. № 20.

14. Авторское свидетельство СССР 1257493 *Термохимический газоанализатор* Алексейченков В.Л. Заявл. 13.04.1984. Опубл. 15.09.1986, Бюл. № 34.

15. Авторское свидетельство СССР 1453294 *Способ балансировки мостовой схемы термохимического газоанализатора* // Танклевский Л.Т., Алексейченков В.Л. Заявл. 17.02.1987. Опубл. 23.01.1989, Бюл. № 4.

16. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Импульсный ввод анализируемого газа в автоматических газоанализаторах // *Измерительная техника*. 1971. № 4. С. 34–38.

Для цитирования: Илясов Л.В. Исследование инфракрасного термохимического детектора газов и паров // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 96–106.

INFRARED THERMOCHEMICAL GAS AND VAPOR DETECTOR STUDY

L.V. ILIYASOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb.,
170026, Tver, Russian Federation, e-mail: lvi450714@mail.ru

The results of experimental study of the thermochemical gas and vapor detector (ITCGVD) are given. Functional principle of this detector is based on the measurement of infrared radiation intensity formed during catalytic combustion of flammable gases and vapors on the pellistor surface. The ITCGVD scheme is described. It contains the measuring and the comparing cells equipped with pellistors and infrared diodes working in photogalvanic mode and a counter connected ensuring their signal difference formation, which is registered after amplification by a potentiometer. The dependences of ITCGVD signal on most important parameters were determined as a result of experimental study with use of impulse method of analyzing gases input. These parameters are as follows: analyzing gas concentration in carrier gas (air) flow, a pellistor supply voltage, a distance of a pellistor from infrared photodiode window, carrier gas flow rate. The possibility of ITCGVD use in alerters and analyzers of flammable gasses and vapors micro concentration in air was determined. Experimental correlation of detector signal to hydrogen, methane and propane volume concentration in air was developed. Possibility of ITCGVD application in gas chromatography by using the analysis of calibration gas-air mixture is shown. Basic metrological characteristics of ITCGVD were determined. They are as follows: sensitivity threshold $4 \cdot 10^{-5}$ volume percent, maximum concentration within a linear statistical characteristic – 0.4 volume percent; linear dynamic range $1 \cdot 10^{4}$; the drift of apparent zero signal – 0.6 mV/h; time constant 0.3…1 s (depends on carrier gas flow). Measuring and comparing cell volume was 0.3 ml.

Keywords: automation of technological processes, gas detector, thermochemical detector, infrared detector, experiment, installation, concentration.

REFERENCES

1. Patent RF 184021 *Termohimicheskij detector gazov* [Thermochemical gas detector] / Davidenkov A.K, Ilyasov L.V. Declared 31.08.2018. Published 11.10.2018, Bulletin No. 29.

2. Patent RF 127470 *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer]. Ilyasov L.V., Al-Dahmi Abdulgani M.S Declared 26.11.2012. Published 27.04.2013, Bulletin No. 12.

3. Patent RF 102261. *Termohemicheskij detektor* [Thermo-chemical detector] Ilyasov L.V., Al-Dahmi Abdulgani M.S, Denisova D.A. Declared 20.10.2010. Published 20.02.2011. Bulletin No. 5.

4. Patent RF 196305. *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer]. Ilyasov L.V., Efremov A.A., Declared 19.12.2019. Published 25.02.2020, Bulletin No. 6.

5. Tkhorczhevskij V.P. Avtomaticheskij analiz gazov I zhidkostej na khimicheskikh predpriyatiyakh [Automated analysis of gases and liquids in chemical plants]. Moscow: Chimiya, 1976. 272 p.

6. Kylakov M.V. Avtomaticheskie izmereniya i pribori dlya khimicheskikh proizvodstv [Technological measurements and devices for chemical production]. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 424 p.

7. Avtomatizaciya I sredstva kontrolya proizvodstvennikh processov v neftekhimicheskoi i khimicheskoj promishlennosti [Automation and means of control of production processes in the petrochemical and chemical industries]: directory. V. 4. Moscow: Nedra, 1973. 624 p.

8. Farzane N.G., Ilyasov L.V., Azim-zade A.Yu. Automatic detectors of gases and liquids [Avtomaticheskie detektori dlya gazov i zhidkostej]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 96 p.

9. Tarasevich V.N. Metallicheskie termorezistornie preobrazovateli goruchih gazov [Metal thermosistor converters of combustible gases]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 284 p.

10. Brazhnikov V.V. Detektori dlya hromatografii [Detectors for chromatography]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1992. 320 p.

11. Al-Dahmi Abdulgani M.S Development of a thermochemical gas heat detector: cand. diss. (Engineering). Tambov, 2015. 153 p. (In Russian).

12. Tchorzhevskij V.P. Avtomaticheskij analiz himicheskogo sostava gazov [Automatic analysis of the chemical composition of gases]. Moscow: Khimiya, 1969. 323 p.

13. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 430226 *Signalizator vzrivoopasnih koncentracij goruchih gazov v vozduhe* [Indicator of explosive concentrations of flammable gases in the air] Burcev E.V. Declared 06.07.1967. Published 30.05.1974, Bulletin No. 20.

14. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1257493 *Termohemicheskij gazoanalizator* [Thermochemical gas analyzer] Alejsejchenkov V.L. Declared 13.04.1984. Published 15.09.1986, Bulletin No. 34.

15. Avtorskoe svidetelstvo SSSR 1453294 *Sposob balansirovki mostovoj shemi termohimicheskogo gazoanalizatora* [Method for balancing the bridge circuit of a thermochemical gas analyzer]. Tanklevskij L.T., Alejsejchenkov V.L. Declared 17.02.1987. Published 23.01.1989, Bulletin No. 4.

16. Farzane N.G., Ilyasov L.V. Pulse input of the analyzed gas in automatic gas analyzers. *Izmeritilnaya tehnika*. 1971. № 4, pp. 34–38. (In Russian).

Поступила в редакцию/received: 30.04.2020; после рецензирования/revised: 06.07.2020; принята/accepted 03.08.2020

УДК 658.5

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ГОСТ ISO/IEC 17025–2019

С.С.С. АЛЬ-БУСАИДИ, С.В. ПОНОМАРЕВ, д-р техн. наук

Тамбовский государственный технический университет,
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: svponom@yahoo.com

Обсуждается порядок выполнения процессов системы управления испытательной лаборатории (ИЛ), сертифицированной по требованиям стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Установлено, что процесс «8.9 Анализ со стороны руководства» является главным процессом при управлении деятельностью в испытательной лаборатории. Рассматривается взаимодействие этого процесса с другими процессами сиситемы управления ИЛ, в частности «6.2 Персонал», «6.4 Оборудование», «6.5 Метрологическая прослеживаемость», «7.2 Выбор, верификация и валидация методов», «7.6 Оценивание неопределенности измерений», «7.7 Обеспечение достоверности результатов», «7.10 Управление несоответствующей работой», «8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями», «8.6 Улучшение», «8.7 Корректирующие действия», «8.8. Внутренние аудиты» и др.

Ключевые слова: контроль на производстве, мониторинг, риски, возможности, анализ данных, анализ со стороны руководства, корректирующие действия, улучшение

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-107-113

ВВЕДЕНИЕ

Требования к компетентности калибровочных и испытательных лабораторий (ИЛ) представлены в разделах 4–8 стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [1], введенного в действие в Российской Федерации с 1 сентября 2019 года. В связи с этим в большинстве ИЛ Российской Федерации в настоящее время выполняются работы (решаются задачи) по переходу к деятельности по требованиям [1], что свидетельствует об актуальности выполненного исследования. Излагаемые в статье материалы призваны оказать научно-методическую и практическую помощь руководителям и персоналу ИЛ в решении различных задач.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Результаты выполненного научного исследования базируются на следующих материалах и методах:

1) имеющийся опыт (в том числе материалы и методы) практического осуществления деятельности в системах менеджмента качества промышленных организаций и в системах менеджмента ИЛ как в Российской Федерации, так и в Султанате Оман;

2) результаты изучения и анализа содержания требований нового стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [1] с учетом накопленного десятилетнего опыта выполнения требований ранее действовавших стандартов ГОСТ Р ИСО 9001-2008 [2], ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В правой части рис. 1 представлен перечень элементов-процессов разделов 4–8 ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 [1]. Рис. 1 иллюстрирует управление этими процессами (по аналогии с ранее опубликованными работами [4, 5]).

Центральным процессом при осуществлении деятельности ИЛ является процесс «8.9 Анализ со стороны руководства». Подготовку входных данных (см. блок, расположенный слева на рис. 1) для изучения этих данных руководством ведут руководители подразделений (секторов, групп) лаборатории, контролирующие сотрудники и исполнительный персонал через мониторинг результатов выполнения требований разделов 4–8 ГОСТ ISO/IEC17025-2019 [1], сбор, ведение записей, при необходимости статистическую обработку, предварительный анализ данных и формирование аналитических отчетов и предложений, касающихся вопросов:

пригодности политики, целей и процедур системы менеджмента ИЛ (см. пункты 5.5, 5.6, 6.6, 7.1, 7.9, 7.10, 8.1.1, 8.7 в стандарте [1]);

отчетов руководящих и контролирующих сотрудников (см. пункты 5.6, 8.9 [1]);

результатов внутренних аудитов (см. 8.8 [1]);

действий, связанных с рисками и возможностями (см. пункты 4.1.4, 8.5 [1]), и корректирующих действий (см. пункты 8.7 [1]);

оценки организаций, обеспечивающих признание (см. пункт 5.4 [1]);

результатов верификации и/или валидации методов (см. пункты 6.2.6, 7.2, 7.7 [1]);

изменения условий договоров (см. пункты 7.1.5, 7.1.6 [1]);

взаимодействия с заказчиками, жалобы и/или претензии (см. пункты 7.1, 7.9 [1]);

других (беспристрастности (см. пункт 4.1 [1]) и конфиденциальности (см. пункт 4.2 [1]) деятельности; метрологической прослеживаемости (см. пункт 6.5 [1]); управления документами и записями в системы менеджмента ИЛ (см. пункты 8.3, 8.4 [1]).

После сбора данных, полученных в процессе мониторинга, руководители подразделений (см. второй блок слева на рис. 1 под названием «7.7 Обеспечение достоверности результатов») анализируют имеющиеся данные и ежеквартально подготавливают отчеты, обычно озаглавленные «Отчет о функционировании системы менеджмента и необходимости ее улучшения». Далее эти отчеты (являющиеся входными данными для процесса «8.9 Анализ со стороны руководства», представленного в центре рис. 1) передаются менеджеру по качеству, традиционно называемого представителем руководства.

В соответствии с требованиями процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» нового стандарта ГОСТ ISO/IEC17025-2019 [1] руководители подразделений в свои отчеты о функционировании системы менеджмента и необходимости ее улучшения (являющиеся входными данными для этого процесса) должны включать сведения относительно [1]:

изменений во внутренних и внешних вопросах, имеющих отношение к лаборатории;

достижений поставленных целей;

пригодности политик и процедур;

статуса действий, запланированных после предыдущих анализов со стороны руководства;

результата(ов) последних внутренних аудитов;

корректирующих действий;

оценок, проводимых внешними органами;

изменений объема и вида работы или области деятельности лаборатории;

обратной связи от персонала и заказчиков;
жалоб (претензий);
результативности реализованных улучшений;
достаточности ресурсов;
результатов идентификации рисков;
итогов деятельности по обеспечению достоверности результатов;
других значимых факторов, таких как мониторинг деятельности и обучение.

Рис. 1. Взаимодействие процессов «8.9 Анализ со стороны руководства» с другими процессами ИЛ [1, 2]

Полученные аналитические отчеты поступают на вход процесса «7.7 Обеспечение достоверности результатов». Отметим, что этот процесс (в той его части, которая касается анализа данных контроля качества и оперативного управления

деятельностью лаборатории) осуществляется ежеквартально и даже ежемесячно, а, если необходимо, и чаще, например, при выявлении реальных несоответствий и/или рисков потенциальных несоответствий при проведении внутренних и внешних проверок или при поступлении конкретных предложений от персонала лабораторий.

На рис. 1 показано, что в рамках оперативной работы (после изучения зарегистрированного несоответствия) с выхода процесса «7.7 Обеспечение достоверности результатов» информация поступает на входы процессов «7.10 Управление несоответствующей работой» и «8.7 Корректирующие действия», а при выявлении имеющегося риска или потенциальной возможности улучшения – на вход процесса «8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями». В рамках деятельности, ориентированной на долгосрочное (и даже стратегическое) управление процессами ИЛ, отчеты и предложения руководителей подразделений, внутренних аудиторов, контролирующих сотрудников и исполнительного персонала также поступают на вход процесса «7.7 Обеспечение достоверности результатов», а затем ежегодно рассматриваются менеджером по качеству [1] (которого часто называют представителем руководства по аналогии с терминологией стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2008 [2]) и генеральным директором лаборатории.

Менеджер по качеству (представитель руководства), по требованиям [5] обязательно входящий в состав высшего руководства лаборатории, при подготовке к осуществлению процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» составляет общий для лаборатории отчет о функционировании системы менеджмента и о возможности ее улучшения. Этот отчет менеджера по качеству (представителя руководства), включающий в себя, помимо входных данных, также и проект выходных данных процесса «8.9 Анализ со стороны руководства» в виде предлагаемого плана мероприятий по улучшению деятельности на следующий год, направляется на рассмотрение руководителей подразделений (секторов, групп) и контролирующих сотрудников испытательной лаборатории. На этом этапе весь руководящий, контролирующий и исполнительный персонал лаборатории имеет возможность увидеть, насколько полно ранее сформулированные ими предложения (по устранению имеющихся рисков и использованию выявленных возможностей улучшения) вошли в состав подготовленного проекта входных и выходных данных для процесса «8.9 Анализ со стороны руководства». При необходимости каждый сотрудник и/или руководитель подразделения могут обсудить с менеджером по качеству возникающие спорные вопросы, а в крайнем случае обратиться к директору ИЛ за помощью, чтобы отстоять свою позицию.

После разрешения всех проблем (спорных вопросов) подготовленные проекты входных и выходных данных представляются на так называемый день качества, посвященный проведению и официальному оформлению результатов выполнения процесса «8.9 Анализ со стороны руководства». Во время проведения дня качества рассматриваются входные данные отчета с обсуждением результатов успешного выполнения работ в отчетном году и основных причин имевшихся проблем в достижении установленных целей и несоответствий (дефектов) как при выполнении запросов, заявок на подряд и контрактов, так и при заключении и выполнении субподрядов на проведение испытаний и калибровок. Обсуждается также и подготовленный проект выходных данных анализа со стороны руководства, включающий в себя утверждаемые директором лаборатории решения и действия, относящиеся:

к результативности системы менеджмента и ее процессов;

улучшению лабораторной деятельности, затрагивающей выполнение требований стандарта ГОСТ ISO/IEC17025-2019 [1];

предоставлению необходимых ресурсов;

любой необходимости изменений, в том числе: а) миссии, видения, политики в области качества и целей в области качества испытательной лаборатории; б) планов выполнения процессов «8.6 Улучшение», «8.7 Корректирующие действия», «8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями», направленных на улучшение процессов лаборатории, а также на устранение причин как ранее выявленных, так и потенциальных несоответствий в деятельности лаборатории.

После достижения согласия по обсуждаемым вопросам директор лаборатории утверждает подготовленный план мероприятий по улучшению деятельности лаборатории в предстоящем году. Этот план обычно предусматривает выполнение мероприятий в рамках процессов [1]:

«8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями»;

«8.6 Улучшение» (с учетом выявленных рисков и возможностей);

«8.7 Корректирующие действия».

Указанные процессы нацелены на улучшение деятельности при выполнении всех основных процессов ИЛ, предусмотренных разделами 4–8 ГОСТ ISO/IEC17025-2019 [1] и показанных в правой части рис. 1. В рамках осуществления плана мероприятий по улучшению деятельности приходится в ряде случаев прибегать и к выполнению процесса «7.10 Управление несоответствующей работой». Отметим, что в рамках деятельности по улучшению приходится использовать инструменты и методы менеджмента качества, рассмотренные в [6, 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье результаты были приняты для использования испытательными лабораториями, действующими как в Российской Федерации, так и в Султанате Оман.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2019. 32 с

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2008. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2009. 30 с.

3. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2011. 36 с.

4. Аль-Бусаиди С.С.С., Соседов Г.А., Пономарев С.В. Формирование, внедрение и практическое применение процессов системы менеджмента качества в испытательной лаборатории, ориентированной на производственную, коммерческую и образовательную сферы деятельности: монография. Тамбов: ТГТУ, 2012. 120 с.

5. Соседов Г.А., Аль-Бусаиди С.С.С., Евлахин Р.Н., Пономарев С.В. Взаимодействие процессов системы менеджмента качества образовательной организации // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского.* 2012. № 1. С. 238–246.

6. Глудкин О.П., Горбунов Н.М., Гуров А.И., Зорин Ю.В. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / под ред. О. П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.

7. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Белобрагин В.Я. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие. М.: Стандарты и качество, 2005. 248 с.

Для цитирования: Аль-Бусаиди С.С.С., Пономарев С.В. Взаимодействие процессов системы управления испытательной лаборатории по требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 107–112.

THE INTERACTION OF PROCESSES OF TESTING LABORATORY MANAGEMENT SYSTEM ACCORDING TO THE GOST ISO/IEC 17025-2019 REQUIREMENTS

S.S.S. AL-BUSAIDI, S.V. PONOMAREV, Dr. Sc.

Tambov State Technical University, 106, Sovetskaya Str., 392000, Tambov, Russian Federation, e-mail: svponom@yahoo.com

The execution order of the processes of the management system (MS) of the testing laboratory (TL), certified according to the requirements of the standard GOST ISO / IEC 17025-2019, is discussed. It was established that the process “8.9 Management Review” is the main process in managing activities in a testing laboratory. The interaction of this process with other MS TL processes is considered, in particular: “6.2 Personnel”, “6.4 Equipment”, “6.5 Metrological traceability”, “7.2 Selection, verification and validation of methods”, “7.6 Evaluation of measurement uncertainty”, “7.7 Ensuring the validity of results”, “7.10 Management of inappropriate work”, “8.5 Actions related to risks and opportunities”, “8.6 Improvement”, “8.7 Corrective actions”, “ 8.8. Internal Audits”, etc.

Keywords: production control, monitoring, risks, opportunities, data analysis, management reviews, corrective actions, improvement.

REFERENCES

1. GOST ISO / IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standartinform, 2019. 32 p. (In Russian).
2. GOST R ISO 9001-2008. Quality Management Systems. Requirements. Moscow: Standartinform, 2009. 30 p. (In Russian).
3. GOST ISO / IEC 17025-2009. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standartinform, 2011. 36 p. (In Russian).
4. Al-Busaidi S.S.S., Sosedov G.A., Ponomarev S.V. Formirovaniye, vnedreniye i prakticheskoye primeneniye protsessov sistemy menedzhmenta kachestva v ispytatelnoy laboratorii, oriyentirovannoy na proizvodstvennuyu, kommercheskuyu i obrazovatel'nuyu sfery deyatel'nosti: Monografiya [Formation, implementation and practical application of the processes of a quality management system in a testing laboratory focused on the production, commercial and educational fields of activity: Monograph]. Tambov: TGTU, 2012. 120 p.
5. Sosedov G.A., Al-Busaidi S.S.S., Ponomarev S.V. The interaction of processes of the quality management system of an educational organization. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2012. No. 1. pp. 238–246. (In Russian).
6. Gludkin O.P., Gorbunov N.M., Gurov A.I., Zorin Yu.V. Vseobshcheye upravleniye kachestvom: Uchebnik dlya vuzov [Total quality management: Textbook for universities]. Ed. O.P. Gludkin. Moscow: Radio i svyaz, 1999. 600 p.
7. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Belobragin V.Ya. Upravleniye kachestvom produktsii. Instrumenty i metody menedzhmenta kachestva: Uchebnoye posobiye [Product Quality Management. Tools and methods of quality management: Textbook]. Moscow: Standarty i kachestvo, 2005. 248 p.

Поступила в редакцию/received: 16.05.2020; после рецензирования/revised: 24.07.2020; принята/accepted 14.08.2020

УДК [004.942+519.171.2 +519.179.1]

АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЕТКИХ *GH*-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ

Е.Р. МУНТЯН, канд. техн. наук

Южный федеральный университет, пер. Некрасовский, 44,
347928, Таганрог, e-mail: ermuntyan@sfedu.ru

Для мониторинга и моделирования отношений субъектов и групп субъектов предложены модифицированные графовые и гиперграфовые модели в соответствии с классификацией видов социальных отношений. Модификация графовых моделей заключается в сочетании однотипных, разнотипных и множественных связей в виде вектора. Модифицированные гиперграфовые модели отличаются использованием в своей структуре отдельных компонентов *GH*-графов, связей между вершиной и гиперребром, а также связей между двумя гиперребрами. Преимущества предложенных *GH*-моделей заключаются в уменьшении времени выполнения анализа данных в системах с разнотипными информационными потоками за счет использования множественных связей в виде вектора между вершинами, позволяющих объединить несколько разнотипных связей в одну.

Ключевые слова: актор, социальная сеть, социальные отношения, субъект, нечеткий *GH*-граф, нечеткий *GH*-гиперграф, нечеткая *GH*-модель, разнотипные связи, множественные связи.

DOI: 10.46573/2658-5030-2020-3-113-121

ВВЕДЕНИЕ

Содержание бесед субъектов в социальных сетях отражает как личные, так и общественные проблемы. Исследование озвученных в социальных сетях проблем требует определения и формализации подходов. В качестве моделей исследования социальных отношений обычно используют графы и их обобщения. Проведенные исследования в области моделирования возможных социальных отношений между субъектами на графах и гиперграфах [1, 2], в том числе для решения задачи возможности распространения информации в социальных сетях [3, 4] позволили обосновать необходимость модернизации существующих моделей и предложить пути решения [5, 6]. Все это обусловливает требование формализации субъекта, который выполняет некоторые действия в социальной сети, а также отношений между субъектами.

Сущности, в соответствии с *Actor-Network Theory* Б. Латура (B. Latour) [7, 8] и его последователей Дж. Ло и А. Мола [9, 10], рассматриваются в качестве действующих единиц социальных отношений (акторов). Совокупность акторов и взаимоотношения между ними создают плоскую динамическую сеть, которая определяет их взаимодействие. В рамках данной статьи под акторами будут пониматься субъекты, обладающие общим функционалом в сети отношений с целью осуществления совместных действий (например, участия в информационном обмене в социальной сети).

Предложена классификация возможных видов социальных отношений:

1) отношения между субъектами:

однотипные;

разнотипные;

2) однотипные отношения между субъектами и группами субъектов;

3) однотипные отношения между группами субъектами.

Для исследования отношений вида 1 возможно использование графов, позволяющих учесть кратные однотипные и разнотипные ребра [11, 12]. Однако в таких графах с увеличением количества ребер резко возрастает вычислительная нагрузка модели. Для решения этой проблемы в работе [13] предложено использование нечетких графов с однотипными, разнотипными и множественными связями в виде вектора. Для моделирования отношений субъектов и их групп (отношения вида 1–3) возникает необходимость применения гиперграфовых моделей, позволяющих объединить элементы графов в группы, а также представить связи между элементами, группами элементов. В дальнейшем в статье такие гиперграфы будем называть *GH*-гиперграфы. Аббревиатура *GH* предложена в работе [14] и фактически предлагает интеграцию элементов графов в гиперграфы (*Graph-Hypergraph*). Поскольку граф является частным случаем гиперграфа, то позволим себе аббревиатуру «*GH*» применить к графам. Тогда в рамках данной статьи графы, учитывающие однотипные, разнотипные и множественные связи в виде вектора, будем называть *GH*-графами; гиперграфы, учитывающие связи *GH*-графа, а также связи между вершинами и группами вершин, – *GH*-гиперграфами, в общем случае – *GH*-моделями.

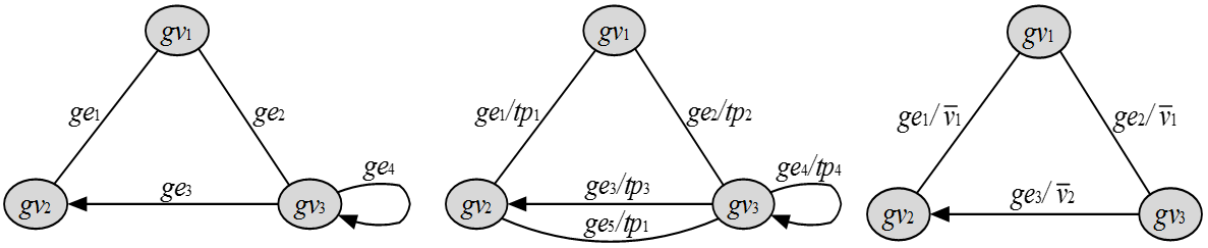
МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Представление социальных отношений в нечетких *GH*-графах с учетом множественных и разнотипных связей. Нечеткий *GH*-граф формально задан как $G' = (Gv, Ge)$, где $Gv = \{gv_i\}$ – множество вершин; $Ge = \{ge_j\}$ – множество ребер (связей) графа (*gv* – graph vertex, *ge* – graph edge). В качестве элементов графа G' рассматриваются однотипные или разнотипные вершины gv_i, которые имеют вес ($\eta \in [0; 1]$). Вершины графа соответствуют акторам в модели исследования. Связи могут быть однонаправленными ($gv_i \rightarrow gv_j$) и двунаправленными ($gv_i – gv_j$) и имеют веса ($\mu \in [0; 1]$). Множество связей такого графа включает однотипные ($gv_i – gv_j$ и $gv_i \rightarrow gv_j$), разнотипные ($gv_i – \underline{tp} – gv_j$ и $gv_i – \underline{tp} \rightarrow gv_j$, где *tp* – *type*) и множественные связи в виде вектора (связи $gv_i – \underline{v} \rightarrow gv_j$ и $gv_i – \underline{v} – gv_j$). Ребро в виде вектора позволяет объединить *t* разнотипных связей и представляется в виде $\underline{v} = <v_1, v_2, \ldots, v_{\underline{t}}>$, где *t* – размерность вектора, или кратность ребра $\underline{v}$. Каждое ребро вектора $\underline{v}$ имеет собственную идентификацию и отдельный вес. Связи графа G' соответствуют отношениям между акторами.

Весам вершин и связей может придаваться различный смысл, в том числе достоверности или степени принадлежности нечеткому множеству; они могут быть постоянными или вычисляемыми посредством фаззификации [15, 16]. Далее в статье граф G' будем обозначать как нечеткий *GH*-граф (или как граф с учетом множественных и разнотипных связей).

Примеры нечетких графов G'_1–G'_3 с возможными видами связей изображены на рис. 1. В каждом графе вершина gv_i соответствует актору a_i. Двунаправленные связи представляют возможность обмена информацией, а однонаправленные связи демонстрируют отношения акторов. Интерпретация связей графов G'_1–G'_3 представлена в табл. 1. С учетом табл. 1 каждый путь в любом из рассмотренных графов может быть представлен определенной фразой. Например, фраза «актор a_2 (соответствующий

вершине gv_2), который склонен к самообразованию (tp_4 – «самообразовываться») благодаря общению (tp_2 – «обмениваться информацией в сети Instagram») с актором a_1 (вершина gv_1), может оказать влияние (tp_1 – «влиять») на принятие решения актором a_2 (вершина gv_2)» соответствует пути в графе G'_2, $S_1(G'_2) = (ge_2, ge_4, ge_3)$.



(а) (б) (в)

Рис. 1. Нечеткие графы G'_1 с однотипными связями (а), G'_2 с разнотипными связями (б), G'_3 с множественными связями в виде вектора (в)

Таблица 1. Соответствие отношений акторов связям в графах G'_1–G'_3

Вид связи	Направ-ленность	Ребро графа	Отношение между акторами
Однотипные связи в графе G'_1	$gv_i - gv_j$	ge_1, ge_2	«Обмениваться информацией»
	$gv_i \rightarrow gv_j$	ge_3	«Влиять»
		ge_4	«Рефлексировать»
Разнотипные связи в графе G'_2	$gv_i – tp – gv_j$	ge_1, ge_5	tp_1 – «обмениваться информацией в сети Facebook»
		ge_2	tp_2 – «обмениваться информацией в сети Instagram»
	$gv_i – tp \rightarrow gv_j$	ge_3	tp_3 – «влиять»
		ge_4	tp_4 – «самообразовываться»
Связи в виде вектора в графе G'_3	$gv_i – \bar{v} – gv_j$	ge_1, ge_2	v_1 – «обсуждать тему, связанную с угрозой терроризма», v_2 – «обсуждать политические ситуации», v_3 – «обсуждать социальные вопросы»
	$gv_i – \bar{v} \rightarrow gv_j$	ge_3	v_4 – «уважать», v_5 – «относиться толерантно», v_6 – «дружить»

Спектр отношений значительно расширяется в моделях с разнотипными связями по сравнению с графами с однотипными связями. Однако в реальных моделях исследования социальных отношений количество разнотипных ребер может быть настолько велико, что это приводит к росту временных затрат на организацию вычислений. Анализ рассмотренных графов позволяет сделать вывод о целесообразности использования множественных связей в виде вектора в *GH*-графах, которые объединяют несколько разнотипных связей в одну, за счет чего уменьшается время вычисления в *GH*-графах.

Преимущества *GH*-графов, учитывающих множественные и разнотипные связи, оценены количественно в работах [17, 18], где представлены результаты экспериментальных исследований в разработанном программном комплексе [19, 20].

Представление социальных отношений в нечетких *GH*-гиперграфах с учетом множественных и разнотипных связей. Для представления отношений акторов, групп акторов целесообразно использование гиперграфов. Гиперграфы – это обобщения на графах, которые позволяют одним ребром соединить не только две вершины, как граф, а сколь угодно много вершин [21, 22].

Нечеткий *GH*-гиперграф $H' = (Gv, Ge, He, Hg, Hh)$ задан множествами: *Gv* и *Ge* (множества вершин и связей, как в графе *G'*); *He* (множество гиперребер ($he \in He$)); *Hg* (множество связей между вершиной и гиперребром ($hg \in Hg$)); *Hh* (множество связей между гиперребрами ($hh \in Hh$)).

Далее в статье названный выше гиперграф будем характеризовать с точки зрения особенностей связей как гиперграф с учетом множественных и разнотипных связей.;

Под элементами гиперграфа *H'* понимаются однотипные или разнотипные вершины gv_i, которые имеют вес η и однотипные гиперребра he_h с весами μ. Вершины соответствуют акторам, а гиперребра – группам акторов в модели исследования, например различным социальным сетям. Все остальные связи в гиперграфе *H'* могут быть однонаправленными и двунаправленными и имеют веса μ. Множество связей между вершинами в гиперграфе *H'* соответствует *Ge* и имеет такую же интерпретацию. Связи *hg* позволяют задать отношения между актором и группой акторов, а связи *hh* – отношения между группами акторов. Весам вершин и связей (η и μ) *GH*-гиперграфа придается смысл аналогично как в графе *G'*.

В [6, 23] подробно описаны модели неориентированного и ориентированных гиперграфов. Возможные отношения между акторами, группами акторов вида 1…3 возможно задать при помощи гиперграфов H'_1–H'_6 (рис. 2). На рис. 2 изображены: 1) неориентированный гиперграф H'_1; 2) ориентированные гиперграфы: H'_2 (с однотипными связями *ge*); H'_3 (с разнотипными связями *ge/tp)*; H'_4 (со связями в виде вектора *ge/v*); H'_5 (со связями между вершинами и гиперребрами *hg*); H'_6 (со связями между гиперребрами *hh*).

Отношения акторов внутри групп представлены в табл. 1 (для гиперграфов H'_2–H'_4). В табл. 2 отражена возможная интерпретация отношений групп акторов для гиперграфов H'_1, H'_5 и H'_6.

Каждый путь в любом из гиперграфов (рис. 2) может отобразить некоторую фразу. Например, фраза «актор a_1 (вершина gv_1)» из сети Facebook (гиперребро he_1) благодаря общению (ребро hg_3) с акторами a_3–a_5 (вершины gv_3–gv_5) из сети Instagram (гиперребро he_2) владеет определенной информацией, что позволяет ему оказать влияние (ребро hg_1) на работу всей сети Instagram в целом» может быть представлена в виде пути в гиперграфе H'_5 S_2 $(H'_5) = (he_2, hg_3, hg_1, he_2)$.

В предложенном подходе используются, в отличие от подходов, предложенных в работе [6], связи между вершиной и гиперребром (*hg*) (новизна подхода), что позволяет представить отношения акторов и групп акторов вида 2 и тем самым расширить спектр возможных социальных отношений, подлежащих исследованию.

Возникает проблема унификации представления *GH*-графов и *GH*-гиперграфов. В [5, 6, 23, 24] показано, что для решения этой проблемы возможно использование списковой структуры. Списки в классическом представлении [25, 26] невозможно применить к *GH*-моделям из-за их сложности. Решение этой проблемы требует дальнейших исследований, результаты которых будут представлены в следующих работах.

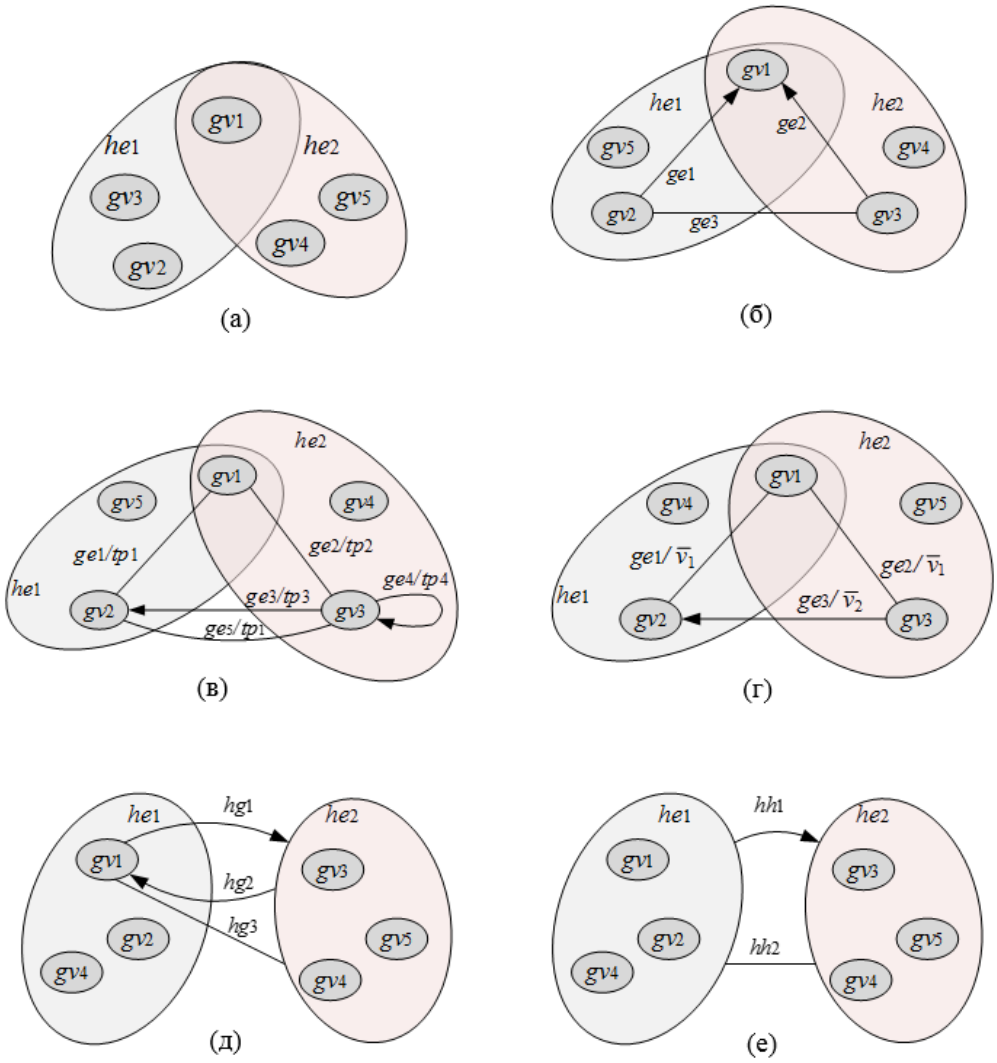


Рис. 2. Нечеткие гиперграфы H'_1 (а), H'_2 (б), H'_3 (в), H'_4 (г), H'_5 (д), H'_6 (е)

Таблица 2. Соответствие отношений акторов связям в гиперграфах H'_1, H'_5 и H'_6

Вид связи	Направленность	Ребро гиперграфа	Отношения групп акторов
Связи между вершиной и гиперребром в гиперграфе H'_5	$gv_i \rightarrow he_j$	hg_1	«Влияние актора на группу акторов»
		hg_2	«Влияние группы акторов на актора»
	$gv_i - he_j$	hg_3	«Обмен информацией между актором и группой акторов»
Связи между гиперребрами в гиперграфе H'_5	$he_i - he_j$	hh_2	«Связь между группами акторов»
	$he_i \rightarrow he_j$	hh_1	«Влияние одной группы акторов на другую группу»
Гиперребра в гиперграфах H'_1- H'_6	–	he_1	Группа акторов, являющихся пользователями социальной сети Facebook
	–	he_2	Группа акторов, являющихся пользователями социальной сети Instagram

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В разработанном автором программном комплексе [19] были проведены эксперименты на графах, содержащих от 300 до 1000 вершин. Анализ результатов экспериментальных исследований показал снижение времени работы алгоритма поиска кратчайших путей не менее чем в 1,5 раза, по сравнению с моделями, учитывающими только однотипные и разнотипные связи, что подтверждает эффективность и предпочтительность использования *GH*-графов для исследования социальных отношений. Поскольку в наших исследованиях предложена интеграция множественных и разнотипных связей графов в *GH*-гиперграфы, то можно говорить об эффективности применения таких гиперграфов для моделирования социальных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные средства коммуникации между субъектами не только расширяют возможности общения, но и рождают новые явления и процессы, которые могут влиять как положительно на отдельные группы населения и общество в целом, так и отрицательно.

Были обозначены тенденции модификации графовых и гиперграфовых моделей для моделирования социальных процессов. Предложено применение нечетких *GH*-графов и *GH*-гиперграфов, которые позволяют учесть множественные и разнотипные связи.

Научная новизна исследований заключается в модификации графовых моделей за счет сочетания однотипных, разнотипных и множественных связей в виде вектора (*GH*-граф), а также в модификации гиперграфовых моделей, отличающихся использованием в своей структуре отдельных компонентов *GH*-графов, связей между вершиной и гиперребром, а также связей между гиперребрами (*GH*-гиперграф).

Были названы преимущества *GH*-моделей, которые позволяют представить систему социальных отношений субъектов, групп субъектов в соответствии с предложенной классификацией и вместе с тем уменьшить время анализа данных в системе за счет использования множественных связей в виде вектора между вершинами, объединяющих несколько разнотипных связей в одну. Была обозначена задача поиска единой формы представления *GH*-моделей с целью унификации способа обработки графов и гиперграфов для анализа данных в моделях с разнотипными информационными потоками. Решение этой задачи будет представлено в следующих работах автора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берштейн Л.С. Анализ социальных графов методом оценки степени изоморфизма нечетких графов на основе нечетких клик // *Современные проблемы науки и образования.* 2013. № 6. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11188 (дата обращения: 18.05.2020).
2. Целых А.А., Целых А.Н., Матвеев Д.А. Методы и средства визуализации массивов научно-технических показателей в виде графов // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 3. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20909040& (дата обращения: 18.05.2020).
3. Носова М.В., Сенникова Л.И. Моделирование распространения информации в децентрализованных сетевых системах с нерегулярной структурой // *Новые информационные технологии в автоматизированных системах.* 2014. № 17. С. 329–335.
4. Liben-Nowell D., Kleinberg J. Tracing information flow on a global scale using Internet chain-letter data // *Proceedings of the national academy of sciences*. 2008. V. 105. № 12. P. 4633–4638.

5. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Использование списков для представления социальных отношений // *Информатизация и связь*. 2018. № 4. С. 43–49.

6. Сергеев Н.Е., Мунтян Е.Р. Интерпретация социальных отношений в гиперграфовых моделях // *Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям*. Таганрог: изд-во Ступина С.А. 2018. Т. 2. С. 79–87.

7. Latour B. Reassembling the Social: An Introduction tj Actor-Network-Theory. Oxford: Oxford University Press. 2005. 281 p.

8. Латур Б. Пересборка социального. Введение в акторно-сетевую теорию. М.: ГУ-ВШЭ. 2014. 384 с.

9. Ло Дж. Объекты и пространства // *Социологическое обозрение*. 2006. Т. 5. № 1. С. 30–42.

10. Mol A. The Body Multiple: Ontology in Medical Practice, Durham, NC and London: Duke University Press. 2002. 196 p.

11. Boccalettia S., Bianconic G., Criadod R., del Geniof C.I., Gómez-Gardeñesi J., Romanced M., Sendiña-Nadalj I., Wangk Z., Zaninm M. The structure and dynamics of multilayer networks // *Preprint submitted to Physics Reports.* July 16. 2014. 157 p.

12. Contractor N.S., Monge P.R., Leonardi P.M. Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network // *International Journal of Communication*. 2011. № 5. P. 682–720.

13. Мунтян Е.Р. Особенности использования графов при моделировании сложных технических систем // *Системный синтез и прикладная синергетика*: *сб. науч. трудов IX Всероссийской научной конференции.* Таганрог: ЮФУ, 2019. С. 228–233.

14. Сергеев Н.Е., Целых Ю.А. GH-модели социальных сетей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 1. С. 90–95.

15. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б. Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.

16. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004. 320 с.

17. Мунтян Е.Р. Реализация нечеткой модели взаимодействия объектов сложных технических систем на основе графов // *Программные продукты и системы*. 2019. Т. 32. № 3. С. 411–418.

18. Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V. Modern approaches to modeling of risk situations during creation complex technical systems // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. V. 875. P. 209–217.

19. Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018665499. *Программный модуль для представления акторов и отношений между акторами на основе графов* / Мунтян Е.Р. Заявл. 26.11.2018. Опубл. 05.12.2018, Бюл. № 12.

20. Мунтян Е.Р. Разработка программного комплекса для моделирования взаимодействия акторов и их групп на основе графов // *Инновационные технологии и дидактика в обучении*: *сборник статей международной научно-практической конференции. Т. 1.* Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 74–78.

21. Berge C. Hypergraphs: combinatorics of finite sets. North-Holland. 1989. 255 p.

22. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Нечеткие графы и гиперграфы. М.: Научный мир, 2005. 256 с.

23. Kolodenkova A. E., Muntyan E. R. Researches of Interaction of Actors with Use Fuzzy Hypergraph and Cognitive Modeling // *XIV International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering*. 2018. С. 127–131.

24. Muntyan E., Sergeev N., Tselykh A. Analysing Big Social Graphs Using a List-based Graph Folding Algorithm // *ITM Web of Conferences.* 2019. Т. 25. С. 01003.

25. Фостер Дж. Обработка списков. М.: Мир. 1974. 72 с.
26. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы. Построение и анализ. М.: Вильямс, 2013. 1328 с.

Для цитирования: Мунтян Е.Р. Аспекты использования нечетких *GH*-моделей для представления социальных отношений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2020. № 3 (7). С. 113–121.

ASPECTS OF FUZZY GH-MODELS USING FOR SOCIAL RELATIONS REPRESENTING

E.R. MUNTYAN, Cand. Sc.

Southern Federal University, Nekrasovskii st., 44, 347928, Taganrog,
Russian Federation, e-mail: ermuntyan@sfedu.ru

In the article the modified graph and hypergraph models are proposed for monitoring and modeling the relations of subjects and groups of subjects in accordance with the classification of types of social relations. Modification of graph models is the combination of homogeneous, heterogeneous and multiple connections in the form of a vector. Modified hypergraph models are distinguished by the use of separate components of *GH*-graphs in their structure, connections between a vertex and a hyperedge, as well as connections between two hyperedges. The advantages of the proposed *GH*-models lie in decrease of the execution time of data analysis in systems with different types of information flows by using multiple connections in the form of a vector between vertices, which allow you to combine several different types of connections into only one.

Keywords: actor, social network, social relations, subject, fuzzy *GH*-graph, fuzzy *GH*-hypergraph, fuzzy *GH*-model, different types of connections, multiple connections.

REFERENCES

1. Berstein L.S. Analysis of social graphs by evaluating the degree of isomorphism of non-clear graphs based on fuzzy clicks. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013. No 6. URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11188 (date accessed: 18.05.2020). (In Russian).
2. Tselykh A.A., Tselykh A.N., Matveev D.A. Methods and means of visualization of arrays of scientific and technical indicators in the form of graphs. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013. No 3. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id= 20909040& (date accessed: 18.05.2020). (In Russian).
3. Nosova M.V., Sennikova L.I. Modeling of information distribution in de-centralized network systems with irregular structure. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh.* 2014. No. 17, pp. 329–335. (In Russian).
4. Liben-Nowell D., Kleinberg J. Tracing information flow on a global scale using Internet chain-letter data. *Proceedings of the national academy of sciences*. 2008. V. 105. No. 12, pp. 4633–4638.
5. Sergeev N.E., Muntyan E.R. Usage of lists to represent social relations. *Informatizatsiya i svyaz.* 2018. No. 4, pp. 43–49. (In Russian).
6. Sergeev N.E., Muntyan E.R. Interpretation of social relations in hypergraphic models // *Proceedings of the Congress on intelligent systems and information technologies*. In 3 vol. Taganrog: Stupin S.A. publ. V. 2, pp. 79–87. (In Russian).

7. Latour B. Reassembling the Social: An Introduction tj Actor-Network-Theory. Oxford: Oxford University Press. 2005. 281 p.

8. Latour B. Peresborka sotsialnogo. Vvedenie v aktorno-setevuyu teoriyu [Social Reassembly. Introduction to the Actor-Network Theory]. Moscow: GU-VSHE, 2014. 384 p.

9. Lo J. Objects and spaces. *Sotsiologicheskoye obozreniye*. 2006. V. 5. No. 1, pp. 30–42. (In Russian).

10. Mol A. The Body Multiple: Ontology in Medical Practice, Durham, NC and London: Duke University Press. 2002. 196 p.

11. Boccalettia S., Bianconic G., Criadod R., del Geniof C.I., Gómez-Gardeñesi J., Romanced M., Sendiña-Nadalj I., Wangk Z., Zaninm M. The structure and dynamics of multilayer networks. *Preprint submitted to Physics Reports.* July 16. 2014. 157 p.

12. Contractor N.S., Monge P.R., Leonardi P.M. Multidimensional networks and the dynamics of sociomateriality: bringing technology inside the network. *International Journal of Communication*. 2011. No 5, pp. 682–720.

13. Muntyan E.R. Features of using graphs in modeling complex technical systems. *System synthesis and applied synergetics: collection of scientific papers of the IX All-Russian scientific conference*. Taganrog: YUFU, 2019. pp. 228–233. (In Russian).

14. Sergeev N.E., Tselykh Yu.A. The GH-models of social networks. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskiye nauki.* 2009. No. 1, pp. 90–95. (In Russian).

15. Averkin A.N., Batyrshin I.3., Blishun A.F., Silov V.B., Tarasov V.B. Nechetkie mnozhestva v modelyah upravleniya iskusstvennogo intellekta [Fuzzy Sets in Management Models and artificial Intelligence]. D.A. Pospelov (Ed.). Moscow: Nauka, 1986. 312 p.

16. Yarushkina N.G. Osnovyi teorii nechetkih i gibridnyih sistem [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow: Finansy i statistika. 2004. 320 p.

17. Muntyan E.R. Realization of fuzzy model of objects interaction inside a complex technical systems based on graphs. *Programmnyye produkty i sistemy*. 2019. V. 32. No. 3, pp. 197–206. (In Russian).

18. Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V. Modern approaches to modeling of risk situations during creation complex technical systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. V. 875, pp. 209–217.

19. Registration of a computer program No. 2018665499. A Software Module for Representing Actors and Relations Between Actors Based on Graphs. Muntyan E.R. Declared 26.11.2018. Published 05.12.2018, Bulletin No. 12. (In Russian).

20. Muntyan E.R. Development of software to simulate the interaction of actors and their groups based on graphs. Proc. Intern. Sci. and Pract. Conf. on Innovative Technologies and Didactics in Teaching. Taganrog: YUFU. 2018. V. 1, pp. 74–78. (In Russian).

21. Berge C. Hypergraphs: combinatorics of finite sets / North-Holland. 1989. 255 p.

22. Bershtein L.S., Bojanic A.V. Nechetkie grafyi i gipergrafyi [Fuzzy graphs and hypergraphs]. Moscow: Nauchnyy mir, 2005. 256 p.

23. Kolodenkova A. E., Muntyan E. R. Researches of Interaction of Actors with Use Fuzzy Hypergraph and Cognitive Modeling. *XIV International scientific-technical conference on actual problems of electronics instrument engineering*. 2018, pp. 127–131.

24. Muntyan E., Sergeev N., Tselykh A. Analysing Big Social Graphs Using a List-based Graph Folding Algorithm. *ITM Web of Conferences*. 2019. V. 25, pp. 01003.

25. Foster J. Obrabotka spiskov [Processing lists]. Moscow. Mir. 1974. 72 p.

26. Cormen T., Leiserson C., Rivest R., Stein K. Algoritmyi. Postroenie i analiz, [Algorithms: Construction and Analysis]. Moscow: Vilyams. 2013. 1328 p.

Поступила в редакцию/received: 23.05.2020; после рецензирования/revised: 10.07.2020; принята/accepted 03.08.2020

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (7), 2020

Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор А.В. Смирнов

Подписано в печать 08.09.2020
Дата выхода в свет 30.12.2020

Формат 60 х 84/8	Усл. печ. л. 14,18	Бумага писчая
Физ. печ. л. 15,25	Цена свободная	Уч.-изд. л. 13,27
Тираж 500 экз.	Заказ № 336	С – 122

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»
Центр инженерной печати
170024, Тверь, ул. Академическая, д. 14