

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 3 (3), 2019**

Тверь 2019

Редакционная коллегия

Главный редактор А.Н. Болотов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

В.В. Измайлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

А.Л. Яблонев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Г.Б. Бурдо, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ, зам. главного редактора по направлению «Информатика, вычислительная техника и управление»

Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук, доцент ТвГТУ, ответственный секретарь

Н.И. Березовский, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БНТУ, Республика Беларусь

П.Н. Богданович, д-р техн. наук, профессор БелГУТ, Республика Беларусь

И.С. Гершман, д-р техн. наук, профессор, ведущий специалист ВНИИЖТ

В.В. Голенков, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой БГУИР, Республика Беларусь

К.А. Головин, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТулГУ

И.В. Горлов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

В.И. Гульяев, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.Ф. Зюзин, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Л.И. Кантович, д-р техн. наук, профессор, профессор НИТУ «МИСиС»

А.М. Керопян, д-р техн. наук, профессор НИТУ «МИСиС»

Л.В. Козырева, д-р техн. наук, доцент ТвГТУ

А.В. Кондратьев, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Б.И. Марголис, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой ТвГТУ

В.В. Мешков, д-р техн. наук, профессор, декан ТвГТУ

А.В. Михайлов, д-р техн. наук, профессор СПГУ

М.В. Новоселова, канд. техн. наук, доцент ТвГТУ

Б.В. Палюх, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ТвГТУ

Н.А. Семенов, д-р техн. наук, профессор ТвГТУ

И.А. Солдатенков, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

П.В. Цибуленко, канд. техн. наук, доцент, декан БНТУ, Республика Беларусь

В.С. Шоркин, д-р физ.-мат. наук, профессор ОГУ имени И.С. Тургенева

Л.Ш. Шустер, д-р техн. наук, профессор УГАТУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 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 издается с января 2019 года, выходит 4 раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: серия ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Перепечатка материалов из журнала возможна при письменном согласии с редакцией, при этом ссылка на журнал обязательна.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.</i> Повышение энергоэффективности технологии формирования износостойкого керамического покрытия на алюминии.....	5
<i>Мешков В.В., Афанасьева Л.Е., Зоренко Д.А.</i> Изменение структуры и свойств тормозного диска вагона при экстренном торможении.....	14
<i>Гараников В.В., Дорогов О.В.</i> Исследование влияния различных факторов на микроползучесть конструкционных сплавов.....	21
<i>Слободян С.М.</i> Струна – модель траектории электрического разряда.....	30
<i>Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал.</i> Замечание о симметрии функций, определенных в шаре.....	38

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Яблонев А.Л., Гусева А.М.</i> Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции.....	47
<i>Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Масленников Д.Г.</i> Грунтоуплотняющая машина с гидравлическим вибровозбудителем...	56
<i>Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М.</i> Аналитическое обоснование рациональных конструкторско-технологических параметров ленточно-роликового пресса для обезвоживания торфа....	64

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Барчуков Д.А., Слободян С.М.</i> Модель онлайн-оценки удаления объекта, управляемого по проводам.....	71
<i>Иванова Н.И.</i> Обзор современных фотоионизационных детекторов.....	79
<i>Соломаха Г.М., Хижняк С.В.</i> Событийная модель обмена данными в системе мониторинга производственных процессов.....	88
<i>Кузьмина А.С., Мансурова Н.А.</i> Построение многоугольника конкурентоспособности посредством разработки скриптов PHP.....	95

ХРОНИКА

<i>Бронфельд Г.Б.</i> Кафедра Е.В. Золотова и Нелидовская АСУТП.....	102
--	-----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O.</i> The increase of energy effectiveness of the technology wear resistant ceramic coating formation on aluminum.....	5
<i>Meshkov V.V., Afanasieva L.E., Zorenko D.A.</i> Changing structure and properties of carriage brake disc at emergency braking.....	14
<i>Garanikov V.V., Dorogov O.V.</i> The research of the influence different factors on micro-creep construction alloys.....	21
<i>Slobodyan S.M.</i> A string as the model of electric discharge trajectory.....	30
<i>Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al.</i> A note on the symmetry of functions defined in a ball.....	38

TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MACHINERY

<i>Yablonev A.L., Guseva A.M.</i> Determination of flexural strength molded peat products.....	47
<i>Pavlov Yu.N., Kondratyev A.V., Kochkanyan S.M., Maslennikov D.G.</i> Ground machine with hydraulic vibrator.....	56
<i>Mikheyev I.I., Goryachev V.I., Scherbakova D.M.</i> Analytical justification of rational design-technology parameters of the tape and roller press for peat dehydration.....	64

INFORMATICS, COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

<i>Barchukov D.A., Slobodyan S.M.</i> The model of on-line estimation of distance to wire-controlled object.....	71
<i>Ivanova N.I.</i> Review of modern photo-ionization detectors.....	79
<i>Solomakha G.M., Khizhnyak S.V.</i> Event driven data exchange model in production processes monitoring system.....	88
<i>Kuzmina A.S., Mansurova N.A.</i> Construction of competitive ability polygon by means of PHP scripts development.....	95

NEWS, EVENTS, MEMORIS

<i>Bronfeld G.B.</i> Department of E.V. Zolotov's and Nelidovo's APCS.....	102
--	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.891

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИИ

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

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

© Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., 2019

Керамическое покрытие на основе оксидов алюминия, сформированное на поверхности детали методом микродугового оксидирования (МДО) по традиционной технологии, имеет грубую шероховатость, доведение его до заданных эксплуатационных характеристик требует дополнительной обработки, что, учитывая высокую твердость покрытия, трудоемко и экономически невыгодно. Предложено повысить энергоэффективность технологии получения готовой детали за счет введения операции выдержки детали с МДО-покрытием перед механической обработкой в плавиковой кислоте. В результате многофакторных экспериментов определены оптимальные режимы травления детали в плавиковой кислоте для разрушения силикатного хрупкого технологического слоя. Эффективность усовершенствованной технологии оценивалась по временным, энергетическим и инструментальным затратам на достижение заданной шероховатости поверхности керамического покрытия, полученного по традиционному и предложенному способу. Установлено, что расход электроэнергии сокращается в 2...2,7 раза, а расход абразивного инструмента – в 8,7...12 раз (за счет снижения времени на последующую механическую обработку). Проведенные триботехнические испытания показали, что керамическое покрытие, полученное по предлагаемой технологии, обладает высокой износостойкостью.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, износостойкое керамическое покрытие, энергоэффективная технология, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Защитные износо- и коррозионностойкие керамические покрытия на деталях из алюминия и его сплавов или деталях с предварительным покрытием из алюминия и его сплавов востребованы практически во всех областях современного машиностроения, строительства, а также в химической и нефте- и газодобывающей отраслях [1–3]. К настоящему времени достаточно хорошо отработана технология формирования керамического износостойкого покрытия, состоящего из оксидов алюминия различных модификаций, на вентильных металлах методом микродугового оксидирования (МДО) [4–6]. Наряду с достоинствами, такими как высокая твердость, износостойкость, химическая инертность, получаемые покрытия имеют ряд недостатков. Упрочненный керамический слой оксида алюминия, сформированный на поверхности детали методом МДО, имеет грубую шероховатость и требует дополнительной обработки, что,

принимая во внимание высокую твердость покрытия, весьма трудоемко. Процесс образования покрытия энергоемок и длителен, причем в случае нарушения технологии нанесения оно может утратить свои высокие трибосвойства и стать хрупким и пористым.

Известны попытки сделать технологию нанесения покрытий более надежной и энергоэффективной, расширить диапазон механических свойств получаемых материалов [7–9]. Наиболее перспективным подходом, с нашей точки зрения, является разделение непрерывного процесса формирования покрытия анодно-искровым способом, как в традиционном методе, на два взаимосвязанных этапа. Поскольку слои керамического покрытия, формирующиеся последовательно на трибоповерхности, имеют отличающиеся физико-механические свойства и выполняют разные технологические функции, в покрытии возможно сформировать необходимый градиент механических свойств в направлении, перпендикулярном к поверхности трения.

В работе [6] предложен двухступенчатый способ формирования покрытия. На первой стадии анодирование алюминия ведут в растворе алюмината или силиката щелочного металла с кремнефтористым натрием в качестве катализатора, а на второй – в слабощелочном растворе алюмината или силиката щелочного металла. Полученный на первой стадии диэлектрический технологический слой, состоящий в основном из SiO₂, способствует более быстрому формированию под ним основного высокотвердого поликристаллического слоя керамического покрытия из различных фаз оксида алюминия. За счет сокращения времени на формирование рабочего слоя керамического покрытия существенно повышается энергоэффективность процесса, но шероховатость получаемого покрытия по этому способу, как и по традиционному, очень высока. В дальнейшем, для достижения заданных технологических параметров получаемого изделия, также требуется высокотратная механическая операция по снятию внешнего технологического слоя и, соответственно, большие затраты времени, электроэнергии и инструментального материала.

Известно, что силикаты, из которых состоит формирующийся при нанесении покрытия пористый технологический поверхностный слой, который удаляется при механической обработке, разрушаются под воздействием плавиковой (фтористоводородной) кислоты [10]. Разложение силикатов плавиковой кислотой происходит следующим образом:



Реакция сопровождается выделением газообразного фторида кремния (SiF₄). Некоторые другие силикаты разлагаются в плавиковой кислоте частично. Поэтому можно предположить, что выдержка перед шлифованием детали с покрытием в плавиковой кислоте значительно сократит время обработки.

Цель работы – определение оптимальных режимов выдержки детали с МДО-покрытием перед механической обработкой в плавиковой кислоте и оценка энергоэффективности предложенной технологии получения износостойкого керамического композиционного покрытия с заданной шероховатостью.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследуемая технология формирования покрытия отработывалась на деталях из сплава алюминия Д16 (содержание меди – около 4 %; железа, кремния, марганца – менее 1 %) в электролитах, содержащих промышленно выпускаемые химические реактивы.

Деталь с керамическим покрытием заданной шероховатости получали в четыре технологических этапа. Два первых – это микродуговое оксидирование детали из сплава Д16 в различных по составу электролитах, обеспечивающих интенсификацию нанесения покрытия [6]. Затем проводились две дополнительные технологические операции по химическому разрушению внешнего пористого технологического слоя с низкой твердостью в плавиковой кислоте и доведению поверхности готового изделия до заданной шероховатости.

При изготовлении образцов для определения оптимальных параметров выдержки деталей с покрытием в плавиковой кислоте для этапа микродугового оксидирования были выбраны усредненные концентрации составов электролитов и токовые режимы (табл. 1).

На третьем этапе обрабатываемую деталь выдерживали в растворе плавиковой кислоты при различных температурах в течение фиксированного времени, с последующим промыванием в воде для прекращения процесса травления, удаления кислоты и частиц химически разрушенного слоя. На последнем этапе поверхность детали подвергали абразивной обработке, применяемой при нанесении подобных покрытий по традиционному способу, с фиксацией расхода абразивного материала.

Таблица 1. Режимы формирования керамического покрытия при подборе параметров выдержки в плавиковой кислоте (j – плотность тока, τ – время нанесения слоя покрытия)

№ слоя	Состав электролита	j , А/дм ²	τ , мин
I	Силикат натрия – 20 г/л; кремнефтористый натрий – 2 г/л; вода – 1 л	10	20
II	Едкий натрий – 2 г/л; жидкое стекло – 6 г/л; вода – 1 л	10	90

Для проведения сравнительных испытаний по оценке энергоэффективности и расходу инструментального материала при получении деталей с заданной шероховатостью были изготовлены образцы с керамическим покрытием с применением различных электролитов по усовершенствованной и традиционной технологиям (табл. 2). Для объективной оценки эффективности предлагаемой технологии остав электролитов и токовые режимы формирования были выбраны в возможно более широком диапазоне [4].

У сравниваемой пары образцов электролиты при нанесении второго слоя усовершенствованного покрытия и общего традиционного идентичны, что позволяет обеспечить одинаковый состав высокопрочного поликристаллического слоя, примыкающего непосредственно к алюминиевому материалу основы. Толщина сформированных покрытий до механической обработки составляла около 300 мкм, после шлифования – 100 мкм. Затем проводились операции травления детали в плавиковой кислоте, промывки и механической обработки с фиксацией временных, энергетических и инструментальных затрат.

Оксидирование деталей из сплава Д16 проводили на оборудовании, включающем в себя источник питания; гальваническую ванну; токопроводящую штангу для крепления обрабатываемого образца; компрессор для сжатого воздуха; вытяжную вентиляцию; дистиллятор. Источник питания обеспечивает высокое напряжение, которое позволяет произвести искровой пробой диэлектрической пленки оксида алюминия, образующейся на поверхности частиц алюминия в обычных

условиях, при этом силу тока и напряжение можно регулировать. Конструкция гальванической ванны предусматривает водяную рубашку охлаждения. Сжатый воздух обеспечивал перемешивание электролита через барботер, представляющий собой полую трубу с небольшими отверстиями. Через систему вытяжной вентиляции осуществлялся отвод продуктов окисления (в частности, гремучего газа).

Таблица 2. Режимы формирования керамических покрытий при оценке экономичности покрытия (j – плотность тока, τ – время нанесения слоя покрытия)

№ пары	Покрытие	Состав электролита	j , А/дм ²	τ , мин
1	Усовершенствованное (А)	І слой: силикат натрия – 20 г/л, кремнефтористый натрий – 2 г/л, вода – 1 л	5	20
		ІІ слой: едкий натрий – 0,5 г/л, жидкое стекло – 2 г/л, вода – 1 л	5	90
	Традиционное (А)	І слой: едкий натрий – 0,5 г/л, жидкое стекло – 2 г/л, вода – 1 л	5	270
2	Усовершенствованное (Б)	І слой: силикат натрия – 100 г/л, кремнефтористый натрий – 10 г/л, вода – 1 л	80	40
		ІІ слой: едкий натрий – 4 г/л, жидкое стекло – 10 г/л, вода – 1 л	80	120
	Традиционное (Б)	І слой: едкий натрий – 4 г/л, жидкое стекло – 10 г/л, вода – 1 л	80	270
3	Усовершенствованное (В)	І слой: силикат натрия – 60 г/л, кремнефтористый натрий – 6 г/л, вода – 1 л	40	30
		ІІ слой: едкий натрий – 1 г/л, жидкое стекло – 6 г/л, вода – 1 л	40	105
	Традиционное (В)	І слой: едкий натрий – 1 г/л, жидкое стекло – 6 г/л, вода – 1 л	40	270

Выдержка в плавиковой кислоте проводилась в контейнере из коррозионно-устойчивого материала. Контейнер был оборудован системой обогрева с датчиком температуры. В процессе работы установка помещалась в вытяжной шкаф. Фиксировались следующие параметры: n – концентрация плавиковой кислоты, t – ее температура и τ – время выдержки.

Рабочая поверхность детали доводилась до заданной шероховатости на шлифовальном станке, в качестве абразивного инструмента применялись круги на основе электрокорунда. Расход абразивного инструмента R определялся весовым методом и рассчитывался как отношение массы изношенного инструментального материала к обработанной площади поверхности.

Триботехнические характеристики получаемых образцов исследовались на машине трения МТ-2, разработанной на кафедре прикладной физики ТвГТУ, реализующей схему *палец – кольцо* и имеющей достаточно широкий диапазон рабочих параметров [11]. Давление в зоне контакта составило от 1 МПа, скорость вращения образца 3 800 об/мин, линейная скорость скольжения 10 м/с. Величина интенсивности износа определялась с погрешностью в 2 %. Конструкция позволяет применять любые

виды смазочных материалов, в нашем случае использовалась техническая вода. Материалом контролбразца выбрана керамика состава $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ микро-твердостью 16 ГПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Пористый технологический слой, формирующийся на первом этапе микро-дугового оксидирования, способствует глубокому проникновению плавиковой кислоты, которая разрушает силикаты, что значительно облегчает последующую механическую обработку. Анализ результатов экспериментов по определению оптимальных концентрации, температуры плавиковой кислоты, а также времени выдержки детали в ней позволил выделить три характерные зоны (рис. 1, 2).

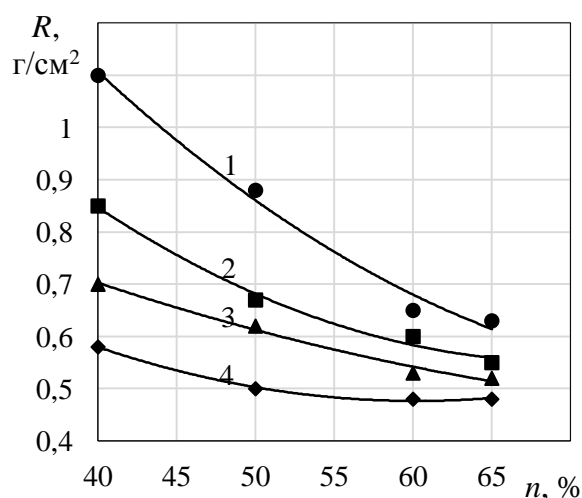


Рис. 1. Влияние температуры и концентрации плавиковой кислоты на расход абразивного материала: 1 – $t = 30$ °C; 2 – $t = 40$ °C; 3 – $t = 50$ °C; 4 – $t = 60$ °C ($\tau = 15$ мин)

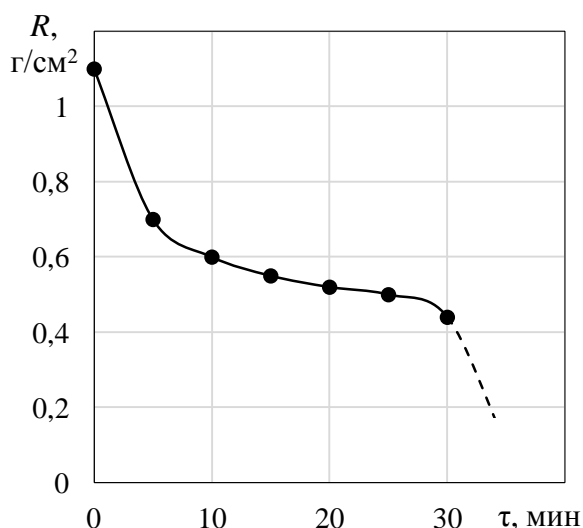


Рис. 2. Влияние времени выдержки в плавиковой кислоте на расход абразивного материала: $n = 60$ %; $t = 45$ °C

Значительный расход абразивного материала при последующей механической обработке детали наблюдается при применении плавиковой кислоты с температурой менее 30 °С, концентрацией менее 50 % и при выдержке в ней менее 5 мин. Можно предположить, что при этих условиях кислота проникает неглубоко и снижает прочность тонкой поверхностной части технологического слоя. Снижения энерго- и материалоемкости при последующей механической обработке практически не наблюдается. Противоположный результат достигается при температуре выше 60 °С, концентрации более 65 %, времени выдержки более 30 мин. Плавиковая кислота разрушает не только внешний технологический слой, но и через поры действует на основной высокопрочный поликристаллический слой покрытия и далее на материал подложки, что приводит к отслаиванию и растрескиванию покрытия, обнажению материала основания. Последующая механическая обработка практически невозможна. Таким образом, можно определить оптимальные режимы химической обработки детали с керамическим покрытием: 50...65%-й раствор плавиковой кислоты, температура 30...60 °С и время травления 5...30 мин.

Эффективность предложенной усовершенствованной технологии оценивалась временными, энергетическими и инструментальными затратами на достижение заданной шероховатости поверхности (Ra 0,8...1,6) керамического покрытия. Образцы с керамическим покрытием, полученным по усовершенствованной технологии, сравнивались с образцами, полученными по традиционной одноэтапной технологии. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Затраты на получение шероховатости Ra 0,8...1,6 на поверхности керамического материала (τ – время абразивной обработки изделия)

№ пары	Покрытие	Режим обработки в плавиковой кислоте	τ , мин	R, г/см ²
1	Усовершенствованное (А)	60%-й раствор при температуре 45 °С в течение 15 мин	1	0,32
	Традиционное (А)	–	25	2,78
2	Усовершенствованное (Б)	65%-й раствор при температуре 60 °С в течение 30 мин	2	0,48
	Традиционное (Б)	–	50	5,72
3	Усовершенствованное (В)	60%-й раствор при температуре 45 °С в течение 15 мин	1,5	0,40
	Традиционное (В)	–	37	4,61

Анализ результатов испытаний показал, что общее время полного цикла получения покрытия с заданной шероховатостью по усовершенствованной технологии сокращается в 1,6...2,3 раза по сравнению с традиционным способом, расход электроэнергии снижается в 2...2,7 раза, а расход абразивного инструмента уменьшается в 8,7...12 раз. Несмотря на то, что по усовершенствованной технологии вводится дополнительная операция – травление детали в плавиковой кислоте, расход электроэнергии существенно сокращается за счет снижения времени на последующую механическую обработку.

Проведенные триботехнические испытания показали, что керамическое покрытие, полученное по предлагаемой технологии, обладает высокой износостойкостью (рис. 3), его интенсивность линейного износа I_h определена как $(8,0 \dots 8,9) \cdot 10^{-9}$, что ниже значения полученного для покрытия, сформированного методом микродугового оксидирования по традиционной технологии и необработанного в плавиковой кислоте.

Можно предположить, данный эффект обусловлен тем, что при традиционном способе получения покрытия полное удаление силикатного хрупкого технологического слоя только механическим способом невозможно, учитывая пористую структуру покрытия. Разрушенные в процессе приработки достаточно твердые оставшиеся частицы SiO_2 поступают в зону трения и вносят существенный вклад в абразивную составляющую износа. При травлении МДО покрытия в плавиковой кислоте силикатный слой разрушается полностью химически и затем легко удаляется при механической обработке. В зоне трения в этом случае контактируют только гладкие поверхности из высокотвердой фазы оксидов Al_2O_3 и керамического материала контрообразца.

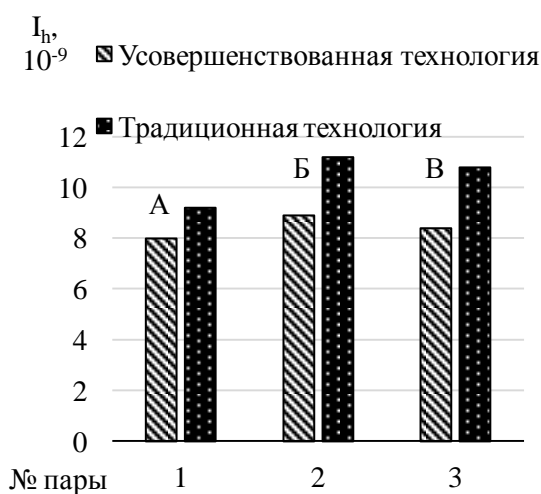


Рис. 3. Интенсивность износа образцов керамического покрытия (обозначения образцов соответствуют режимам обработки, введенным в табл. 3)

ВЫВОДЫ

Предложенная усовершенствованная технология формирования износостойкого керамического композиционного покрытия позволила значительно сократить энергетические и инструментальные затраты при получении покрытия с заданной шероховатостью за счет сокращения времени на механическую обработку, которая заключается в выдержке детали с покрытием после микродугового оксидирования в плавиковой кислоте в течение 5...30 мин, для разрушения поверхностного пористого силикатного слоя. Полученные керамические покрытия показали высокую износостойкость, превышающую характеристики покрытий, полученных по традиционной технологии.

В дальнейшем предполагается изучить обработку поверхности, полученной с помощью технологии МДО, в смеси соляной и плавиковой кислот, которая действует более активно, чем одна плавиковая кислота. К тому же в присутствии серной кислоты образующиеся фториды металлов разлагаются и переходят в сульфаты, т.е. серная кислота обеспечивает полноту вытеснения фторидов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-48-690001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Витязь П.А., Басинюк В.Л., Белоцерковский М.А., Жорник В.И., Комаров А.И., Кукареко В.А., Леванцевич М.А. Применение наноструктурных материалов и активированных методов инженерии поверхности для создания современных объектов техники // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3–4 (20–21). С. 46–66.
2. Тихоненко В.В., Шкилько А.М. Метод микродугового оксидирования // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 2. № 13 (56). С. 13–18.
3. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Применение износостойких керамических покрытий в строительстве // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 2 (30). С. 112–114.
4. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ. 2005. 368 с.
5. Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Марков Г.А. Микроплазменные электрохимические процессы // *Защита металлов*. 1998. Т. 34. № 5. С. 471–486.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов // *Трение и износ*. 2005. Т. 26. № 3. С. 279–284.
7. Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ. 2013. 522 с.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006. № 3. С. 13–16.
9. 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.
10. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа. 2005. 603 с.
11. 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.

THE INCREASE OF ENERGY EFFECTIVENESS OF THE TECHNOLOGY WEAR RESISTANT CERAMIC COATING FORMATION ON ALUMINUM

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

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

A ceramic coating based on aluminum oxides, formed on the surface of a part by the microarc oxidation method (MAO) according to the traditional technology, has a rough roughness and requires additional processing to bring it to the specified performance characteristics, which, given the high hardness of the coating, is laborious and costly. It is proposed to improve the energy efficiency of the technology for producing the finished part by introducing an operation of holding the part with an MAO coating before machining in hydrofluoric acid. As a result of multifactor experiments, the

ISSN 2687-0029. *Вестник Тверского государственного технического университета.*
Серия «Технические науки». № 3 (3), 2019

optimum modes of etching the part in hydrofluoric acid to destroy the silicate brittle technological layer were determined. The effectiveness of the improved technology was estimated by the time, energy and instrumental costs of achieving a given surface roughness of the ceramic coating obtained by the traditional and proposed method. It is shown that the power consumption is reduced by 2...2.7 times, and the consumption of the abrasive tool is 8.7 ... 12 times, by reducing the time for subsequent mechanical processing. Conducted tribological tests showed that the ceramic coating obtained by the proposed technology, has a high wear resistance.

Keywords: microarc oxidation, wear-resistant ceramic coating, energy-efficient technology, friction, wear.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 18-48-690001.

REFERENCES

1. Vityaz P.A., Basinyuk V.L., Belocerkovskij M.A., Zhornik V.I., Komarov A.I., Kukareko V.A., Levancevich M.A. Application of nanostructured materials and activated methods of surface engineering to create modern engineering objects / *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2012. No 3–4 (20–21), pp. 46–66. (In Russian).
2. Tihonenko V.V., Shkilko A.M. Method of microarc oxidation. *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*. 2012. V. 2. No 3 (56), pp. 13–18. (In Russian).
3. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Application of wear-resistant ceramic coatings in construction. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. No 2 (30), pp. 112–114. (In Russian).
4. Suminov I.V., Appelfeld A.V., Lyudin V.B., Krit B.L., Borisov A.M. Mikrodogovoe oksidirovanie (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie) [Microarc oxidation (theory, technology, equipment)]. Moscow: EKOMET. 2005. 368 p.
5. Belevantsev V.I., Terleeva O.P., Markov G.A. Microplasma electrochemical processes. *Zashchita metallov*. 1998. V. 34. No 5, pp. 471–486. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Analysis of tribo-conjugation operation on the basis of ceramic diamond-containing materials. *Trenie i iznos*. 2005. V. 26. No 3, pp. 279–284. (In Russian).
7. Gordienko P.S., Dostovalov V.A., Efimenko A.V. Mikrodogovoe oksidirovanie metallov i splavov [Microarc oxidation of metals and alloys]. Vladivostok: DVFU. 2013. 522 p.
8. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Application of microarc oxidation to obtain ceramic diamond-containing material. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2006. No 3, pp. 13–16. (In Russian).
9. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Solid-Lubricating ceramic coatings with nano- and microdisperse filler. *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2018. V. 10, pp. 150–158. (In Russian).
10. Volkov A.I., Zharskij I.M. Bolshoj himicheskij spravochnik [Large chemical directory]. Minsk: Sovremennaya shkola, 2005. 603 p.
11. 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 ehmergeticheskogo oborudovaniya*. 2017. No 10, pp. 153–157. (In Russian).

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТОРМОЗНОГО ДИСКА ВАГОНА ПРИ ЭКСТРЕННОМ ТОРМОЖЕНИИ

В.В. МЕШКОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
Д.А. ЗОРЕНКО, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: msf-tgtu@yandex.ru

© Мешков В.В., Афанасьева Л.Е., Зоренко Д.А., 2019

Представлены результаты экспериментальных исследований изменения структуры и свойств поверхностного слоя тормозного диска вагона из стали 20X13 при стендовом испытании, имитирующем работу узла торможения вагона. При испытаниях к каждой из поверхностей тормозного диска прижимались по две фрикционные накладки из металлокерамики марки МК-5 с удельным давлением 0,357...0,536 МПа в условиях экстренного торможения от скорости 160 км/ч до полной остановки. Из-за нагрева и процессов интенсивной пластической деформации в зоне фрикционного взаимодействия произошли структурные изменения на глубину до 3 мм, микротвердость стали в центральной части дорожки трения повысилась до 4 500...5 000 МПа на глубину до 1,5 мм. Установлено наличие слоя с измененным химическим составом глубиной около 20 мкм.

Ключевые слова: тормозной диск, сталь 20X13, интенсивное фрикционное взаимодействие, латеральные силы, микроструктура, микротвердость.

ВВЕДЕНИЕ

В современных высокоскоростных вагонах важным элементом тормозной системы является тормозной диск. В процессе торможения на поверхности диска происходит выделение значительного количества тепловой энергии, распространяющейся по его телу за счет явления теплопроводности. Высокие температуры и давления, возникающие при трении, приводят к трансформации структуры и являются причиной повышенного износа пар трения. Исследованию теплового режима при торможении посвящен ряд публикаций [1–6]. В частности, в работе [2] методом конечных элементов получено решение осесимметричной нестационарной тепловой задачи трения для трибосистемы *накладка – диск* с учетом взаимосвязи температуры и скорости скольжения в процессе торможения при температурозависимом коэффициенте трения. Исследовано влияние размеров накладки и диска (при условии постоянства занимаемых ими объемов) на температуру и время торможения. Однако процессы изменения структуры и свойств материалов при интенсивном фрикционном взаимодействии на настоящий момент изучены недостаточно. Их исследование необходимо для повышения надежности и долговечности тормозной системы вагона. Цель настоящей работы – экспериментальное исследование изменений структуры и свойств стали марки 20X13 при интенсивном фрикционном взаимодействии.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала тормозного диска, получившего наибольшее распространение в отечественном вагоностроении, применяют коррозионностойкую жаропрочную сталь мартенситного класса марки 20X13 [7–9]. В настоящей работе подвергали испытанию тормозной диск с внешним и внутренним диаметром 620 и

340 мм соответственно, толщиной 40 мм. Сталь 20X13 после нормализации и отпуска имеет исходную структуру сорбит с твердостью 31...32 HRC. Химический состав стали (%; масс.) согласно ГОСТ 5632–72 следующий: 0,16...0,25 С; 12...14 Cr; 0,8 Mn; 0,8 Si; 0,025 S; 0,03 P; остальное Fe.

Для имитации работы узла торможения вагона использовали чугунные колодки с накладками из металлокерамики марки МК-5. Фазовый состав материала МК-5 представляет собой твердый раствор олова в меди с включениями графита, свинца и железа [10]. Химический состав металлокерамики согласно ТУ 14-1-1291-75 (%; масс.) следующий: 9...11 Sn; 6...10 Pb; 3...5 Fe; 6...8 С; остальное Cu. Во время испытаний к тормозному диску прижимались по две накладки с обеих сторон. Площадь контакта накладки с диском составляла 337 мм², внешний диаметр накладки 610 мм, внутренний – 370 мм. Испытания тормозного диска проводились при комнатной температуре на стенде, имитирующем экстренное торможение вагона от скорости 160 км/ч до полной остановки; удельное давление между накладкой и диском изменялось в пределах 0,357...0,536 МПа.

Исследования микроструктуры материала тормозного диска после испытаний выполняли в направлении, перпендикулярном к поверхности трения, с применением методов оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6610LV. Распределения легирующих компонентов в плоскости шлифов изучали методами рентгеноспектрального микроанализа с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA Energy 350. Исследование микроструктуры стали 20X13 осуществляли после химического травления царской водкой и электролитического травления в насыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте. Качественную оценку распределения латеральных сил в поверхностных слоях тормозного диска выполняли методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Solver P47H. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 0,98 Н. В качестве индентора применяли алмазную четырехгранную пирамидку с квадратным основанием.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение микроструктуры стали 20X13 по глубине зоны фрикционного контакта представлено на рис. 1. Изображение получено с помощью оптической микроскопии по методу панорамной съемки путем сшивки нескольких полей зрения. Исходная структура стали марки 20X13 представляет собой сорбит с карбидами глобулярной морфологии. Известно, что при интенсивном фрикционном взаимодействии температура в зоне фрикционного контакта достигает 500 °С и выше [1, 2]. В центральных участках дорожки трения от поверхности фрикционного контакта на глубину до 1,5 мм из-за нагрева и процессов интенсивной пластической деформации наблюдается раздробление зеренной структуры с образованием вторичных структур.

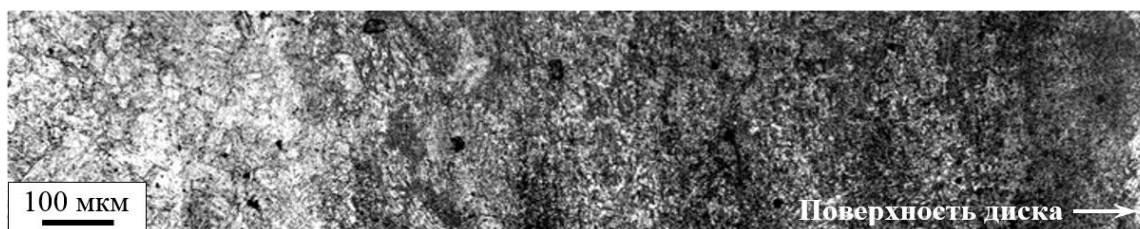


Рис. 1. Изменение микроструктуры стали 20X13 по глубине зоны фрикционного контакта

Изменение микротвердости по глубине зоны фрикционного контакта представлено на рис. 2.

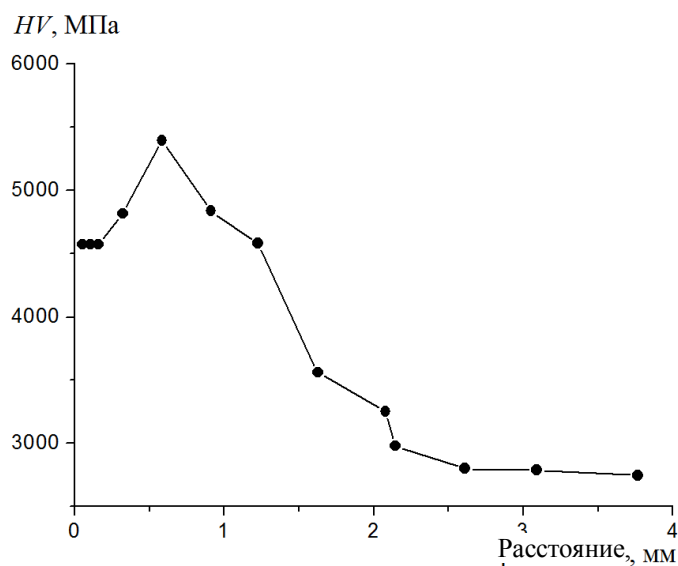


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине зоны фрикционного контакта

В центральных участках дорожки трения при торможении температуры нагрева превышали критические значения. Это привело к повышению микротвердости до 4 500...5 000 МПа на глубину до 1,5 мм, что связано со значительной пластической деформацией и образованием ультрадисперсных вторичных структур закалочного типа. Увеличение твердости вторичных структур по сравнению с исходной может оказать существенное влияние на температуру поверхности трения фрикционных элементов за счет изменения площади фактического контакта при повторных взаимодействиях фрикционных элементов по сравнению с первыми торможениями. Микроструктура и микротвердость изменяются и на большей глубине, до 3 мм, но менее интенсивно. Значительных изменений в морфологии карбидной фазы не выявлено, поскольку до и после испытаний карбиды имеют глобулярную форму.

В условиях имитации работы узла торможения вагона в зоне фрикционного контакта формируется ультрадисперсная структура и появляется возможность интенсивной диффузии атомов кислорода, примесей в поверхностные слои стали за счет структурно-термической активации. Возрастает роль термической активации, увеличивается интенсивность диффузионных процессов в пограничных дезорганизованных областях ультрадисперсной структуры [11].

Удаление поверхностного слоя в результате износа при интенсивном фрикционном взаимодействии происходит в условиях обогащения подповерхностных слоев диска легирующими элементами контртела. На рис. 3 представлена карта распределения легирующих элементов на поверхности двух шлифов, склеенных эпоксидной смолой. Верхний образец вырезан вне зоны фрикционного взаимодействия и имеет исходный химический состав и микроструктуру. Нижний образец представляет собой поперечный шлиф стали 20X13 из центральной области дорожки трения. Прямоугольниками обозначены зоны рентгеноспектрального микроанализа: спектр 1 соответствует области интенсивного фрикционного контакта. Спектры 2 и 3 характеризуют сталь 20X13 до испытаний. В таблице приведены сводные результаты химического состава стали по трем спектрам.

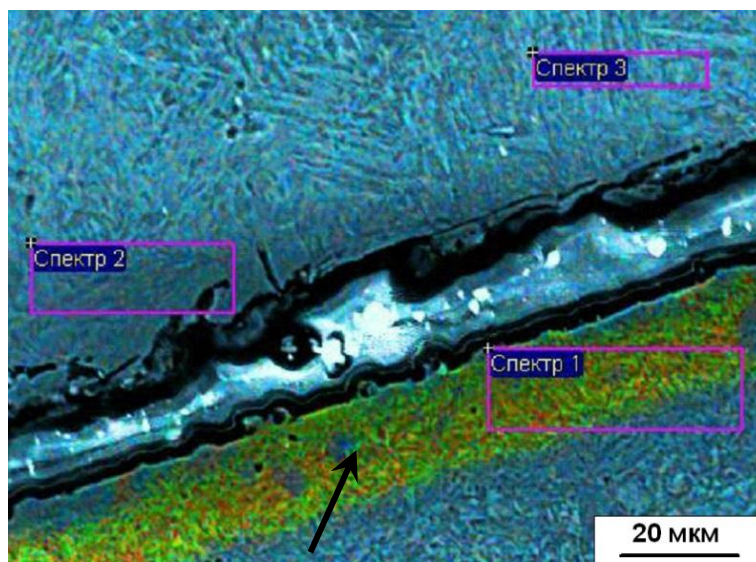


Рис. 3. Карта распределения химических элементов в зоне фрикционного контакта (спектр 1) и вне зоны фрикционного контакта (спектры 2 и 3)

Массовая доля элементов, % по спектрам (см. рис. 3)

Спектр	Si	Mn	Cu	Pb	Sn	Cr	Fe, С и примеси
1	0,59	0,46	0,33	0,09	0,08	13,12	Остальное
2	0,50	0,48	–	–	–	13,37	
3	0,50	0,42	–	–	–	13,39	

Карта распределения химических элементов показала наличие в зоне интенсивного фрикционного контакта слоя с измененным химическим составом глубиной ~20 мкм (на рис. 3 показана стрелкой). Кроме железа (основа) и хрома в этом слое выявлено содержание, %, таких элементов, как Cu – 0,33; Pb – 0,09; Sn – 0,08. Следовательно, при трении происходит перераспределение и диффузия легирующих элементов контактирующих материалов.

Из литературных данных [7] известно, что в поверхностных слоях фрикционных элементов тяжело нагруженных тормозов могут развиваться трещины, появление которых обусловлено термической неустойчивостью контакта, а также усталостные трещины. Повторные торможения негативно влияют на прочностные и фрикционные свойства материалов, создают дополнительные очаги концентрации напряжений, провоцирующие растрескивание под действием термических и механических воздействий. Ни на одном из изучаемых образцов не было обнаружено трещин в зоне интенсивного фрикционного взаимодействия.

С помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на субмикрореконтакте были качественно исследованы изменения распределения латеральных сил, характеризующих локальные трибологические свойства в поверхностных слоях тормозного диска [12]. Наиболее существенные различия в распределении латеральных сил были выявлены на образцах, вырезанных на участках, расположенных на максимальном (рис. 4а) и минимальном (рис. 4б) радиусах кольцевой дорожки трения и граничащих со свободной поверхностью. Сравнительный анализ картины распределения латеральных сил показывает наличие участков поверхности с различным значением

коэффициента трения. Это может быть обусловлено диффузией легирующих элементов контактирующих материалов, обладающих различными фрикционными свойствами, а также различным уровнем субшероховатости таких участков.

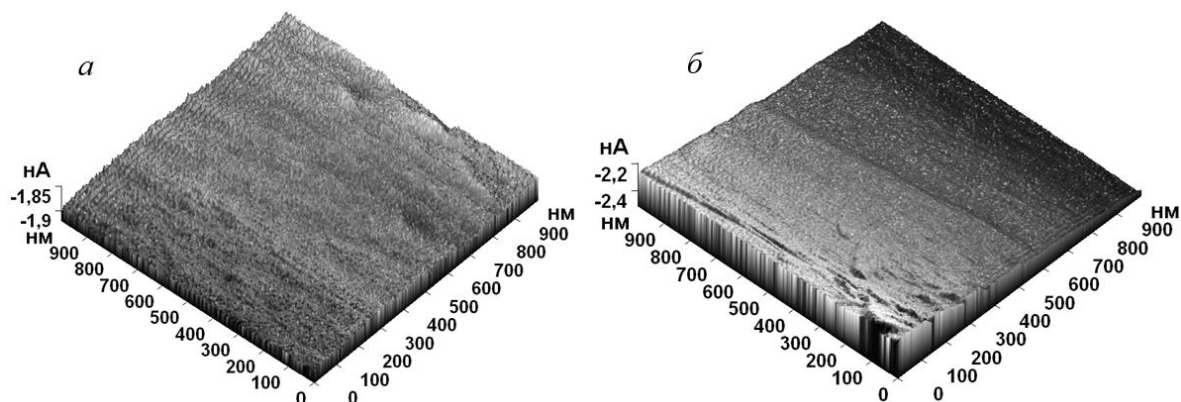


Рис. 4. АСМ распределения латеральных сил на радиусах кольцевой дорожки трения: максимальном (а) и минимальном (б)

На распределение латеральных сил влияет как профиль поверхности, так и неравномерность распределения физико-механических свойств на субмикро- и наноуровне [12]. Сравнительный анализ данных показывает, что распределение латеральных сил для образца, расположенного на максимальном радиусе кольцевой дорожки трения (см. рис. 4а), зависит прежде всего от профиля поверхности, тогда как для образца, расположенного на минимальном радиусе кольцевой дорожки трения (см. рис. 4б), оно практически не коррелирует с профилем поверхности, что свидетельствует о неравномерном распределении латеральных сил по поверхности.

Материал тормозного диска претерпел трансформацию структуры под влиянием интенсивного фрикционного взаимодействия на глубину до 3 мм. Слои, лежащие глубже 3 мм, характеризуются практически одинаковой картиной распределения латеральных сил по всей ширине дорожки трения и имеют структуру, резко отличающуюся от структуры поверхностного слоя указанной выше толщины. Эти данные совпадают с результатами проведенных металлографических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы изменения структуры и свойств коррозионностойкой стали 20Х13, происходящие в результате интенсивного фрикционного взаимодействия. На глубине до 3 мм структурные изменения связаны с нагревом и процессами интенсивной пластической деформации. Отмечено повышение микротвердости на отдельных участках до 5 000 МПа. Методами рентгеноспектрального микроанализа определен химический состав локальных участков стали 20Х13 и составлены карты распределения химических элементов. Показано, что на глубину до 20 мкм произошло обогащение подповерхностных слоев диска легирующими элементами контртела. С помощью атомно-силовой микроскопии качественно оценены изменения распределения латеральных сил в поверхностных слоях тормозного диска.

БЛАГОДАРНОСТИ

Металлографические исследования выполнены с использованием оборудования регионального центра коллективного пользования на базе Тверского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин А.А. Расчет температурных полей и напряжений в деталях дискового тормоза скоростного вагона // *Вестник ВНИИЖТ*. 2010. № 6. С. 38–42.
2. Евтушенко А., Гжесь П. Влияние размеров накладки и диска на температуру и время торможения // *Трение и износ*. 2015. Т. 36. № 4. С. 368–374.
3. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments / P.C. Verma, L. Menapace, A. Bonfanti, R. Ciudin, S. Gialanella, G. Straffelini // *Wear*. 2015. V. 322. P. 251–258.
4. Wahlström J.A comparison of measured and simulated friction, wear, and particle emission of disc brakes // *Tribology International*. 2015. V. 92. P. 503–511.
5. Bian G., Wu H. Friction and surface fracture of a silicon carbide ceramic brake disc tested against a steel pad // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. V. 35. № 14. P. 3797–3807.
6. Neis P.D., Ferreira N.F., Silva F.P. Comparison between methods for measuring wear in brake friction materials // *Wear*. 2014. V. 319. № 1. P. 191–199.
7. Чичинадзе А.В., Гинзбург А.Г., Кожемякина В.Д. Оценка режима работы пары трения фрикционного тормоза нового высокоскоростного железнодорожного подвижного состава на стадии проектирования // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 1992. № 6. С. 29–41.
8. Мешков В.В., Хренов В.Л., Вареца Р.С., Зоренко Д.А. Исследование поверхностных слоев высоколегированных сталей при торможении // *Трение и износ*. 2010. Т. 31. № 4. С. 371–376.
9. Трансформация структуры стали 20X13 при интенсивном фрикционном взаимодействии / В.В. Мешков, Д.А. Зоренко, И.А. Барабонова, Л.Е. Афанасьева // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 1. С. 11–17.
10. Ильющенко А.Ф., Дмитриевич А.А., Лешок А.В. Исследование микропрофиля поверхности диска стального, работающего в различных узлах трения в паре с металлокерамическим фрикционным материалом МК-5 // *Трение и износ*. 2014. Т. 35. № 3. С. 250–257.
11. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. [и др.]. Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техника, 1976. 296 с.
12. Мешков В.В., Зоренко Д.А., Афанасьева Л.Е., Сергеев Д.А. Качественная оценка латеральных сил на поверхности тормозного диска // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2016. № 9. С. 4–7.

CHANGING STRUCTURE AND PROPERTIES OF CARRIAGE BRAKE DISC AT EMERGENCY BRAKING

V.V. MESHKOV, Dr Sci, L.E. AFANASIEVA, Cand Sci,
D.A. ZORENKO, Cand Sci

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

The results of experimental studies of changes in the structure and properties of the brake disc made of steel 20X13 at bench test simulating the operation of the braking unit are presented. During the tests two friction plates of МК-5 metal-ceramic were pressed against each of the surfaces with a specific pressure of 0.357...0.536 MPa under emergency braking from the speed of 160 km/h to the complete stop. It is established that

due to the heat and the processes of intensive plastic deformation in the zone of frictional interaction of structural changes occurred to a depth of 3 mm, the microhardness of steel in the central part of the track friction increased to 4 500...5 000 MPa at a depth of 1.5 mm. The presence of the layer with changed chemical composition up to the depth of about 20 μm is stated.

Keywords: brake disc, 20X13 steel, intensive friction interaction, lateral forces, microstructure, microhardness.

ACKNOWLEDGMENTS

These studies were performed using the equipment of the Regional Center of Tver State University.

REFERENCES

1. A.A. Mishin. Calculation of temperature fields and voltages in details of a high-speed car disk brake. *Vestnik VNIIZHT*. 2010. No 6, pp. 38–42. (In Russian).
2. Evtushenko A., Gzhes P. Influence of the dimensions of the lining and the disc on the temperature and braking time. *Treniye i Iznos*. 2015. V. 36. No 4, pp. 368–374. (In Belarus).
3. Verma P.C., Menapace L., Bonfanti A., Ciudin R., Gialanella S., Straffelini G. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear*. 2015. V. 322, pp. 251–258.
4. Wahlström J.A comparison of measured and simulated friction, wear, and particle emission of disc brakes. *Tribology International*. 2015. V. 92, pp. 503–511.
5. Bian G., Wu H. Friction and surface fracture of a silicon carbide ceramic brake disc tested against a steel pad. *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. V. 35. No 14, pp. 3797–3807.
6. Neis P.D., Ferreira N.F., Silva F.P. Comparison between methods for measuring wear in brake friction materials. *Wear*. 2014. V. 319. No 1, pp. 191–199.
7. Chichinadze A.V., Ginzburg A.G., Kozhemyakina V.D. Evaluation of the operating mode of a friction brake pair of a new high-speed railway rolling stock at designing. *Problemy Mashinostroyeniya i Avtomatizatsii*. 1992. No 6, pp. 29–41. (In Russian).
8. Meshkov V.V., Khrenov V.L., Varetsa R.S., Zorenko D.A. Study of the surface layers of high-alloyed steels in braking. *Treniye i iznos*. 2010. V. 31. No 4, pp. 371–376. (In Belarus).
9. Meshkov V.V., Zorenko D.A., Barabonova I.A., Afanasieva L.E. Transformation of 20X13 steel structure during intensive friction interactions. *Treniye i iznos*. 2017. V. 38. No 1, pp. 11–17. (In Belarus).
10. Ilushchenko A.F., Dmitrovich A.A., Leshok A.V. Studying microprofile of surface of steel disk that operates in various friction units in a pair with MK-5 metal-ceramic frictional material. *Treniye i Iznos*. 2014. V. 35. No 3, pp. 250–257. (In Belarus).
11. Kostetsky B.I., Nosovsky I.G., Karaulov A.K. [et al]. *Poverkhnostnaya prochnost materialov pri trenii* [The surface strength of materials under friction.]. Kiyev: Tekhnika. 1976. 296 p.
12. Meshkov V.V., Zorenko D.A., Afanasieva L.E., Sergeev D.A. Qualitative assessment of lateral forces on the surface of the brake disc. *Mechanics and Physics of Processes on the Surface and in the Contact of Solids, Parts of Technological and Power Equipment*. 2016. No 9, pp. 4–7.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА МИКРОПОЛЗУЧЕСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ

В.В. ГАРАНИКОВ, д-р техн. наук, О.В. ДОРОГОВ, ст. преп.

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: mehanika06@mail.ru

© Гараников В.В., Дорогов О.В., 2019

Выполнены экспериментальные исследования влияния скорости нагружения, термообработки и разгрузки (полной и частичной) на величину микроползучести алюминиевых сплавов. Показано, что основным фактором, влияющим на величину микроползучести, является разгрузка. Например, частичная разгрузка (30 % от достигнутого уровня напряжений) приводит к существенному снижению максимальной деформации микроползучести в сравнении с полной разгрузкой (до 30 % при испытаниях сплавов 01570 и АМг6). При проведении испытаний с предварительной разгрузкой в начальной стадии обнаружено явление временной задержки процесса ползучести (порядка 30...90 с), причем в опытах с частичной разгрузкой интервал задержки ползучести больше, чем в опытах с полной.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, скорость нагружения, микроползучесть, полная и частичная разгрузка, явление задержки ползучести, термообработка.

ВВЕДЕНИЕ

В точном машиностроении деформационную стабильность оценивают характеристиками пластичности при кратковременном и длительном нагружении образцов, используя очень малую величину остаточной деформации. Основной характеристикой деформационной стабильности может служить прецизионный предел текучести $\sigma_{0,0001}$ (или сопротивление микротекучести) [1]. Эти показатели определяются напряжением, при котором после разгрузки образца возникает остаточная деформация $(1...2)10^{-6}$ относительных единиц. Для некоторых металлов, широко применяемых в приборостроении, деформации ползучести обнаруживаются при комнатной температуре и напряжениях, составляющих 50...80 % от $\sigma_{0,0001}$.

Целью исследования являлась разработка методики проведения опытов, позволяющая зафиксировать микроползучесть ряда конструкционных материалов по величине, значительно меньшей предела текучести, составляющей $\sigma = (0,5...0,6)_{0,2}$, в условиях повышенных, нормальных и пониженных температур. Обзор работ по проведению подобных испытаний [2–6] позволил учесть накопленный опыт. При проведении испытаний необходима виброизоляция и стабилизация температуры в пределах ± 50 °С. В задачу исследования входило изучение температуры испытаний на величину максимальной деформации микроползучести, а также влияния скорости нагружения, термообработки и разгрузки.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ НА МИКРОПОЛЗУЧЕСТЬ

Испытания проводились на сплошных цилиндрических образцах с резьбовой головкой из алюминиевых сплавов АМг6 и 01570 при температуре +50 °С на машине кинематического типа FPZ-100/1 в термостате (рис. 1), который предназначен для поддержания постоянной температуры образца при длительных механических испытаниях. Верхний предел для данного термостата +60 °С. Температура могла отклоняться от заданной на $\pm 0,1$ °С. Методика испытаний подробно описана в работах [7, 8]. Отметим особенности выполняемого эксперимента в части модернизации термостата и регулятора стабилизации нагрузки. В комплект термостата входят камера, вентилятор, электронагревательный элемент, электронный термометр, тиристорный усилитель мощности с регулятором. В отличие от термостата, применявшегося ранее при повышенных температурах, камера выполнена не из металла, а из дерева (рис. 1). Это позволило снизить теплоотдачу и, следовательно, уменьшить тепловую инерционность, т.е. ускорить выход на заданную температуру. Кроме того, такая термокамера более технологична и удобна в работе. Вынос двигателя за пределы камеры устранил его перегрев от электронагревательного элемента и тем самым исключил дополнительный нерегулируемый источник тепла в камере [4]. Регулирование температуры осуществляется не автоматическим включением-выключением электронагревателя, как ранее, а путем плавного изменения через него силы тока. Это позволило увеличить точность поддержания заданной температуры. Работа термостата заключается в следующем. Вентилятор, закрепленный в камере термостата, создает воздушную струю, направленную на образец. Электронагреватель питается от тиристорного усилителя мощности. Регулятор устанавливает ток через нагреватель таким образом, чтобы измеренная температура в камере равнялась заданной. Датчик электронного термометра закреплен вблизи образца. Схема электронного термометра показана на рис. 2.

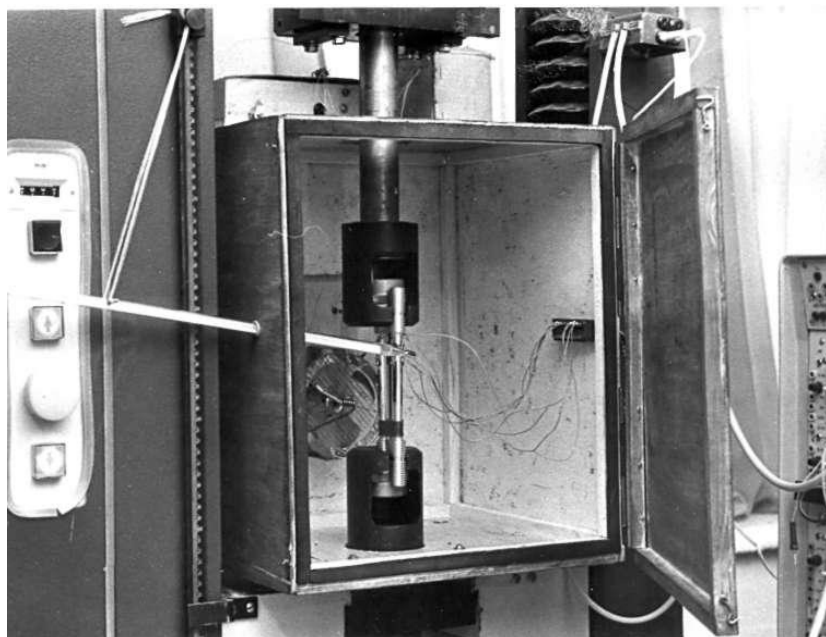


Рис. 1. Внешний вид термостата

Датчиком температуры служит кремниевый диод КД512А. Верхний предел температур термостата (+120 °С) обусловлен верхней рабочей температурой этого диода. Коэффициент преобразования термометра 10 мВ/с. Испытательная машина FPZ-100/1 оборудована регулятором усилий. Это позволило задавать как пропорциональный, так и пропорционально-интегральный закон регулирования нагрузки.

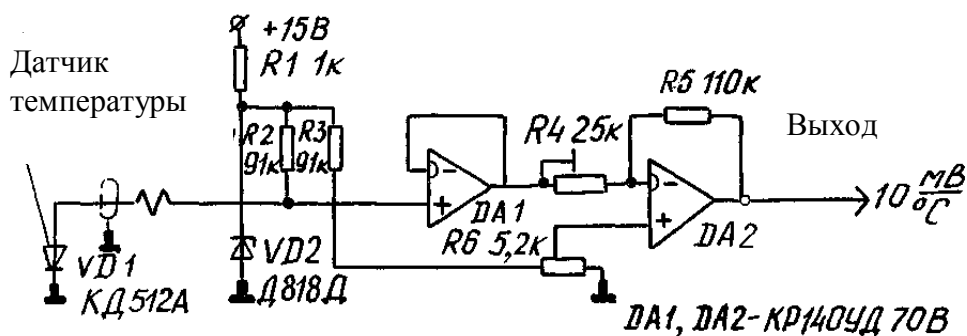


Рис. 2. Схема электронного термометра

Для измерения деформаций ползучести использованы тензорезисторы типа 5П1-20-400-А-12, которые наклеивались в среднем сечении образца. Данный тип тензорезисторов, согласно техническому паспорту, предназначен для измерения деформаций в интервале температур от -100 до $+200$ °С. Сигналы, соответствующие напряжению и деформации, регистрировались на цифropечатающем устройстве Ф5033К.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ

Испытания проводились с тремя скоростями перемещения траверсы испытательной машины: 0,04; 0,28 и 0,8 мм/мин. Данные скорости регламентированы следующим: 0,04 мм/мин – минимально возможная регулируемая скорость перемещения траверсы; 0,8 мм/мин – максимально возможная скорость, при которой в момент останова нагружения не происходит превышения задания. Скорости деформирования образцов ($\dot{\epsilon}$, 1/с) определялись после обработки результатов испытаний. Естественно, что в каждой серии опытов для отдельных образцов наблюдался разброс по скорости деформирования. Он определялся особенностью размера и структуры каждого образца, погрешностью при установке базы испытаний, а также погрешностью электронной схемы регулирования скоростей перемещения траверсы.

Серии испытаний по исследованию влияния скорости проводились при нагрузке $\sigma = 0,7\sigma_{02}$, где σ_{02} – предел текучести материала. При данной нагрузке, как показали ранее проведенные эксперименты [9], можно достоверно фиксировать деформации микроползучести. В каждой серии было испытано по три образца. Усредненные кривые микроползучести по результатам испытаний представлены на рис. 3. Из графиков видно, что для больших скоростей нагружения в начальной стадии процесса характерна большая скорость деформации ползучести.

Зависимость максимальной деформации ползучести от скорости нагружения представлена на рис. 4. При малых скоростях процесс ползучести в начальной стадии протекает менее интенсивно. Кроме того, необходимо отметить, что при всех реализованных скоростях нагружения ползучесть для данного уровня нагрузки является ограниченной.

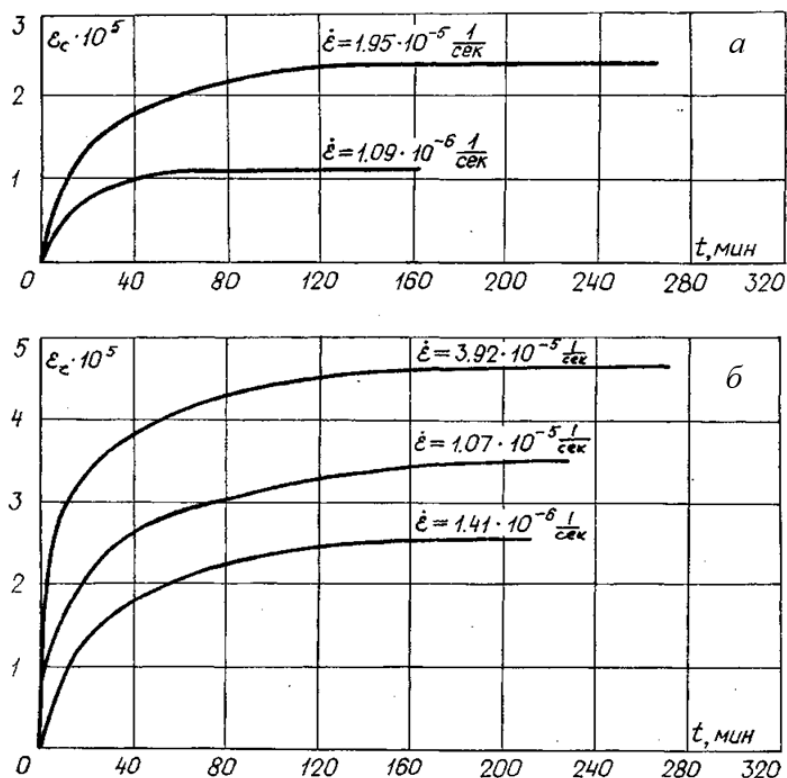


Рис. 3. Кривые микроползучести для сплавов АМг6 (а) и 01570 (б)

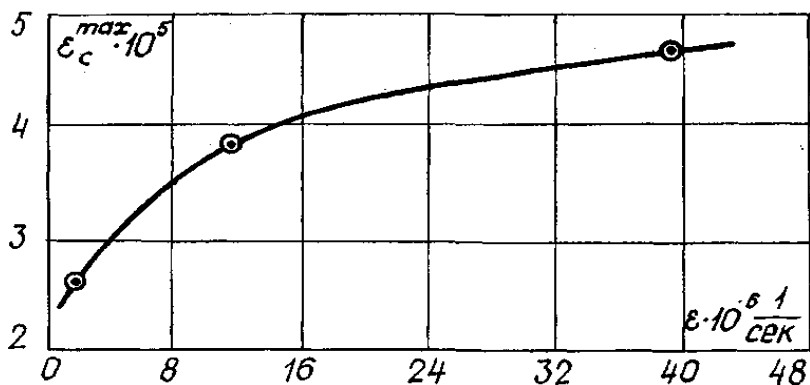


Рис. 4. Зависимость максимальной деформации микроползучести от скорости нагружения

Обратимся теперь к количественным результатам испытаний. Существенных различий в величинах максимальных деформаций ползучести при изменении скорости нагружения не получено. Так, при увеличении скорости нагружения образцов из сплава 01570 почти в 30 раз максимальная деформация ползучести увеличилась в 1,8 раза. При этом необходимо учитывать малый уровень измеряемых деформаций. Время прекращения ползучести для всех испытаний можно считать постоянным для различных скоростей нагружения. Оно в среднем составило два часа.

Наибольшее различие в величинах деформаций ползучести наблюдается в интервале малых скоростей нагружения (до $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{с}}$). При больших скоростях

расхождение в величинах максимальных деформаций ползучести становится незначительным. Поэтому для получения более достоверных результатов и уменьшения разброса экспериментальных данных необходимо при нагрузке $\sigma = 0,7\sigma_{02}$ производить нагружение образцов сплава 01570 со скоростями порядка $\epsilon = (16...24) 1 \cdot 10^{-5} 1/с$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СПЛАВА 01570

Испытанию были подвергнуты семь партий образцов из сплава 01570 в состоянии поставки, а также после термообработки при температурах нагрева 320, 350, 370, 400, 420 и 450 °С. В каждой партии испытывались по пять образцов. Один из них был использован для испытания на одноосное растяжение с целью получения диаграммы растяжения. На рис. 5 представлены начальные участки диаграммы растяжения данного сплава. В таблице приведены значения условного предела текучести от термообработки.

Как видно из представленных данных, термообработка практически не повлияла на механические характеристики данного материала. Максимальное расхождение величины предела текучести составило 6 %. Это различие обусловлено обычным разбросом экспериментальных результатов.

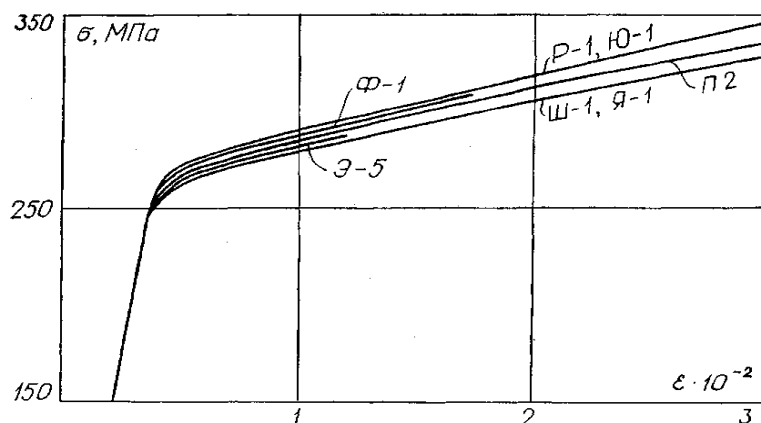


Рис. 5. Начальные участки диаграммы деформирования

Значение условного предела текучести σ_{02} , МПа

Термообработка	БезТО	320°	350°	370°	400°	420°	450°
Маркировка образца	Р	П	Ф	Ш	Э	Ю	Я
σ_{02} , МПа	276	274	275	260	267	276	260

Испытания на ползучесть проводились при нагрузке $\sigma = 0,7\sigma_{02}$ (195 МПа). В этом случае достоверно фиксируется деформация ползучести и, кроме того, возможно использовать результаты экспериментов, описанных выше. Нагружение всех образцов проводилось с одинаковой скоростью перемещения траверсы. Среднее значение скорости деформации составило $\epsilon = 1 \cdot 10^{-5} 1/с$. Результаты испытания представлены на рис. 6. Светлые кружочки на рисунке отвечают результатам испытания отдельного образца, а темные – их средняя величина в пределах отдельной партии. Как видно из этого рисунка, значительного влияния термообработки на величину максимальной деформации микроползучести не обнаруживается. Расхождения средних значений этих

величин находятся в пределах погрешности измерения деформации микроползучести тензорезисторами. При этом провести качественную оценку все же можно. Наблюдается снижение значения максимальной деформации микроползучести у образцов, прошедших термообработку при температурах 320 и 350 °С. Наибольшее значение этого показателя получено на нетермообработанных образцах. Для других партий средние значения деформаций микроползучести получились практически одинаковыми.

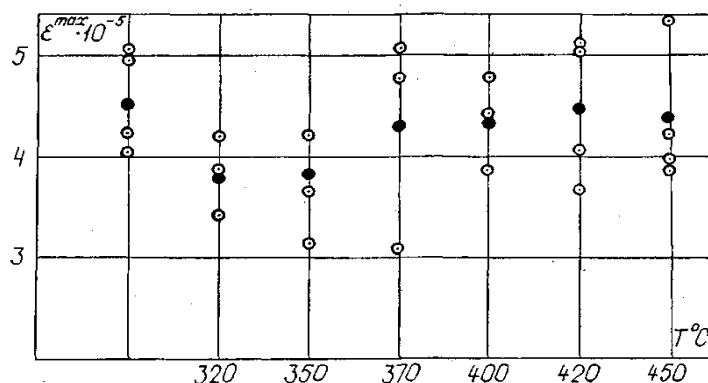


Рис. 6. Зависимость максимальной деформации микроползучести от температуры нагрева при термообработке

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗГРУЗКИ

Для исследования влияния разгрузки материала на величину максимальной деформации ползучести были реализованы две программы испытаний: с частичной и полной разгрузкой. По первой программе образец нагружался до нагрузки $\sigma = 0,7\sigma_{02}$, затем производилась разгрузка до уровня $\sigma = 0,5\sigma_{02}$, после чего образец снова нагружался до $\sigma = 0,7\sigma_{02}$, при котором выполнялось его испытание на микротекучесть. Вторая программа предусматривала полную разгрузку ($\sigma = 0$) и испытание при той же нагрузке, равной $\sigma = 0,7\sigma_{02}$. Образцы из сплава 01570 были взяты из партии термообработанных при температуре нагрева 320 °С. Всего было испытано пять образцов: три по первой и два по второй программе. Результаты испытаний сплава 01570 представлены в виде усредненных кривых ползучести на рис. 7а, где кривые 1, 2, 3 соответствуют испытаниям без разгрузки, с полной и частичной разгрузкой.

С целью повышения надежности измерения деформаций ползучести сплава АМг6, при которой производились испытания на микротекучесть, уровень нагрузки был повышен до $\sigma = 0,8\sigma_{02}$. Это объясняется двумя причинами: во-первых, величины максимальной деформации ползучести при более низких уровнях напряжения для сплава АМг6 находятся вблизи нижней границы диапазона измерения деформаций; во-вторых, в силу ряда причин для измерения деформаций использовались тензорезисторы с меньшей базой (15 мм), что несколько снижало их чувствительность. Результаты испытания сплава АМг6 представлены на рис. 7б.

Кривые 1, 2, 3 соответствуют испытаниям на ползучесть без разгрузки, с полной и частичной разгрузкой. Анализ результатов испытаний по двум сплавам показывает, что разгрузка уменьшает ползучесть данных сплавов, причем более значительное влияние оказывает частичная разгрузка, при которой наблюдается наименьший уровень деформаций ползучести. Данное различие в сопоставлении с результатами испытаний образцов без разгрузки по величине максимальной деформации ползучести составило 26 % для сплава 01570 и 31 % для АМг6.

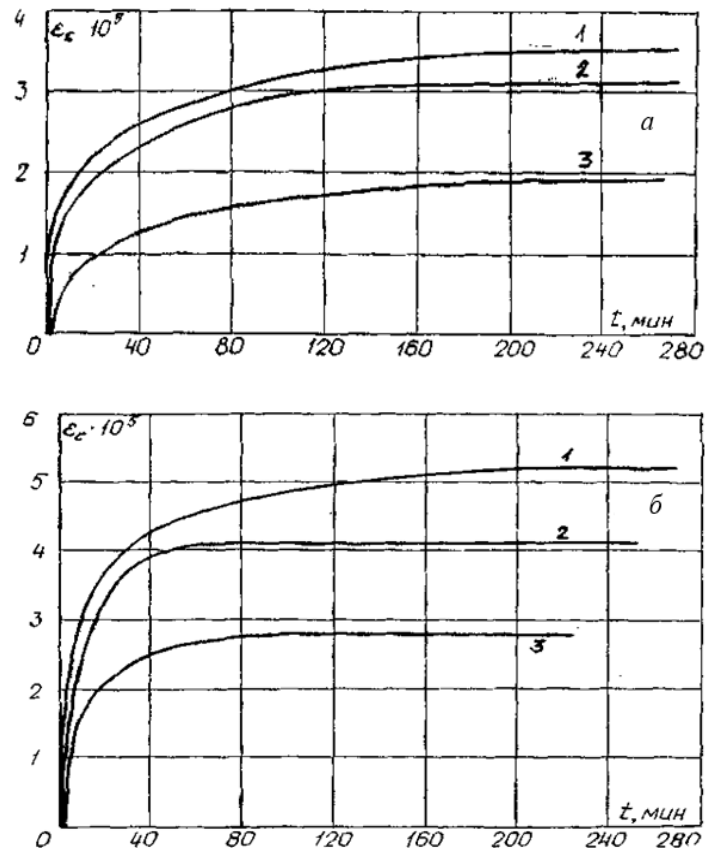


Рис. 7. Кривые микротекутости для сплавов 01570 (а) и АМг6 (б)

Важная особенность поведения материала выявлена при проведении испытаний с разгрузкой. После полной или частичной разгрузки в начальный момент испытания на ползучесть наблюдается задержка ползучести. В первые 30...90 с с начала испытаний ползучесть не обнаруживается, причем при частичной разгрузке время задержки ползучести больше, чем при полной. Начальные участки кривых ползучести представлены на рис. 8. Таким образом, серия опытов показала, что влияние разгрузки материала на его ползучесть существенно.

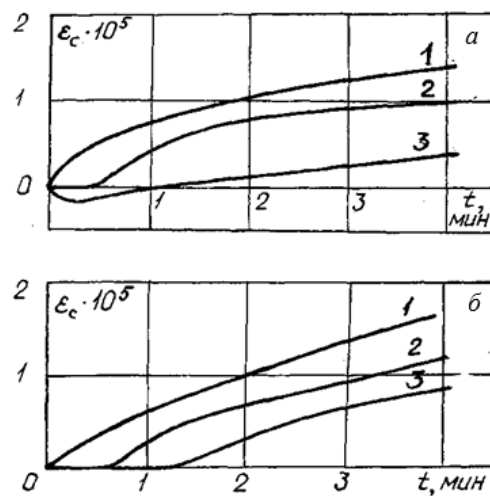


Рис. 8. Начальные участки кривых микроползучести для сплавов 01570 (а) и АМг6 (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания показали, что из всех рассмотренных факторов, влияющих на размерную стабильность, наиболее существенным является разгрузка, причем частичная. Полученный результат может иметь большое практическое значение. Размерную стабильность конструкции можно повысить путем предварительной разгрузки (тренировки) ее отдельных элементов или всей конструкции в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение. 1974. 255 с.
2. Федосов С.А., Пешик Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием (современные зарубежные методики). М.: МГУ. 2004. 100 с.
3. Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С., Макаrchук А.Е. Интерферометрическая установка для определения упругих постоянных материалов при повышенной температуре. *Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: НИЦ МС. 2016. № 1. С. 107–110.
4. Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С., Макаrchук А.Е. Интерферометрическое устройство для определения температурного коэффициента линейного расширения твердых тел. *Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: НИЦ МС. 2016. № 1. С. 111–115.
5. Комарь Е.В., Колупаева С.Н., Ковалевская Т.А. Математическое моделирование пластической деформации скольжения в условиях ползучести. *Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: НИЦ МС. 2018. № 3. С. 114–117.
6. Волков И.А., Шишули Д.Н., Тарасов И.В., Сметанин И.В. Математическая модель нестационарной ползучести металлов при сложном напряженном состоянии. Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела: *Межвузовский сборник научных трудов под ред. В.Г. Зубчанинова*. Вып. 1. Тверь: ТвГТУ. 2017. С. 4–14.
7. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография. Кн. 1: Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ. 2003. 172 с.
8. Гараников В.В., Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л. Экспериментальная пластичность: монография. Кн. 2: Процессы сложного нагружения. Тверь: ТГТУ. 2004. 184 с.
9. Зубчанинов В.Г., Гараников В.В., Саади Дж.М. Исследование кратковременной ползучести сплава 01570 при повышенных температурах // *Актуальные проблемы теории пластичности и устойчивости*. Тверь: ТПИ, 1991. С. 28–33.

THE RESEARCH OF THE INFLUENCE DIFFERENT FACTORS ON MICRO-CREEP CONSTRUCTION ALLOYS

V.V. GARANIKOV, Dr. Sci, O.V. DOROGOV

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: mexanika06@mail.ru

Experimental studies of the effect of the loading rate, heat treatment and unloading (full and partial) on the microcreep of aluminum alloys were performed. It is shown that unloading is the most significant factor influencing the magnitude of

microcreep. In particular, it was found that partial unloading (30 % of the achieved stress level) leads to a significant decrease in the maximum microcreep strain in comparison with full unloading (up to 30 % when testing alloys 01570 and AMg6). When conducting tests with preliminary unloading in the initial stage, the phenomenon of a time delay of the creep process was detected (about 30...90 s). Moreover, in experiments with partial unloading, the creep delay interval is longer than in experiments with full.

Keywords: experimental studies, loading rate, micro-creep, full and partial unloading, the phenomenon of creep delay, heat treatment.

REFERENCES

1. Khenkin M.L., Lokshin I.Kh. Razmernaya stabilnost metallov i splavov v tochnom mashinostroyenii i priborostroyenii [Dimensional stability of metals and alloys in precision engineering and instrument making]. Moscow: Mashinostroenie. 1974. 255 p.
2. Fedosov S.A., Peshik L. Opredeleniye mekhanicheskikh svoystv materialov mikroindentirovaniyem (sovremennyye zarubezhnyye metodiki) [Determination of the mechanical properties of materials by microindentation (modern foreign techniques)]. Moscow: MSU. 2004. 100 p.
3. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zavyalov E.S., Makarchuk A.E. Interferometric apparatus for determining elastic constant materials at elevated temperature. Fundamentals of mechanics. *Proceedings of the international scientific-practical conference*. Novokuznetsk: SIC MS. 2016. No 1, pp. 107–110. (In Russian).
4. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zavyalov E.S., Makarchuk A.E. Interferometric device for determining the temperature coefficient of linear expansion of solids. Fundamentals of mechanics. *Proceedings of the international scientific-practical conference*. Novokuznetsk: SIC MS. 2016. No 1, pp. 111–115. (In Russian).
5. Komar E.V., Kolupaeva S.N., Kovalevskaya T.A. Mathematical modeling of plastic slip strain under creep conditions. Fundamentals of mechanics. *Proceedings of the international scientific-practical conference*. Novokuznetsk: SIC MS, 2018. No 3, pp. 114–117. (In Russian).
6. Volkov I.A., Shishuli D.N., Tarasov I.V., Smetanin I.V. Mathematical model stationary creep of metals under complex stress state. Mathematical modeling and experimental mechanics of a deformable body. *Interuniversity collection of scientific papers edited by Zubchaninov V.G.* Issue 1, Tver: Tver State Technical University. 2017, pp. 4–14. (In Russian).
7. Garanikov V.V., Zubchaninov V.G., Okhlopkov N.L. Eksperimentalnaya plastichnost: Monografiya. Kniga 1: Protsessy slozhnogo deformirovaniya [Experimental plasticity: Monograph. Book 1: Processes of complex deformation]. Tver: TSTU. 2003. 172 p.
8. Garanikov V.V., Zubchaninov V.G., Okhlopkov N.L. Eksperimentalnaya plastichnost: Monografiya. Kniga 2: Protsessy slozhnogo nagruzheniya. [Experimental plasticity: Monograph. Book 2: The processes of complex loading]. Tver: TSTU. 2004. 184 p.
9. Zubchaninov VG, Garanikov VV, Saadi J. The research of the short-term creep of alloy 01570 at elevated temperatures. *Actual problems of the theory of plasticity and stability*. Tver: TPI. 1991, pp. 28–33. (In Russian).

СТРУНА – МОДЕЛЬ ТРАЕКТОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

С.М. СЛОБОДЯН, д-р техн. наук

Тверской государственной технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: sms_46@ngs.ru

© Слободян С.М., 2019

Для исследования возможностей описания отдельных явлений сварочных процессов в работе предложена математическая модель электрической дуги как формы, соответствующей уравнению струны, и рассмотрено влияние основных параметров электрической дуги на процесс ее движения. Показана целесообразность применения математической модели вида уравнения струны и волнового уравнения для описания некоторых явлений, характерных для сварочных процессов.

Ключевые слова: электрическая дуга, низкотемпературная плазма, уравнение струны, математическая модель, движение электрической дуги.

ВВЕДЕНИЕ

Управление параметрами электрической дуги представляет собой актуальную проблему современного развития физики плазменных и сварочных технологий, создания электрических аппаратов и устройств в области энергетики. Надежность работы многих дуговых устройств и аппаратов в значительной мере определяется параметрами электрической дуги как физического явления. Несмотря на то, что электрическая дуга была открыта В.В. Петровым более 210 лет тому назад и ныне широко используется в различных областях техники и физического эксперимента, многое в ней еще остается невыясненным. Одна из таких особенностей этого сложного явления, привлекающего к себе в последние десятилетия внимание исследователей и конструкторов, связана с наличием в электрической дуге нестационарности движения потоков электронов (плазмы). Установлено, что особенности движения этих потоков заметно влияют на динамику горения и затухания электрической дуги. Рассмотрение динамики поведения шнура дуги необходимо для понимания процессов, происходящих в сварочных аппаратах и дугогасительных устройствах.

Динамика поведения электрической дуги может в одних случаях улучшить, а в других – ухудшить работу дуговых аппаратов. Явление образования электрического разряда необходимо учитывать при анализе электрического износа контактов. Электрические разряды, особенно дуговые, способствуют повышенному износу контактов. Форма траектории потока электронов как плазменного шнура оказывает существенное влияние на динамику движения электрической дуги между электродами контакта [1–3]. Плазменный шнур подобен струе жидкости или газа, движущейся с большой скоростью, обладает стабилизирующим действием и способствует устойчивому формированию электрической дуги в пространстве электродов [3]. Расширение и углубление знаний о строении материи привело к представлению о том, что помимо ранее известных состояний вещества (твердого, жидкого и газообразного) существует четвертое состояние – плазменное. Электрическая дуга понимается как низкотемпературная плазма, через которую течет ток. Высокотемпературная плазма образуется при термоядерных реакциях [1–3]. Для

технологических целей и решения физических задач, связанных с использованием высокой температуры дуги и концентрированных в ней потоков энергии, нужна стабильно горящая, устойчивая дуга.

Уже давно было замечено, что в ряде случаев электрическая дуга отклоняется от кратчайшего расстояния между электродами и принимает весьма причудливую форму, не подвергаясь видимому воздействию внешних сил. При этом из опорных точек электрической дуги могут исходить «филаменты» – быстро перемежающиеся выбросы пламени (факелы). Этому явление трактовалось по-разному. Меккер [1] обратил внимание на то, что причиной возникновения факелов могут быть электромагнитные силы, создаваемые собственным магнитным полем электрической дуги и сжимающие ее. Это явление носит название сжимающего эффекта (или «пинч-эффекта»). В газообразной среде, какой является электрическая дуга, разность давлений порождает поток электронов (плазму), исходящий из области уменьшенной площади сечения. Для обозначения этих областей некоторые авторы применяют термин «струи плазмы». При этом следует отметить, что электромагнитное давление и порождаемый им стягивающий эффект – это весьма важная, но не единственная причина возникновения «струи плазмы» [1–3].

Вышеизложенное позволяет видеть, что в формировании электрической дуги участвуют разные явления. Основная роль принадлежит электромагнитным, газодинамическим, испарительным и взрывным процессам, которые проявляются по-разному, в зависимости от условий горения дуги. Электромагнитные силы преобладают, придавая электрической дуге направленную форму. Характеристики дуги и особенности ее поведения в значительной мере определяются формами, которые зависят от расположения электродов. Для решения вопросов, связанных, например, с износом контактов электрических аппаратов, большое значение имеет поведение потоков электронов (плазмы) в узком зазоре между динамическими контактами. Поэтому исследованию формы и поведения потока плазмы в малых зазорах между электродами уделяется большое внимание. Движение дуги переменного тока в магнитном поле сопровождается рядом особенностей, обусловленных свойством разряда. Под действием электромагнитных сил F , пропорциональных квадрату тока, дуга движется между электродами с переменной скоростью. Явления, связанные с движением электрической дуги, имеют большое значение для решения многих вопросов построения аппаратов. На процесс движения дуги влияют различные факторы. Здесь приходится принимать во внимание процессы у электродов и в стволе дуги; причины, вызывающие движение, и, наконец, реакцию окружающей дугу среды на это движение. В комплексе процессов в движущейся дуге все явления взаимно связаны и влияют друг на друга.

Возникновение и развитие разряда в дуге и ряда других процессов в электрической дуге зависит от пространственного распределения многих параметров: температуры, плотности тока, потока массы и энергии и т.д. Исследованию распределений этих параметров как сложной в экспериментальном плане задачи посвящено множество работ. Мы же рассмотрим модель электрической дуги, эквивалентно характеризующую общую картину процессов. Цель настоящей работы – исследование возможностей описания электрической дуги и динамики ее поведения при использовании математической модели, основанной на представлении формы электрической дуги уравнением струны.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы моделирования и теория математических моделей протекания физических явлений, в том числе сварочных процессов, составляет предмет изучения математической физики. Поэтому создание и изучение математических моделей основывается на дифференциальных, функциональных и интегральных уравнениях, описывающих явления природы.

Многие задачи механики (колебания трехмерных объемов, стержней, мембран и струн) и физики (электромагнитные колебания) приводят к уравнению колебаний вида

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \operatorname{div} (k \operatorname{grad} u) - qu + F(x, t), \quad (1)$$

где неизвестная функция $u(x, t)$ зависит от n ($n = 1, 2, 3$) пространственных переменных $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ и времени t ; коэффициенты ρ , k и q определяются свойствами среды; $F(x, t)$ – плотность внешнего возмущения.

В уравнении (1) в соответствии с определением операторов div и grad

$$\operatorname{div} (k \operatorname{grad} u) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial u}{\partial x_i} \right).$$

Исследуем возможность применения одного из уравнений математической физики – уравнения колебаний струны как уравнения математической модели физики протекания электродуговых и сварочных процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

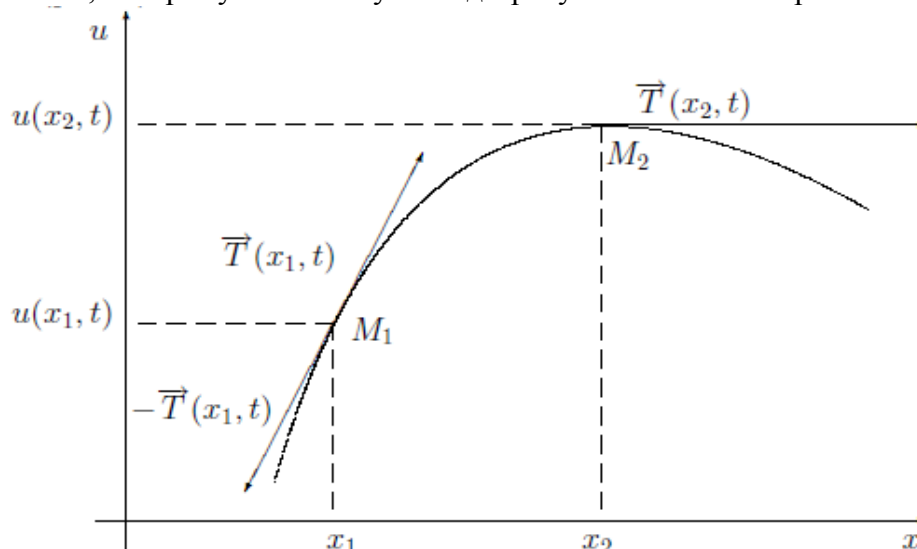
Рассмотрим натянутую струну, закрепленную на концах. Под струной мы понимаем тонкую нить, которая не оказывает никакого сопротивления изменению ее формы, не связанному с изменением ее длины. Сила натяжения T_0 , действующая на струну, предполагается значительной, так что действием силы тяжести можно пренебречь.

Пусть в положении равновесия струна направлена по оси x . Мы будем рассматривать только поперечные колебания струны, предполагая, что движение происходит в одной плоскости и что все точки струны движутся перпендикулярно оси x . Обозначим через $u(x, t)$ смещение точек струны в момент времени t от положения равновесия. При каждом фиксированном значении t график функции $u(x, t)$, очевидно, дает форму струны в этот момент времени (рисунок). Рассматривая далее только малые колебания струны, будем считать, что смещение $u(x, t)$, а также производная $\frac{\partial u}{\partial x}$ столь

малы, что их квадратами и произведениями можно пренебречь по сравнению с самими этими величинами. Выделим произвольный участок (x_1, x_2) струны (рисунок), который при колебании струны деформируется в участок M_1M_2 . Длина дуги этого участка в момент времени t составит:

$$S' = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + u_x^2} dx \approx x_2 - x_1 = S,$$

вследствие чего можно считать, что при малых колебаниях удлинения участков струны не происходит. Отсюда следует (в силу закона Гука), что натяжение T в каждой точке струны не меняется со временем. Таким образом, при сделанных предположениях изменением натяжения струны, возникающим при ее движении, можно пренебречь по сравнению с тем, которому она была уже подвергнута в положении равновесия.



Пояснение к модели

Покажем, что величину натяжения T можно считать не зависящей от x , т.е. $T \approx T_0$. Действительно, на участок M_1M_2 струны действуют силы натяжения, направленные по касательным к струне в точках M_1 и M_2 , а также внешние силы и силы инерции. Сумма проекций на ось x всех этих сил должна равняться нулю. Поскольку мы рассматриваем только поперечные колебания, то силы инерции и внешние силы направлены параллельно оси. Тогда

$$T(x_1)\cos\alpha(x_1) - T(x_2)\cos\alpha(x_2) = 0,$$

где $\alpha(x)$ – угол между касательной в точке с абсциссой x к струне в момент времени t с положительным направлением оси x . В силу малости колебаний

$$\cos\alpha(x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(x)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + u_x^2}} \approx 1$$

и, следовательно,

$$T(x_1) \approx T(x_2).$$

Отсюда в силу произвольности x_1 и x_2 следует, что величина натяжения T не зависит от x . Тогда можно считать, что соблюдается примерное равенство $T \approx T_0$ для всех значений x и t .

Переходя к выводу уравнения колебаний струны, можно воспользоваться принципом Даламбера, согласно которому все силы, действующие на некоторый выделенный участок в струне, включая силы инерции, должны уравновешиваться.

Рассмотрим произвольный участок M_1M_2 струны и составим условие равенства нулю суммы проекций на ось u всех сил, действующих на него: сил натяжения, равных по величине и направленных по касательным к струне в точках M_1 и M_2 ; внешней силы, направленной параллельно оси u , и силы инерции.

Сумма проекций на ось u сил натяжения, действующих в точках M_1 и M_2 :

$$Y = T_0 [\sin \alpha(x_2) - \sin \alpha(x_1)],$$

но, вследствие наших предположений:

$$\sin \alpha(x) = \frac{\operatorname{tg} \alpha(x)}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha(x)}} = \frac{\frac{\partial u}{\partial x}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2}} \approx \frac{\partial u}{\partial x},$$

значит,

$$Y = T_0 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_1} \right].$$

Замечая теперь, что

$$Y = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_2} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=x_1} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx,$$

окончательно получим:

$$Y = T_0 \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx. \quad (2)$$

Обозначим через $F(x, t)$ плотность внешних сил, действующих на струну в точке x в момент времени t и направленных перпендикулярно оси x . Тогда проекция на ось u внешней силы, действующей на участок M_1M_2 струны, будет равна

$$\int_{x_1}^{x_2} F(x, t) dx. \quad (3)$$

Пусть $\rho(x)$ – линейная плотность струны, тогда сила инерции участка M_1M_2 струны будет равна

$$-\int_{x_1}^{x_2} \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx. \quad (4)$$

Сумма проекций (2)–(4) на ось $u(x, t)$ всех сил, действующих на участок M_1M_2 струны, должна быть равна нулю, т.е.

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + F(x, t) \right] dx = 0.$$

Отсюда в силу произвольности x_1 и x_2 следует, что функция под интегралом должна равняться нулю для каждой точки струны в любой момент времени t , т.е.

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_0 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F(x, t). \quad (5)$$

Это и есть искомое уравнение колебаний струны.

Если $\rho(x) = \rho = \text{const}$, т.е. для однородной струны уравнение (5) обычно записывается в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t),$$

где $a = \sqrt{\frac{T_0}{\rho}}$; $f(x, t) = \frac{F(x, t)}{\rho}$. Это уравнение будем называть одномерным волновым уравнением. Если внешняя сила отсутствует, то $F(x, t) = 0$. Получаем уравнение свободных колебаний струны, которое может быть принято в качестве модели динамики собственного свободного поведения электрической дуги и дугового разряда:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

Траектория электрической дуги может рассматриваться как абсолютно гибкая нить, обладающая определенной упругостью на растяжение и кручение. Натяжение в пределах траектории дуги может считаться постоянным. В некоторых случаях может быть принято, что точки оси траектории электрической дуги совершают движение только в плоскости, перпендикулярной к ее продольной оси. Процедура численного интегрирования обычно строится на основе конечно-разностного аналога полученного уравнения колебаний.

На основе вышеприведенной модели можно получить уравнения для исследования динамики поведения электродов контакта как малых продольных колебаний упругого стержня – электрода и поперечных колебаний поверхности расплава поверхности контакта.

Уравнение вида (1) описывает также малые продольные колебания упругого стержня:

$$\rho S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(ES \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F(x, t),$$

где S – площадь поперечного сечения стержня и E – модуль Юнга в точке x . Аналогично получается уравнение малых поперечных колебаний мембраны, которым можно описать поперечные колебания поверхности расплава контактной поверхности электродов:

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_0 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} \right) + F(x, t).$$

Если плотность ρ постоянна, то уравнение колебаний мембраны принимает вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} \right) + f(x, t).$$

Это двумерное волновое уравнение, где $a = \sqrt{\frac{T_0}{\rho}}$; $f = \frac{F(x, t)}{\rho}$.

Трёхмерное волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_3^2} \right) + f(x, t)$$

описывает процессы распространения звука в однородной среде и электромагнитных волн в однородной непроводящей среде. Этому уравнению удовлетворяет плотность газа, его давление и потенциал скоростей, а также составляющие напряженности электрического и магнитного полей и соответствующие потенциалы.

Волновые уравнения можно записать единой формулой:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \Delta u + f,$$

где Δ – оператор Лапласа; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено краткое изложение уравнения колебаний струны как уравнения модели физики электрической дуги сварочных процессов.

Описанная математическая модель может служить основой для моделирования динамики поведения электродов контакта как малых продольных колебаний упругого стержня – электрода и поперечных колебаний поверхности расплава.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ и в соответствии с ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2014–2020 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression // Zeitschrift für Physik. 1955. V. 141. № 1–2. P. 198–216.
2. Янков В.В. К вопросу о поведении электрической дуги высокого давления // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1961. Т. 31. № 11. С. 1324–1328.
3. Ковалев И.М., Акулов А.И. Устойчивость сварочной дуги в поперечном магнитном поле // Сварочное производство. 1965. № 10. С. 6–9.

4. Тихонов А.М., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 2004. 798 с.
5. Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Лекции по математической физике. М.: Наука, 2004. 416 с.
6. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1988. 512 с.
7. Олейник О.А. Лекции об уравнениях с частными производными. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 260 с.
8. Zhou K., Yao P. Review of application of the electrical structure in resistance spot welding // *IEEE Access*. 2017. V. 5. № 1. P. 25741–25749.
9. Wagare V. Fatigue life prediction of spot welded joints: a review // *Proceedings of Fatigue, Durability and Fracture Mechanics*. Springer, Singapore, 2018. P. 445–455.

A STRING AS THE MODEL OF ELECTRIC DISCHARGE TRAJECTORY

S.M. SLOBODYAN, Dr. Sci

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: sms_46@ngs.ru

To study the possibilities of description, a mathematical model of an electric arc was proposed as a form corresponding to a string equation, and the influence of the main parameters of the electric arc on the process of its movement was considered. The expediency of applying a mathematical model of the form of a string equation and a wave equation to describe some phenomena occurring in welding processes is shown.

Keywords: electric arc, low-temperature plasma, string equation, mathematical model, electric arc motion.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and in accordance with the FTSTP “Research and development in priority areas of the development of science and technology” for 2014–2020.

REFERENCES

1. Maecker H. Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression *Zeitschrift für Physik*. 1955. V. 141. No 1–2. pp. 198–216.
2. Yankov V.V. To the question of the behavior of high-pressure electric arc *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki*. 1961. V. 31. No 11, pp. 1324–1328. (In Russian).
3. Kovalev I.M., Akulov A.I. Stability of the welding arc in the transverse magnetic field *Svarochnoye proizvodstvo*. 1965. No 10, pp. 6–9. (In Russian).
4. Tikhonov A.M., Samarsky A.A. Equations of mathematical physics. Moscow: Nauka, 2004. 798 p.
5. Sveshnikov A.G., Bogoliubov A.N., Kravtsov V.V. Lectures on mathematical physics. Moscow: Nauka. 2004. 416 p.
6. Vladimirov V.S. Equations of mathematical physics. Moscow: Nauka, 1988. 512 p.
7. Oleynik O.A. Lectures on partial differential equations. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy. 2005. 260 p.
8. Zhou K., Yao P. Review of application of the electrical structure in resistance spot welding. *IEEE Access*. 2017. V. 5. No 1, pp. 25741–25749.
9. Wagare V. Fatigue life prediction of spot welded joints: a review *Proceedings of Fatigue, Durability and Fracture Mechanics*. Springer, Singapore, 2018, pp. 445–455.

ЗАМЕЧАНИЕ О СИММЕТРИИ ФУНКЦИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫХ В ШАРЕ

Ал.Ан. ШУМ¹, канд. физ.-мат. наук, А.М. ВЕТОШКИН², канд. техн. наук,
Ан.Ал. ШУМ¹

¹Тверской государственный технический университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: shum@tstu.tver.ru

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета
им. Н.Э. Баумана. 141005, Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, e-mail: vetkin@mgul.ac.ru

© Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал., 2019

В данной статье понятия c -симметрии и s -симметрии рассматриваются для случая функции трех переменных. Указаны две непрерывные неотрицательные функции трех переменных, определенные в шаре радиуса $R = 1$ так, что первая из них является s -симметричной, но не является c -симметричной, а вторая является c -симметричной, но не является s -симметричной.

Ключевые слова: симметрия, c -симметрия, s -симметрия, шар, сферические координаты, функция трех переменных, функция плотности, центр масс.

ВВЕДЕНИЕ

При имеющемся разнообразии технологий механической и физико-технической обработки деталей машин [1–13] для конкретного выбора способа обработки может иметь значение характер распределения массы внутри обрабатываемой детали. Такое распределение определяет функция плотности. Некоторые свойства этой функции, связанные с понятием симметрии, описаны в работах [14–20]. При этом рассматривались плоские детали (пластины [16]), и потому функция (определяющая плотность) представляла собой функцию двух переменных. Между тем случай объемных деталей и, соответственно, функции, зависящей от трех переменных, представляет не меньший интерес. В данной статье представлены некоторые результаты, полученные при рассмотрении этого случая.

В работах [14–20] изучались вопросы симметрии функций двух переменных, определенных в некоторой области плоскости, причем в [14] и [15] рассматривались функции двух переменных, определенные в круге радиуса R , и обсуждались два вида симметрии таких функций: c -симметрия и s -симметрия. В настоящей статье эти понятия и некоторые утверждения о них из [14] переносятся на случай функций трех переменных, определенных в шаре радиуса R . В частности, устанавливается, что c -симметрия и s -симметрия для функций трех переменных (так же, как и для функций двух переменных) представляют собой два разных вида симметрии.

Исходным поводом для введения понятия s -симметрии функции трех переменных может служить следующая задача (подобная рассмотренной в [14] для случая функции двух переменных):

каким условиям должна удовлетворять функция, определяющая плотность материала, заполняющего шар радиуса R , чтобы всякая плоскость, проведенная через центр этого шара, делила бы его на две части одинаковой массы?

Будем использовать сферические координаты и считать, что область определения функции плотности $f(\rho, \varphi, \theta)$ есть шар с центром в начале координат. Как известно [21, 22], масса тела равна тройному интегралу от функции плотности, поэтому эта функция должна обладать следующим свойством:

(s) при любом разбиении исходного шара B на два полушара, B_1 и B_2 , выполняется равенство
$$\iiint_{B_1} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \iiint_{B_2} f(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta .$$

С другой стороны, известны формулы для вычисления координат центра масс тела [21, 22]. Из них вытекают следующие условия, необходимые и достаточные для того, чтобы рассматриваемый шар имел центр масс в своем центре:

$$(c) \quad \begin{cases} \iiint_B f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin^2 \theta \cos \varphi d\rho d\varphi d\theta = 0; \\ \iiint_B f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin^2 \theta \sin \varphi d\rho d\varphi d\theta = 0; \\ \iiint_B f(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin \theta \cos \theta d\rho d\varphi d\theta = 0. \end{cases}$$

Разумеется, функция, определяющая плотность, должна быть положительна. Однако, абстрагируясь от условий исходной задачи, будем рассматривать произвольную функцию $f(\rho, \varphi, \theta)$, определенную в шаре радиуса R с центром в начале координат. Переменные ρ и θ предполагаем меняющимися в следующих пределах: $0 \leq \rho \leq R$, $0 \leq \theta \leq \pi$. Переменная φ допускается произвольной, но предполагается, что по этой переменной функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ имеет период 2π (это означает, что $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi + 2\pi, \theta)$ для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$). Если изначально такая функция определяется только для значений аргумента φ из некоторого промежутка длиной 2π , то предполагается, что она автоматически продолжается до периодической (по переменной φ) с периодом 2π .

Функцию $f(\rho, \varphi, \theta)$ называем *s-симметричной*, если она обладает свойством (s), и *c-симметричной*, если она удовлетворяет условиям (c). Так же, как и в случае с функцией двух переменных, эти два вида симметрии не совпадают. Ниже будут указаны две функции, одна из которых *s-симметрична*, но не *c-симметрична*, а другая *c-симметрична*, но не *s-симметрична*, и притом обе они неотрицательны и непрерывны.

Между тем здесь можно вспомнить традиционные определения симметрии функции трех переменных.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ *радиально-симметрична*, если ее значения не зависят от углов φ и θ , а зависят только от расстояния ρ до начала координат.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ *симметрична относительно координатной плоскости OXY*, если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi, \pi - \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ *симметрична относительно координатной плоскости OXZ*, если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, -\varphi, \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно координатной плоскости OYZ , если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \pi - \varphi, \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ планарно-симметрична, если она симметрична относительно всех трех координатных плоскостей.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно оси OX , если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, -\varphi, \pi - \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно оси OY , если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \pi - \varphi, \pi - \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно оси OZ , если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi - \pi, \theta)$.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ осесимметрична, если она симметрична относительно всех трех осей прямоугольной декартовой системы координат.

Функция $f(\rho, \varphi, \theta)$ центрально-симметрична, если она симметрична относительно начала координат, т.е. если для любого φ и любых $\rho \in [0; R]$ и $\theta \in [0; \pi]$ выполнено равенство $f(\rho, \varphi, \theta) = f(\rho, \varphi - \pi, \pi - \theta)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Легко проверить, что всякая радиально-симметричная функция будет также планарно-симметричной (но не наоборот), а всякая планарно-симметричная функция будет также осесимметричной и центрально-симметричной (но не наоборот). Легко проверить и то, что всякая центрально-симметричная функция будет также s -симметричной и c -симметричной, а тот факт, что обратные утверждения не выполнены, устанавливают нижеследующие леммы 1 и 2.

Лемма 1. Функция $f_1(\rho, \varphi, \theta) = \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho \sin \frac{\varphi}{2} + \rho - \rho^2 \right)$, где $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ и $0 \leq \rho \leq 1$,

в круге радиуса $R = 1$ является s -симметричной, но не является c -симметричной.

Доказательство.

Через $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ обозначаем часть шара, высекаемую пространственным углом

$$\begin{cases} \alpha_1 \leq \varphi \leq \alpha_2; \\ \beta_1 \leq \theta \leq \beta_2. \end{cases}$$

Масса этой части шара будет равна

$$\iiint_{B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}} f_1(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta = \int_{\beta_1}^{\beta_2} d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi \int_0^1 \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho \sin \frac{\varphi}{2} + \rho - \rho^2 \right) \rho^2 \sin \theta d\rho =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} d\varphi \int_0^1 \left(\rho^3 \sin \frac{\varphi}{2} + \rho^3 - \rho^4 \right) d\rho = \\
&= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left[\frac{\rho^4}{4} \sin \frac{\varphi}{2} + \frac{\rho^4}{4} - \frac{\rho^5}{5} \right]_0^1 d\varphi = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{20}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\frac{1}{4} \sin \frac{\varphi}{2} + \frac{1}{20} \right) d\varphi = \\
&= \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \theta d\theta \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\varphi = (\alpha_2 - \alpha_1) [-\cos \theta]_{\beta_1}^{\beta_2} = (\alpha_2 - \alpha_1) (\cos \beta_1 - \cos \beta_2).
\end{aligned}$$

Симметричной относительно начала координат для части шара $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ будет часть шара $B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}$. Используя предыдущий результат, легко вычислить ее массу:

$$\begin{aligned}
\iiint_{B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}} f_1(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= ((\alpha_2 + \pi) - (\alpha_1 + \pi)) (\cos(\pi - \beta_2) - \cos(\pi - \beta_1)) = \\
&= (\alpha_2 - \alpha_1) (\cos \beta_1 - \cos \beta_2).
\end{aligned}$$

Таким образом, массы противоположных частей шара, $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$ и $B_{\alpha_1 + \pi, \alpha_2 + \pi}^{\pi - \beta_2, \pi - \beta_1}$, одинаковы. Пусть теперь исходный шар разбит на два полушара. Полушар может быть представлен как объединение (быть может, бесконечное) частей вида $B_{\alpha_1, \alpha_2}^{\beta_1, \beta_2}$. Каждой такой части одного полушара отвечает симметричная часть другого, имеющая точно такую же массу. Следовательно, два полушара также имеют равные массы. Этим доказано, что функция $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ является s -симметричной.

Для того чтобы доказать, что функция $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ не является c -симметричной, установим нарушение условий (с):

$$\begin{aligned}
\iiint_B f_1(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin^2 \theta \cos \varphi d\rho d\varphi d\theta &= \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \frac{20 \cos \varphi}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\rho^4 \sin \frac{\varphi}{2} + \rho^4 - \rho^5 \right) \sin^2 \theta d\rho = \\
&= \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{20 \cos \varphi}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} d\varphi \int_0^1 \left(\rho^4 \sin \frac{\varphi}{2} + \rho^4 - \rho^5 \right) d\rho = \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^{2\pi} \frac{20 \cos \varphi}{5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1} \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{5} + \frac{1}{30} \right) d\varphi = \\
&= \int_0^\pi \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta \int_0^{2\pi} \frac{2 \cos \varphi \left(6 \sin \frac{\varphi}{2} + 1 \right)}{3 \left(5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1 \right)} d\varphi = \frac{\pi}{2} \int_0^{2\pi} \frac{2 \cos \varphi \left(6 \sin \frac{\varphi}{2} + 1 \right)}{3 \left(5 \sin \frac{\varphi}{2} + 1 \right)} d\varphi = \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{\varphi}{2} \\ \varphi = 2x \\ d\varphi = 2dx \end{array} \right\} =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{2\pi}{3} \int_0^{\pi} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx = \frac{2\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx + \frac{2\pi}{3} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx = \left. \begin{array}{l} t = \pi - x \\ x = \pi - t \\ dx = -dt \end{array} \right\} = \\
&= \frac{2\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx + \frac{2\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{6 \sin t + 1}{5 \sin t + 1} \cos 2t dt = \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx = \\
&= \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx + \frac{4\pi}{3} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx = \left. \begin{array}{l} t = \frac{\pi}{2} - x \\ x = \frac{\pi}{2} - t \\ dx = -dt \end{array} \right\} = \\
&= \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx - \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{6 \sin \left(\frac{\pi}{2} - t \right) + 1}{5 \sin \left(\frac{\pi}{2} - t \right) + 1} \cos(\pi - 2t) dx = \\
&= \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{6 \sin x + 1}{5 \sin x + 1} \cos 2x dx - \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{6 \cos t + 1}{5 \cos t + 1} \cos 2t dt = \\
&= \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{(6 \sin x + 1)(5 \cos x + 1) - (6 \cos x + 1)(5 \sin x + 1)}{(5 \sin x + 1)(5 \cos x + 1)} \cos 2x dx = \\
&= \frac{4\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{\sin x - \cos x}{(5 \sin x + 1)(5 \cos x + 1)} \cos 2x dx .
\end{aligned}$$

Поскольку при $x \in \left[0; \frac{\pi}{4} \right)$ подынтегральная функция последнего интеграла меньше нуля, то и сам этот интеграл меньше нуля, но это и значит, что первое из трех условий (с) не выполнено и потому функция $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ не является s -симметричной. Можно проверить, что функция $f_1(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно плоскостей OXY и OXZ , а значит и относительно оси OX . Таким образом, центр масс шара лежит на этой оси, но сдвинут относительно начала координат в отрицательном направлении.

Доказанная лемма доставляет пример функции, которая в шаре радиуса $R = 1$ является s -симметричной, но не является ни радиально-симметричной, ни планарно-симметричной, ни осесимметричной, ни центрально-симметричной, ни s -симметричной. Отметим, что эта функция является в рассматриваемом шаре также непрерывной и неотрицательной.

Лемма 2. Функция $f_2(\rho, \varphi, \theta) = \begin{cases} \rho \sin \varphi & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \pi \\ -2\rho^6 \sin \varphi & \text{при } \pi \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases}$ в шаре радиуса $R = 1$ является c -симметричной, но не является s -симметричной.

Доказательство.

Поскольку $f_2(\rho, \varphi, \theta) = f_2(\rho, \pi - \varphi, \theta)$, то функция $f_2(\rho, \varphi, \theta)$ симметрична относительно плоскости OYZ , поэтому абсцисса центра масс равна нулю. Это значит, что первое из трех условий (c) выполнено. Функция $f_2(\rho, \varphi, \theta)$ не зависит от угла θ , поэтому она симметрична относительно плоскости OXY . Следовательно, аппликата центра масс равна нулю, что означает выполнение последнего из условий (c). Проверим выполнение второго условия:

$$\begin{aligned} \iiint_B f_2(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin^2 \theta \sin \varphi d\rho d\varphi d\theta &= \int_0^\pi d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 f_2(\rho, \varphi, \theta) \rho^3 \sin^2 \theta \sin \varphi d\rho = \\ &= \int_0^\pi d\theta \int_0^\pi d\varphi \int_0^1 \rho \sin \varphi \rho^3 \sin^2 \theta \sin \varphi d\rho - \int_0^\pi d\theta \int_\pi^{2\pi} d\varphi \int_0^1 2\rho^6 \sin \varphi \rho^3 \sin^2 \theta \sin \varphi d\rho = \\ &= \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin^2 \varphi d\varphi \int_0^1 \rho^4 d\rho - 2 \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_\pi^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi \int_0^1 \rho^9 d\rho = \\ &= \frac{1}{5} \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin^2 \varphi d\varphi - 2 \cdot \frac{1}{10} \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_\pi^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi = \begin{cases} t = \varphi - \pi \\ \varphi = t + \pi \\ d\varphi = dt \end{cases} = \\ &= \frac{1}{5} \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin^2 \varphi d\varphi - \frac{1}{5} \int_0^\pi \sin^2 \theta d\theta \int_0^\pi \sin^2 t dt = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, функция $f_2(\rho, \varphi, \theta)$ c -симметрична. Чтобы показать, что эта функция не является s -симметричной, разделим шар B на два полушара, B_1 и B_2 , плоскостью OXZ , тогда

$$\begin{aligned} \iiint_{B_1} f_2(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= \int_0^\pi d\theta \int_0^\pi d\varphi \int_0^1 \rho \sin \varphi \rho^2 \sin \theta d\rho = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi \int_0^1 \rho^3 d\rho = \\ &= \frac{1}{4} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi = \frac{1}{4} \cdot 2 \int_0^\pi \sin \theta d\theta = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot 2 = 1, \\ \iiint_{B_2} f_2(\rho, \varphi, \theta) \rho^2 \sin \theta d\rho d\varphi d\theta &= - \int_0^\pi d\theta \int_\pi^{2\pi} d\varphi \int_0^1 2\rho^6 \sin \varphi \rho^2 \sin \theta d\rho = -2 \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_\pi^{2\pi} \sin \varphi d\varphi \int_0^1 \rho^8 d\rho = \\ &= -2 \cdot \frac{1}{9} \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_\pi^{2\pi} \sin \varphi d\varphi = -2 \cdot \frac{1}{9} \cdot (-2) \int_0^\pi \sin \theta d\theta = 2 \cdot \frac{1}{9} \cdot 2 \cdot 2 = \frac{8}{9}. \end{aligned}$$

Поскольку массы полушаров B_1 и B_2 имеют разные значения, то функция $f_2(\rho, \varphi, \theta)$ не является s -симметричной.

Доказанная лемма доставляет пример функции, которая в шаре радиуса $R = 1$ является s -симметричной, но не является ни радиально-симметричной, ни планарно-симметричной, ни осесимметричной, ни центрально-симметричной, ни s -симметричной. Отметим, что эта функция является в рассматриваемом шаре также непрерывной и неотрицательной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе [14], где рассматривались функции двух переменных, определенные в круге, были указаны две конкретные функции. Было доказано, что первая из них является s -симметричной, но не является c -симметричной, а вторая является c -симметричной, но не является s -симметричной. Этим было показано, что понятия c -симметрии и s -симметрии функции двух переменных различны. В данной работе понятия c -симметрии и s -симметрии естественным образом перенесены на случай функций трех переменных, определенных в шаре, и приведены два аналогичных примера. Лемма 1 указывает функцию, которая является s -симметричной, но не является c -симметричной, а лемма 2 – функцию, которая является c -симметричной, но не является s -симметричной. Таким образом, и для случая функций трех переменных понятия c -симметрии и s -симметрии не совпадают.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. М.: Высшая школа. 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение. 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов. М.: Машиностроение. 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение. 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение. 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение. 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение. 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и прессформ / сост. А.Т. Кравец [и др.]. М.: ОНТИ ЭНИМС. 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз. 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1. 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание. 2006. 512 с.
14. Шум А.А. О симметрии функций, определенных в круге // Вестник Тверского государственного технического университета. 2014. № 1 (25). С. 3–8.

15. Шум А.А. Замечание об s -симметричных функциях // Вестник Тверского государственного технического университета. 2015. № 1 (27). С. 3–6.

16. Шум А.А. О центрах симметрии функции двух переменных // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 2 (30). С. 14–18.

17. Шум А.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // Вестник Тверского государственного технического университета. 2017. № 1 (31). С. 19–22.

18. Шум А.А. Симметрическая линия функции двух переменных // Вестник Тверского государственного технического университета. 2017. № 2 (32). С. 103–105.

19. Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // Вестник Тверского государственного технического университета. 2018. № 2 (34). С. 44–47.

20. Шум Ал.Ан., Ветошкин А.М., Шум Ан.Ал. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // Вестник Тверского государственного технического университета. 2018. № 2 (34). С. 47–52.

21. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике (полный курс). М.: Айрис-пресс. 2007. 604 с.

22. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Физматлит. 2001. Т. 3. 662 с.

A NOTE ON THE SYMMETRY OF FUNCTIONS DEFINED IN A BALL

Al.An. SHUM¹, Cand Sci, A.M. VETOSHKIN², Cand Sci, An.Al. SHUM¹

¹ Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: shum@tstu.tver.ru

² Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman.
141005, Mytishchi, 1st Institute st., 1, e-mail: vetkin@mgul.ac.ru

In this article the concepts of c -symmetry and s -symmetry were considered for the case of a function of three variables. Two continuous nonnegative functions of three variables are specified, defined in a ball of radius $R = 1$ so that the first of them is s -symmetric, but is not c -symmetric, and the second is c -symmetric, but is not s -symmetric.

Keywords: symmetry, c -symmetry, s -symmetry, ball, spherical coordinates, function of three variables, density function, center of mass.

REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. Elektrofizicheskiye i elektrokhimicheskiye metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]: In 2 V. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. V. 1. 247 p. V. 2. 208 p.

2. Vereschaka A.S. Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokryiyami [The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.

3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. Avtomaticheskkiye linii iz agregatnykh stankov [Automatic lines of modular machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.

4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk, V.S. Mekhanicheskaya obrabotka materialov [Mechanical treatment of materials]. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. Elektroerozionnaya obrabotka materialov [Electroerosion treatment of materials]. Leningrad: Mashinostroenie. 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. Avtomaticheski reguliruyemye i kombinirovannyye protsessy rezaniya [Automatically adjustable and combined cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.
7. Silin S.S. Metod podobiya pri rezanii materialov [Method of similarity when cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. Obrabotka rezaniyem. Upravleniye stabilnostyu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
9. Trent E.M. Rezaniye metallov [Metal cutting]. M.: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
10. Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds. Comp. Kravets A.T. et al. Moscow: ONTI ENIMS. 1983. 47 p.
11. Etin A.O. Kinematicheskiy analiz i vybor effektivnykh metodov obrabotki lezviynym instrumentom [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool]. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Kontaknyye protsessy pri elektroalmaznom shlifovanii [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. Teoriya rezaniya [Theory of cutting]. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.
14. Shum A.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 1 (25), pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum A.A. The comment about s -symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015. № 1 (27), pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum A.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016. № 2 (30), pp.14–18. (In Russian).
17. Shum A.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. №1 (31), pp.19–22. (In Russian).
18. Shum A.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. № 2 (32), pp.103–105. (In Russian).
19. Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. № 2 (34), pp. 44–47. (In Russian).
20. Shum Al.An., Vetoshkin A.M., Shum An.Al. Parametric equations of the symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. № 2 (34), pp. 47–52. (In Russian).
21. Pismennyi D.T. Konspekt lektsiy po vysshey matematike (polnyy kurs) [Lecture notes on higher mathematics (full course)]. Moscow: Airis-press. 2007. 604 p.
22. Fichtenholz G.M. Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya [Course of differential and integral calculus]. Moscow: Fizmatlit. 2001. V. 3. 662 p.

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.331:622.6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ ФОРМОВАННОЙ ТОРФЯНОЙ ПРОДУКЦИИ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.М. ГУСЕВА

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

© Яблонев А.Л., Гусева А.М., 2019

Актуальность работы обусловлена необходимостью оперативного контроля качества кускового торфа, производимого в полевых условиях, что позволит своевременно вносить необходимые изменения в конструкцию добычных машин и режим их работы. Один из наиболее важных показателей качества кускового торфа – его прочность на изгиб. Целью исследования является создание механического стенда для контроля прочности кускового торфа. Была создана методика использования стенда, получены данные о влиянии скорости вращения формующего шнека на прочность и обоснованы параметры рационального режима работы шнекового пресса фрезформовочных машин. От оборудования с гидроприводом рассмотренный стенд отличается большей чувствительностью, меньшей металлоемкостью и себестоимостью, а оснащение его цифровым динамометром способствует большей информативности. Применение такого оборудования позволит организовать рациональный режим работы машин для производства кускового торфа.

Ключевые слова: кусковой торф, формование, энергоемкость, шнековый пресс, коэффициент напора, частота вращения шнека, прочность на изгиб, плотность.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные исследования влияния параметров формующего механизма на плотность кускового торфа [1–3] показали, что наиболее рациональным режимом формования с учетом минимума энергозатрат и сохранением куском требуемой плотности является режим с частотой вращения шнека $n = 220 \dots 320$ об/мин при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ и шаге витков шнека $S = 50$ мм (т.е. равном половине диаметра витков D). Однако достижение высокого качества кускового торфа связано с необходимостью систематического контроля получаемой продукции и внесением своевременных изменений в производственные режимы вышеуказанных машин [4, 5] для исключения потерь торфа [6]. С другой стороны, оценочным параметром, определяющим стойкость кускового торфа к воздействию внешних нагрузок, выступают его прочностные характеристики. Поэтому очевидно, что необходимым методом экспресс-анализа качества кускового торфа является определение прочности, для чего необходимо разработать соответствующий стенд и отработать методику его применения на практике.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время получили распространение два способа оценки качества и прочности формованной торфяной продукции: определение механической прочности кускового торфа или брикета путем испытания во вращающемся барабане по

крошимости кусков, обуславливающей соответственно относительную механическую прочность, и испытание формованного торфа на изгиб на гидравлическом прессе [7, 8]. Учитывая, что большинство операций по производству кускового торфа после его формования (ворочка, валкование, переукаладка валков, уборка) связано с изгибными деформациями куска, испытания на изгиб являются более информативными. Использование гидравлического пресса не позволяет исключить из испытаний на прочность динамические нагрузки, неизбежно возникающие в случае его ручного привода, и обеспечить возможность регулирования скорости движения штока гидроцилиндра (для предотвращения удара) в случае его гидропривода. Кроме того, оценка разрушающей нагрузки по давлению жидкости в системе весьма неточна.

С целью минимизации влияния на испытания вышеуказанных факторов и обеспечения возможности оперативного контроля качества продукции разработана и создана конструкция стенда для испытания образцов на прочность с ручным многоступенчатым приводом, преобразующим вращательное движение штурвала в поступательное движение конического наконечника (рис. 1).

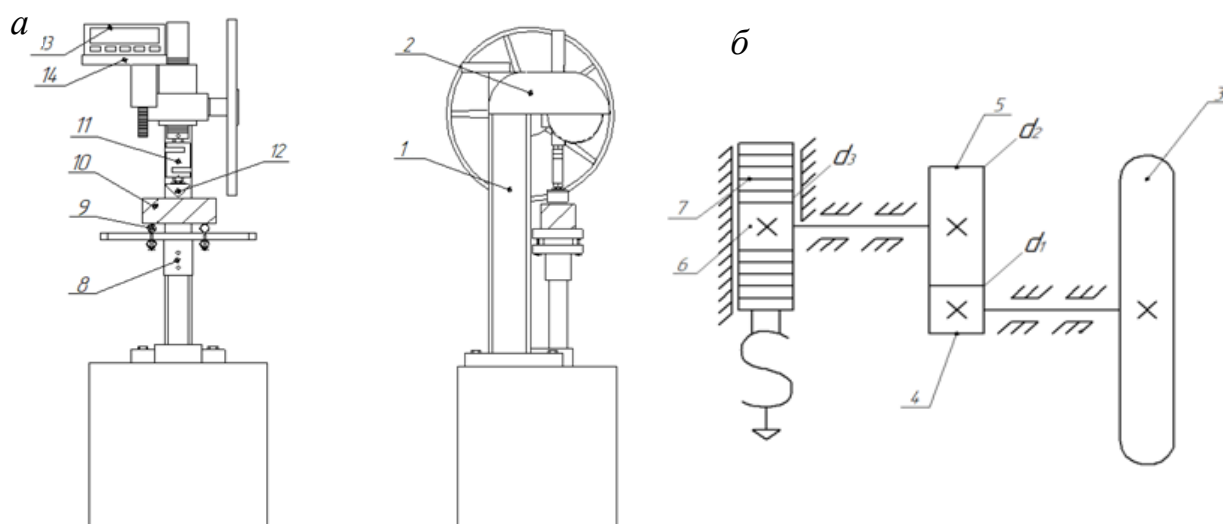


Рис. 1. Устройство (а) и кинематическая схема (б) стенда для реализации разрушающей нагрузки и контроля изгибной прочности формованной торфяной продукции

Стенд для реализации и измерения разрушающей нагрузки включает станину 1, кожух 2, который закрывает механический привод, включающий штурвал 3 диаметром 430 мм, соединенный через шестерню 4, зубчатое колесо 5 и шестерню 6 с вертикально расположенной зубчатой рейкой 7, столик 8 с установочными опорами 9 для крепления испытуемого образца 10, а также узел измерения разрушающей нагрузки. Узел выполнен в виде тензометрической S-образной скобы 11 с коническим наконечником 12 и закреплен на зубчатой рейке. Тензометрическая скоба соединена с цифровым динамометром ДОУ-3-1И 13, установленным на столике 14 и имеющим верхний предел измерений 1 кН.

Стенд работает следующим образом. Испытуемый образец брикета или кускового торфа располагают на установочные опоры столика и вращают штурвал, приводящий в движение механический привод, в результате чего перемещается зубчатая рейка с установленной на ней тензометрической скобой и коническим наконечником. В результате конический наконечник внедряется в испытуемый образец и происходит деформирование тензометрической скобы. При этом электрический сигнал поступает от тензометрической скобы в цифровой динамометр по кабелю. Цифровой динамометр 13 работает в двух режимах: дискретной фиксации нагрузки и

фиксации максимального усилия. При втором варианте цифровой динамометр запоминает максимальную нагрузку, действующую на конический наконечник при разрушении образца, и отражает ее на цифровом дисплее.

Конструкция механического привода с многоступенчатым зубчатым зацеплением позволяет обеспечить плавное создание разрушающей нагрузки с коэффициентом усиления до 500, в результате чего отпадает необходимость приложения к штурвалу больших усилий. Таким образом, при ручном воздействии на обечайку штурвала с силой 10 Н разрушающая нагрузка, создаваемая устройством, составляет около 5 000 Н.

Выполнение установочных опор регулируемые позволяет проводить испытания образцов различной формы и размеров (длиной испытываемой части от 75 до 300 мм, а шириной и высотой от 1 до 130 мм). Исполнение поверхности базирующих установочных опор и конического наконечника в виде поверхностей с радиусом постоянной кривизны снижает риск скалывания и развития трещин, а следовательно, повышает качество получаемых результатов.

Силовая схема создания нагрузки стендом и эпюра изгибающих моментов представлены на рис. 2.

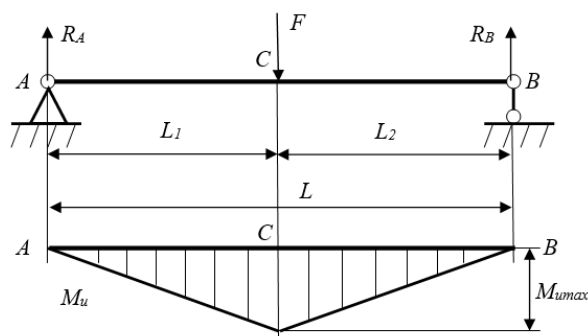


Рис. 2. Силовая схема создания нагрузки и эпюра изгибающих моментов

Приложенная в центре испытываемого на изгиб образца нагрузка F (Н) вызывает равные реакции установочных опор при условии равенства расстояний L_1 и L_2 (м):

$$R_A = R_B = \frac{1}{2}F. \quad (1)$$

Изгибающий момент (Н·м), действующий по всей длине образца, имеет максимальное значение в точке C (точке приложения нагрузки) и определяется по формуле

$$M_{\text{imax}} = R_A \frac{L}{2} = \frac{1}{2}F \frac{L}{2} = \frac{FL}{4}. \quad (2)$$

Прочность образца на изгиб (Па) в наиболее нагруженной точке может быть определена как отношение максимального изгибающего момента, действующего в сечении, к моменту сопротивления образца изгибу W_x (м³):

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{M_{\text{imax}}}{W_x}. \quad (3)$$

Зная, что момент сопротивления круглого образца определяется по зависимости

$$W_{\text{хкр}} = \frac{\pi d^3}{32}, \quad (4)$$

где d – наружный диаметр образца (м), а момент сопротивления прямоугольного образца находится по зависимости

$$W_{\text{хпр}} = \frac{bh^2}{6}, \quad (5)$$

где b и h – ширина и высота сечения образца (м) соответственно [9], можно получить конечные формулы для вычисления изгибающих напряжений $\sigma_{\text{икр}}$ и $\sigma_{\text{ипр}}$ соответственно для круглых и прямоугольных образцов формованной торфяной продукции с учетом зависимостей (2) и (3):

$$\sigma_{\text{икр}} = \frac{8FL}{\pi d^3}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{ипр}} = \frac{1,5FL}{bh^2}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) при испытании образцов на изгиб учитывают как расстояние между установочными опорами (L), так и форму сечения кускового торфа или брикета.

Таким образом, для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с помощью описанного выше стенда следует:

- измерить геометрические характеристики сечения испытываемого образца;
- выставить необходимое расстояние между установочными опорами;
- включить цифровой динамометр, дав ему прогреться в течение 10 мин, обнулить показания и перевести в режим фиксации максимального значения разрушающей нагрузки;
- поместить на установочные опоры стенда испытываемый образец;
- штурвалом подвести конический наконечник стенда к образцу;
- медленно вращая штурвал, довести нагрузку до максимального значения, при которой образец разрушается;
- занести в журнал наблюдений зафиксированное на цифровом динамометре значение максимальной нагрузки F ;
- определить по формулам (6) или (7) прочность образца;
- повторить эксперимент 5...6 раз на однотипных образцах для достижения корректности результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что кусковой торф набирает максимальную прочность при содержании влаги в интервале 20...30 % (4...6 МПа) [10]. Поэтому после формования на различных режимах [1, 2] куски торфа были разложены в специальные кюветы и подвергнуты сушке в мягком режиме ($t = 17...21$ °С, $W = 81...85$ %) на протяжении 25 суток до достижения среднего равновесного содержания влаги $w = 23,12$ %. Затем наряду с определением плотности объемно-весовым методом [1, 2] была определена прочность кусков на разработанном стенде по приведенной выше методике (рис. 3).



Рис. 3. Испытание на изгибную прочность образцов кускового торфа круглого сечения

В ходе стандартной статистической обработки данных получены логарифмические кривые (рис. 4, 5), вид которых весьма близок к зависимостям, полученным для плотности куска [1, 2].

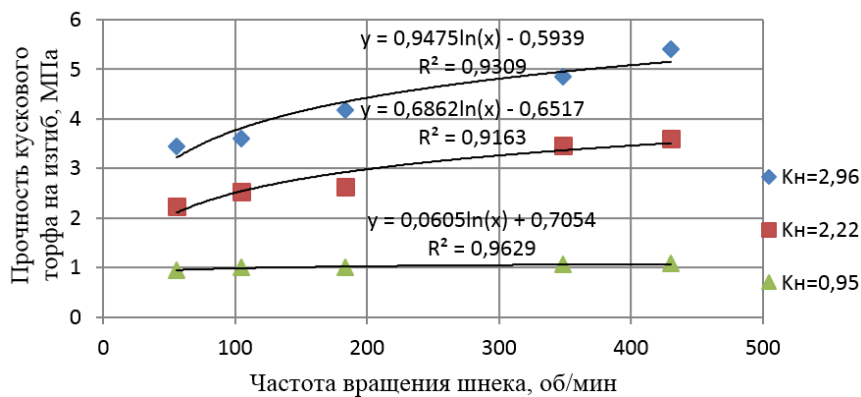


Рис. 4. Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формировании прессом с шагом витков $S = 110$ мм для коэффициентов напора k_n

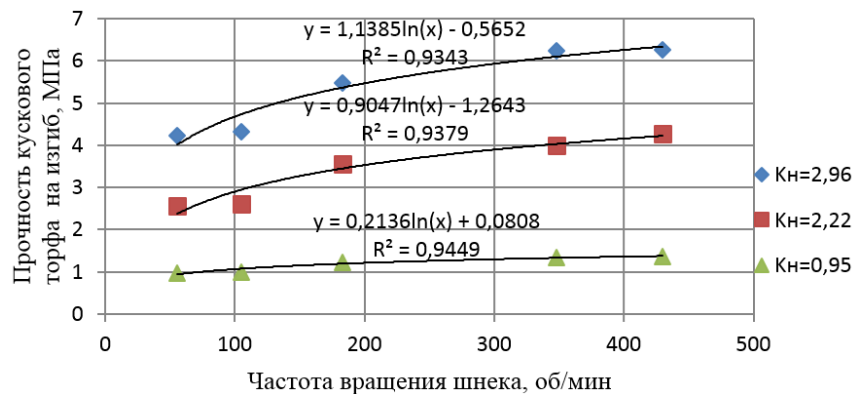


Рис. 5. Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека при формировании прессом с шагом витков $S = 50$ мм для коэффициентов напора k_n

Поскольку минимальная энергоёмкость формования наблюдается при скорости вращения шнека 220...320 об/мин, для скорости 270 об/мин, как и в случае с плотностью, построен график зависимости прочности кускового торфа от энергоёмкости формования для трех различных коэффициентов напора, применявшихся в ходе проведенного исследования (рис. 6). Как следует из полученной зависимости, интенсивность роста прочности куска при увеличении энергоёмкости падает при изменении k_n от 2,22 до 2,96. Поэтому формование при коэффициенте напора $k_n = 2,22$ можно считать рациональным режимом. Полученные результаты по оценке прочности кускового торфа согласуются с полученными ранее данными [10, 11], но достигнуты с меньшими затратами, поскольку при испытании использовалось ручное механическое оборудование. При этом закругленные края испытательного узла станда обеспечивали при испытаниях разрушение при «чистом» изгибе, а не изгибе со скалыванием через образование трещин. Последнее обстоятельство является чрезвычайно важным, так как позволяет создавать режимы нагружения, близкие к существующим в реальных условиях [10].

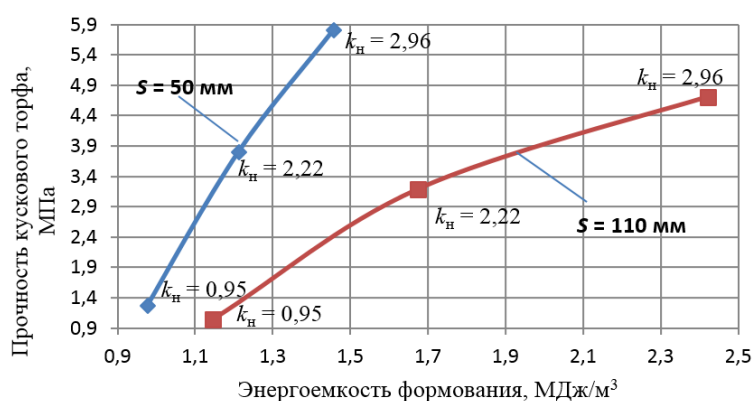


Рис. 6. Зависимость прочности на изгиб высушенного кускового торфа от энергоёмкости формования при частоте вращения шнека $n = 270$ об/мин для различных коэффициентов напора k_n

Формы кривых зависимости прочности от энергоёмкости очень схожи с зависимостями плотности от энергоёмкости [1, 2]. Вполне естественно, что необходимо выявить корреляционную связь между прочностью кускового торфа на изгиб и его плотностью, что и было сделано [12, 13]. В результате расчетов на уровне значимости $\alpha = 0,05$ получены коэффициенты корреляции, близкие к единице, что свидетельствует о весьма тесной связи прочности на изгиб и плотности [3]. Следовательно, данные зависимости можно аппроксимировать прямыми линиями (рис. 7, 8).

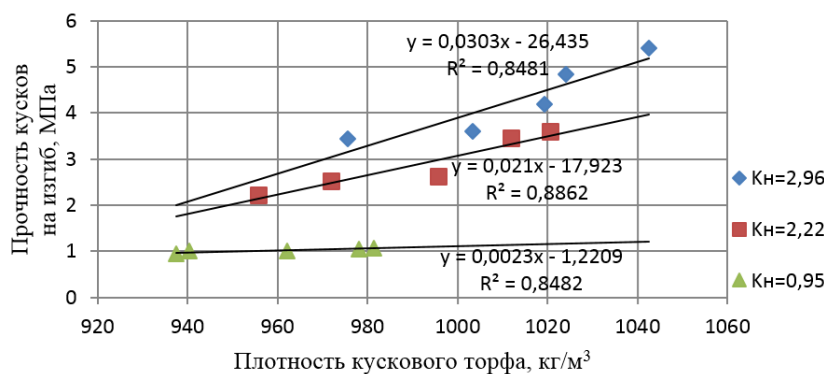


Рис. 7. Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при различных коэффициентах напора и шаге витков шнека $S = 110$ мм

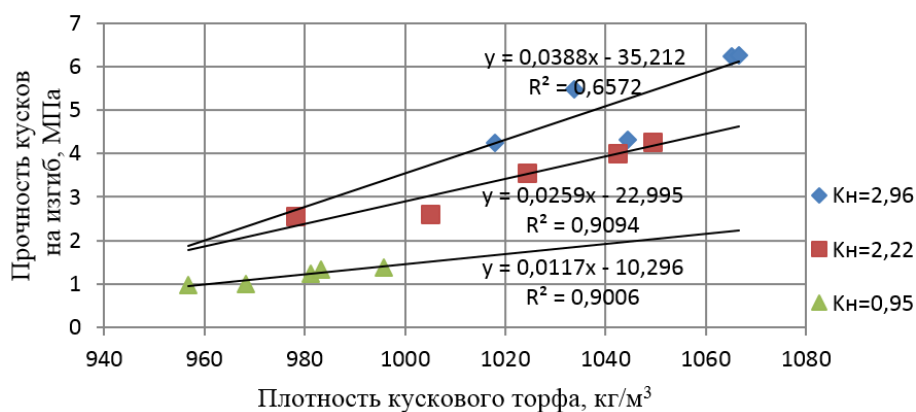


Рис. 8. Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при различных коэффициентах напора и шаге витков шнека $S = 50$ мм

Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами работы [14], в которой исследована зависимость прочности кускового торфа на сжатие от плотности скелета. Следовательно, общая тенденция зависимости прочности кускового торфа от плотности – линейная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование и использование фрезформовочных машин в рациональных режимах позволит снизить потери торфа при реализации технологии его добычи и уменьшить удельные энергозатраты с сохранением прочности куска. При использовании экспресс-метода контроля качества кускового торфа с помощью предложенного оборудования и методики можно не только оперативно изменять параметры формующего механизма в нужном направлении в процессе работы, что особенно важно в условиях Крайнего Севера [15], но и судить о плотности сформованной продукции.

Проверка на прочность сформованных кусков торфа показала, что максимальную прочность имеют куски, полученные в режиме формования: скорость вращения шнека $n = 220...320$ об/мин, шаг витков шнека $S = 50$ мм (т.е. равен половине наружного диаметра шнека D). Поскольку при неизменном росте энергоемкости при уменьшении диаметра мундштука интенсивность роста прочности начинает снижаться при превышении коэффициентом напора величины $k_n = 2,22$, формование с таким коэффициентом можно считать рациональным режимом работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 36–45.
2. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171.
3. Яблонев А.Л., Гусева А.М. О корреляционной связи плотности и прочности на изгиб кускового торфа, получаемого в процессе формования шнековым прессом // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2019. № 1. С. 62–65.

4. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. *E3S Web of Conferences «3d International Innovative Mining Symposium»*. Vol. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
5. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
6. 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. № 12. P. 89525.
7. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат. 1962. 303 с.
8. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра. 1966. 232 с.
9. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа. 1988. 367 с.
10. Лазарев А.В. и др. Справочник по торфу. М.: Недра. 1982. 760 с.
11. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции. Тверь: Созвездие. 2004. 136 с.
12. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра. 1991. 240 с.
13. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука. 1988. 480 с.
14. Гамаюнов Н.И., Гамаюнов С.Н. Усадка и прочность формованного торфа. *Проблемы природопользования и инженерной экологии*. Тверь: ТГТУ, 2007. С. 73–84.
15. Евсеев В.Н., Кужман Г.И., Соколов А.А. Добыча торфяного топлива на Крайнем Севере. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960. 48 с.

DETERMINATION OF FLEXURAL STRENGTH MOLDED PEAT PRODUCTS

A.L. YABLONEV, Dr Sci, A.M. GUSEVA

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

The relevance of the work is due to the need for operational quality control of lump peat produced in the field, which will make it possible to timely make the necessary changes to the design of mining machines and their mode of operation. One of the most important indicators of the quality of lump peat is its flexural strength. The aim of the work is to create a mechanical stand for controlling the strength of lump peat. As a result of the work, the technique of using the stand was developed, data on the effect of the speed of rotation of the forming auger on the strength were obtained and the parameters of a rational mode of operation of the screw press of milling machines were substantiated. In contrast to the equipment with hydraulic drive, the bench under consideration has greater sensitivity, less metal consumption and cost, and equipping it with a digital dynamometer contributes to greater information. The use of such equipment will allow to organize a rational mode of operation of machines for the production of lump peat.

Keywords: lump peat, molding, energy intensity, screw press, pressure ratio, screw rotation frequency, bending strength, density.

REFERENCES

1. Yablonev A.L., Guseva A.M. Determination of the Intensity of the molding process of sod peat. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Tekhnicheskiye nauki»*. 2019. No 1 (1), pp. 36–45. (In Russian).
2. Yablonev A.L., Guseva A.M. Experimental Substantiation of Rational Modes of Production of Sod Peat. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2019, No 2, pp. 163–171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-163-171. (In Russian).
3. Yablonev A.L., Guseva A.M. On the correlation of sod peat density and flexural strength produced in the screw press formation. *Nauchno-tehnicheskiiy vestnik Povolzhya*. 2019. No 1, pp. 62–65. (In Russian).
4. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries. E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium». V. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
5. Panov V.V., Misnikov O.S., Kuporova A.V. Problems and Prospects of Development of Peat Production in the Russian Federation. *Gornyy Informatsionno-analiticheskiy Byulleten*. 2017. No 5, pp. 105–117. (In Russian).
6. 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.
7. Bulinko M.G., Ivanov V.N., Sarmatov M.I. *Briketirovaniye torfa [Briquetting Peat]*. Moscow: Gosenergoizdat. 1962. 303 p.
8. Semenskiy Ye.P. *Tekhnicheskiiy analiz torfa [Technical Analysis of Peat]*. Moscow: Nedra. 1966. 232 p.
9. Stepin P.A. *Soprotivleniye materialov [Resistance of Materials]*. Moscow: Visshaya shkola. 1988. 367 p.
10. Lazarev A.V., Korchunov S.S. et al. *Spravochnik po torfu [Handbook of Peat]*. Moscow: Nedra, 1982. 760 p.
11. Terentyev A.A., Suvorov A.A. *Struktura i svoystva formovannoy torfyanoy produktsii [Structure and Properties of Molded Peat Products]*. Tver: Sozvezdiye. 2004. 136 p.
12. Bogatov B.A., Kopenkin V.D. *Matematicheskiye metody v torfyanom proizvodstve [Mathematical Methods in Peat Production]*. Moscow: Nedra. 1991. 240 p.
13. Ventzel Ye.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i yeyo ingenerniye prilogeniya [Theory of Probability and its Engineering Applications]*. Moscow: Nauka. 1988. 480 p.
14. Gamayunov N.I., Gamayunov S.N. *Usadka i prochnost formovannogo torfa [Shrinkage and Durability of Moulded Peat]*. *Problems of Nature Management and Environmental Engineering*. Tver: TSTU. 2007, pp. 73–84. (In Russian).
15. Yevseev V.N., Kuzhman G.I., Sokolov A.A. *Dobicha torfyanogo topliva na kraynem severe [Extraction of Peat Fuel in the Far North]*. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 48 p.

ГРУНТОУПЛОТНЯЮЩАЯ МАШИНА С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕМ

Ю.Н. ПАВЛОВ, канд. техн. наук, А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук,
С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук, Д.Г. МАСЛЕННИКОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: pavlov237@yandex.ru

© Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Масленников Д.Г., 2019

Представлены результаты предварительных испытаний рабочего органа грунтоуплотняющей машины в грунтовом канале. Описаны конструкции натурального образца грунтоуплотняющей машины с вальцовым и площадочным рабочим органом. Приведена амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя машины. Отображены результаты заводских испытаний грунтоуплотняющей машины.

Ключевые слова: грунтоуплотняющая машина, вибровозбудитель, частота колебаний, амплитуда, уплотнение, заводские испытания.

ВВЕДЕНИЕ

В технологическом процессе строительства автомобильных дорог уплотнение земляного полотна является важнейшей операцией, от качества и эффективности выполнения которой во многом зависит долговечность готового строительного объекта [1–3]. Поэтому изыскание новых конструкций и модернизация известных уплотняющих машин представляется актуальной задачей как в настоящее время, так и в перспективе.

Интенсификация процесса уплотнения грунтов в основном связана с применением вибрационного воздействия на уплотняемый материал [4, 5]. Для создания вынужденных колебаний на рабочих органах уплотняющих машин широко используются дебалансные вибровозбудители, которые имеют невысокую стоимость, просты в изготовлении и обслуживании. Однако данному типу вибровозбудителей присущи и серьезные недостатки: сложность регулирования амплитуды колебаний при заданной частоте, а также большие динамические нагрузки на подшипниковые опоры, снижающие долговечность конструкции и ограничивающие верхний предел частоты колебаний. В связи с этим начиная с 1980 года в лаборатории дорожных машин на кафедре «Строительные и дорожные машины и оборудование» под руководством заведующего кафедрой А.Б. Мясникова проводились опытно-конструкторские работы по созданию гидравлических вибровозбудителей принципиально новой конструкции для использования в рабочих органах грунтоуплотняющих машин [6, 7]. Предлагаемые конструкции гидравлических вибровозбудителей по сравнению с известными обладают существенными преимуществами, такими как простота конструкции, надежность работы, технологичность изготовления, широкий диапазон регулирования параметров вибрации. Целью исследования являлось изучение эффективности уплотнения грунта с использованием гидравлического вибровозбудителя на лабораторном оборудовании и на экспериментальных образцах грунтоуплотняющих машин в полевых условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для уплотнения рабочим органом уплотняющей машины с гидравлическим вибровозбудителем использовался мелкий песок со следующими характеристиками: размеры частиц $<1,5$ мм; максимальная плотность скелета грунта $1,71$ г/см³; оптимальная влажность 12 %; плотность влажного грунта $1,91$ г/см³.

Для проведения испытаний экспериментального образца грунтоуплотняющей машины были подготовлены рабочие площадки длиной от 25 до 80 м. Подготовка площадок включала снятие верхнего растительного слоя, выемку грунта по длине площадки с образованием траншеи глубиной 1 м и шириной 3 м. Траншея заполнялась песчаным грунтом слоями по 0,2 м с разравниванием и предварительным уплотнением. Работа проводилась бульдозером. В нескольких точках подготовленной рабочей площадки на глубине $h = 0,1; 0,4$ и $0,8$ м методом режущего кольца отбирали пробы грунта для определения начальных значений плотности и влажности для расчета коэффициента уплотнения.

Оценка уплотняющей способности рабочего оборудования с гидравлическим вибровозбудителем проводилась по значениям коэффициента уплотнения грунта, полученным после прохода машины по рабочей площадке. Для оптимизации скорости передвижения и параметров вибрационного воздействия длина рабочей площадки разбивалась на отдельные отрезки, равные трем длинам машины. Каждый из них уплотнялся при определенных значениях скорости передвижения и параметрах работы вибровозбудителя. Для определения значений коэффициента уплотнения после прохода машины на осевой линии каждого участка в средней его части режущим кольцом проводили отбор не менее трех проб грунта на глубинах $h = 0,1; 0,4$ и $0,8$ м.

Для определения параметров вибрационного воздействия на грунт и получения амплитудно-частотной характеристики вибровозбудителя использовался комплект виброизмерительной аппаратуры ВИ6-6ТН с датчиками ускорения ДУ-5С и перемещения ДП-3СМ. Параметры процесса записывались на фотобумаге шириной 120 мм и чувствительностью 1 200 единиц с использованием светолучевого осциллографа НО.44.2. Скорость протяжки фотобумаги составляла от 160 до 640 мм/с. Датчики соединялись с усилительным блоком виброизмерительной аппаратуры трехжильным экранированным кабелем длиной 50 м. Перед проведением экспериментальных замеров аппаратура и датчики проходили тарировку. Для оперативного контроля работы датчиков, настройки частоты и амплитуды процесса использовали осциллограф С.1.19, подключая его к выходу по напряжению виброизмерительной аппаратуры ВИ6-6ТН.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе предварительных испытаний рабочего органа с гидравлическим вибровозбудителем в грунтовом канале были получены достаточно высокие показатели степени уплотнения песчаного мелкозернистого материала (рис. 1) [8]. Результаты экспериментальных исследований показали значения коэффициента уплотнения грунта больше 0,9 по всей глубине отсыпки грунта в канале от $0...0,08$ до $0,6...0,68$ м. Из полученных данных видно, что с увеличением времени процесса повышается степень уплотнения грунта. Так, максимальное значение $K_y = 0,948$ наблюдалось при $t = 30$ с и $h = 0,2...0,28$ м, а минимальный показатель $K_y = 0,917$ был получен при $t = 10$ с и $h = 0,6...0,68$ м. В основном с увеличением глубины отбора пробы степень уплотнения грунта уменьшалась в полном соответствии с теорией поверхностного уплотнения грунтовых материалов. Более низкие значения степени уплотнения, соответствующие горизонту отбора проб $h = 0,08$ м, объясняются виброразрыхлением структуры грунта в поверхностном слое.

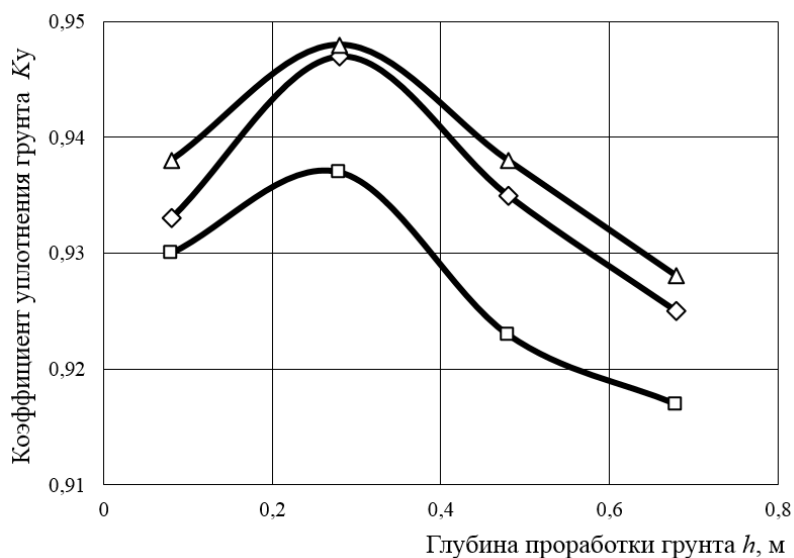


Рис. 1. Зависимость коэффициента уплотнения K_u от глубины проработки грунта: \square – время процесса $t = 10$ с; \diamond – $t = 20$ с; Δ – $t = 30$ с

Проведенные исследования легли в основу создания опытного натурального образца грунтоуплотняющей машины с гидравлическим вибровозбудителем (рис. 2), рабочий орган которой был выполнен в виде соосных вальцов, посаженных на ось, соединенную с поршнем и штоком вибровозбудителя. С корпусом вибровозбудителя соединялась рама основного бака, который имел возможность свободного перемещения в вертикальных направляющих рамы транспортной тележки. Основной задачей при создании данного образца грунтоуплотняющей машины была проверка возможности эффективного уплотнения грунта при высоких частотах вибрационного воздействия. В связи с этим на машине был установлен вибровозбудитель, реализующий высокочастотный режим работы с амплитудно-частотной характеристикой, представленной на рис. 3.



Рис. 2. Общий вид грунтоуплотняющей машины с вальцовым рабочим органом

Экспериментальная вибрационная грунтоуплотняющая машина имела следующие технические характеристики.

Тип машины – прицепная (трактор-тягач Т150 К).

Габаритные размеры машины: длина 5,1 м; высота 2,77 м; ширина 1,93 м; колесная база 3,34 м; ширина колеи 1,6 м; вес 25 кН; вес в снаряженном состоянии 50,8 кН.

Параметры рабочего органа: количество вальцов – 2; диаметр вальца 0,9 м; ширина вальца 0,7 м; ширина обрабатываемой полосы 1,6 м; вес вальца 3 200 Н.

Гидравлический вибровозбудитель: диапазон регулирования частоты колебаний 10...600 Гц; амплитуда колебаний 3...0,01 мм; максимальная возмущающая сила 35 кН; напор рабочей жидкости 1 МПа.

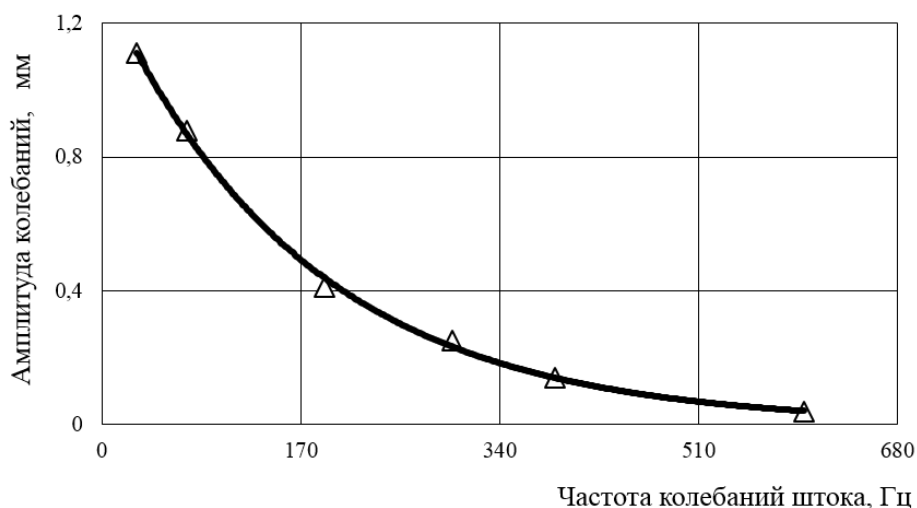


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя машины

С целью определения работоспособности грунтоуплотняющей машины и отдельных ее узлов были проведены заводские испытания, которые выявили ряд недостатков и неисправностей. Наиболее серьезным недостатком являлось заедание оси вальцов катка в ступицах при высоких частотах колебаний (более 100 Гц). Эта неисправность была устранена путем проточки оси и установки бронзовых втулок в ступицах вальцов катка. Однако после устранения данного недостатка было выявлено, что создаваемая вибровозбудителем амплитуда колебаний в значительной степени поглощалась в шарнирных соединениях штока вибровозбудителя с осью вальцов и в узле посадки вальца на ось. Устранить данное негативное явление путем совершенствования посадочных узлов не удалось, поэтому было решено заменить вальцовый рабочий орган на площадочный, который напрямую соединяется со штоком вибровозбудителя сферическим шарниром.

Модернизированный образец грунтоуплотняющей машины с площадочным рабочим органом представлен на рис. 4. В данном варианте корпус вибровозбудителя жестко связан с несущей конструкцией бака и двумя опорными плитами: передней и задней. Поршень и шток крепятся шарниром к средней плите, которая имеет направляющую раму из четырех уголков, позволяющую вертикальное перемещение относительно бака.

Модернизированная машина имела следующие технические характеристики.

Тип машины – прицепная к трактору с тяговым усилием 100 кН (на опытном образце использовали трактор-тягач Т 100 М, оснащенный ходоуменьшителем и валом отбора мощности). Габаритные размеры машины: длина 2,4 м; ширина 1,1 м; высота 2,2 м; вес в снаряженном состоянии 66 кН.

Рабочий орган передает нагрузку на грунт через три опорные плиты: переднюю и заднюю с размерами в плане 0,8 x 0,4 м и среднюю с размерами 0,8 x 0,8 м.

Суммарный вес передней и задней плит с баком, корпусом вибровозбудителя и насосной установкой составлял 35 кН. Средняя плита с направляющей рамой, поршнем и штоком вибровозбудителя имела вес 25 кН. Подводимая мощность 50 кВт. Передача мощности осуществлялась посредством карданного вала.

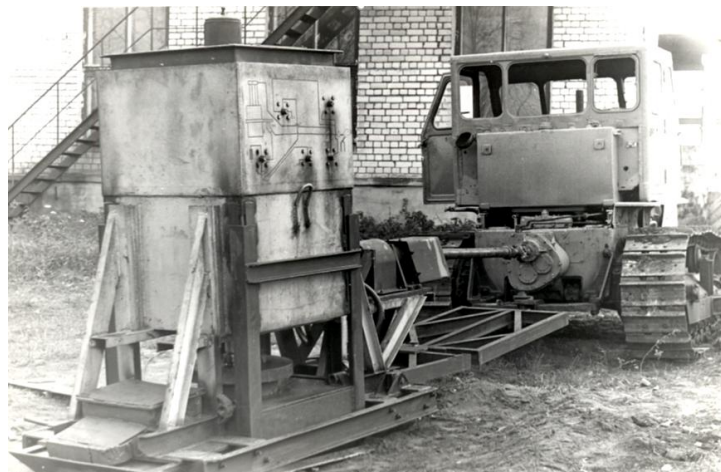


Рис. 4. Общий вид модернизированного образца грунтоуплотняющей машины

Амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя показана на рис. 5. Выбор параметров процесса уплотнения с достаточно невысокой частотой и большой амплитудой колебания был обусловлен сравнительно низкой степенью уплотнения верхнего слоя грунта при высокой частотной характеристике в исследованиях на грунтовом канале.

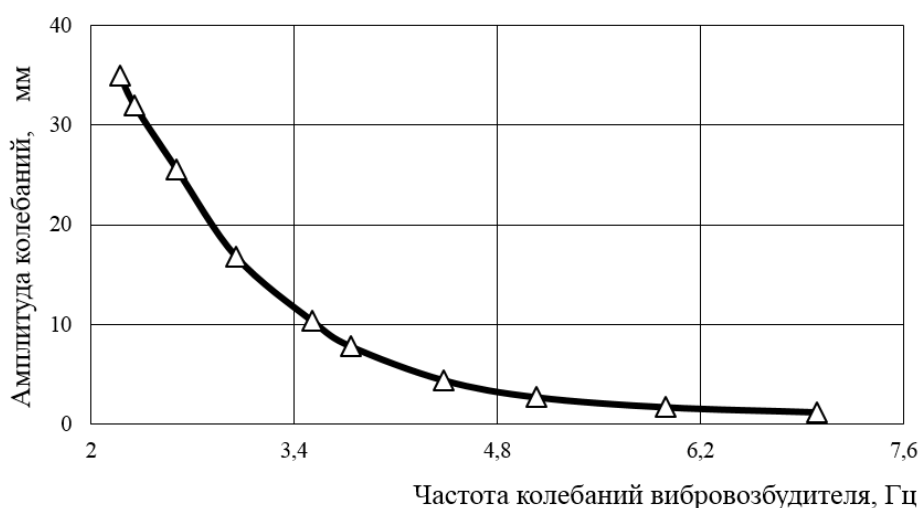


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика вибровозбудителя модернизированной грунтоуплотняющей машины

Для изучения процесса уплотнения грунта использовали среднюю часть амплитудно-частотной характеристики вибровозбудителя: амплитуда колебаний – 4,4...7,8 и частота 4,43...3,79 соответственно. Испытания проводили на

мелкозернистом песке с плотностью скелета $1,71 \text{ г/см}^3$ и влажностью 12 %. Скорость передвижения машины составляла 50...100 м/ч. Пробы грунта отбирались с глубины 0,1...0,8 м с использованием метода режущего кольца (объем кольца 200 см^3).

На рис. 6 представлена зависимость коэффициента уплотнения грунта от скорости передвижения машины. Согласно полученным данным, оптимальный диапазон скоростей находится в пределах 70...80 м/ч, когда коэффициент уплотнения грунта K_y принимал максимальное значение 0,99...0,94 при отборе проб с глубины $h = 0,1...0,8 \text{ м}$ соответственно. Дальнейшее изучение процесса уплотнения грунта проводили при скорости передвижения машины 75 м/ч.

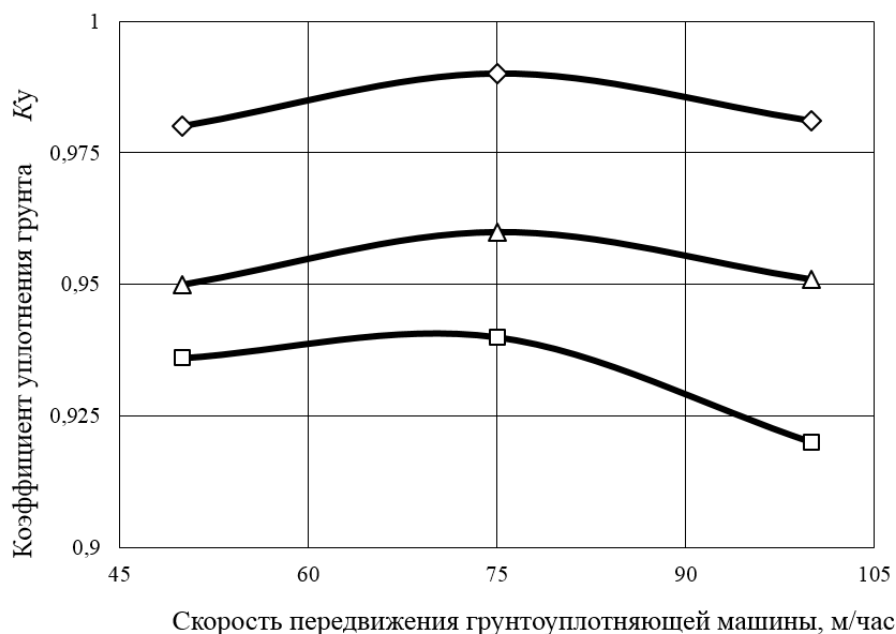


Рис. 6. Зависимость коэффициента уплотнения грунта от скорости передвижения грунтоуплотняющей машины при глубине h , равной (м): ◇ – 0,1; △ – 0,4; □ – 0,8

Результаты исследований относительно коэффициента уплотнения K_y с характеристикой грунта в объеме шести проб с разных участков после прохода грунтоуплотняющей машины представлены в таблице. Из табличных данных следует, что после одного прохода машины значения коэффициента уплотнения грунта на глубине 0,1 м были от 0,97 до 1,01; на глубине 0,4 м – от 0,9 до 0,97; на глубине 0,8 м – от 0,91 до 0,96. Полученные показатели K_y доказывают достаточно высокую эффективность работы модернизированного образца грунтоуплотняющей машины.

Значения коэффициента уплотнения после прохода
грунтоуплотняющей машины

№ пробы	Глубина взятия пробы (см)	Плотность влажного грунта (г/см ³)	Влажность пробы грунта (%)	Плотность скелета грунта (г/см ³)	Коэффициент уплотнения K_v
1	10	1,823	8,9	1,674	0,98
	40	1,776	7,7	1,649	0,96
	80	1,795	10,3	1,627	0,95
2	10	1,890	9,1	1,732	1,01
	40	1,796	10,4	1,627	0,95
	80	1,722	8,0	1,594	0,93
3	10	1,808	7,8	1,677	0,98
	40	1,821	9,4	1,665	0,97
	80	1,701	7,7	1,579	0,92
4	10	1,816	8,4	1,675	0,98
	40	1,749	8,4	1,613	0,94
	80	1,720	6,0	1,623	0,95
5	10	1,799	8,9	1,652	0,97
	40	1,676	8,4	1,546	0,90
	80	1,714	7,6	1,593	0,93
6	10	1,832	8,4	1,690	0,99
	40	1,760	7,9	1,631	0,95
	80	1,667	7,0	1,558	0,91

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили обосновать выполнение рабочего органа грунтоуплотняющей машины в виде трамбуемых плит. Модернизированный экспериментальный образец грунтоуплотняющей машины в процессе экспериментирования показал достаточно высокую работоспособность. Выбранные режим работы вибровозбудителя в пределах 10 Гц и скорость передвижения машины 75 м/ч обеспечили эффективное уплотнение грунта за один проход ($K_v > 0,9$). Принимая во внимание положительные результаты исследований, необходимо продолжить изучение работы грунтоуплотняющей машины с гидравлическим вибровозбудителем при более высоких частотных характеристиках воздействия рабочего органа на грунтовое основание. Проведение всего объема исследований позволит сформулировать окончательные рекомендации по внедрению грунтоуплотняющей машины в технологические процессы дорожного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пермяков В.Б. Комплексная механизация строительства. М.: Высшая школа. 2008. 383 с.
2. Подольский В.П., Глагольев А.В., Поспелов П.И. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Земляное полотно. М.: Академия. 2011. 429 с.
3. Бабаскин Ю.Г. Строительство земляного полотна автомобильных дорог. Минск: Новое знание. 2018. 332 с.
4. Пермяков В.Б., Иванов В.И., Мельник С.В. Технологические машины и комплексы в дорожном строительстве (производственная и техническая эксплуатация). М.: Бастет. 2014. 752 с.
5. Недорезов И.А., Савельев А.Г. Машины строительного производства: учеб. пособие для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 119 с.

6. А.С. СССР 990330. *Вибровозбудитель* / Мясников А.Б., Мошков А.Г.; заявл. 20.02.81; опубл. 23.01.1983, Бюл. № 3.

7. А.С. СССР 1202631. *Вибровозбудитель* / Мясников А.Б., Павлов Ю.Н., Мясников Б.А.; заявл. 28.05.84; опубл. 07.01.1986, Бюл. № 1.

8. Павлов Ю.Н., Кондратьев А.В., Масленников Д.Г., Кочканян С.М. Исследование вибрационного рабочего органа грунтоуплотняющей машины // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования*. Тверь: ТвГТУ. 2019. С. 87–91.

GROUND MACHINE WITH HYDRAULIC VIBRATOR

Yu.N. PAVLOV, Cand Sci, A.V. KONDRATYEV, Dr Sci,
S.M. KOCHKANYAN, Cand Sci, D.G. MASLENNIKOV, Cand Sci

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: pavlov237@yandex.ru

The results of preliminary testing of the working body of the soil compacting machine in the soil channel are presented. Constructions of a full-scale sample of a soil compacting machine with a roller and pad working device are described. The amplitude-frequency characteristic of the machine's exciter is given. Displays the results of factory tests soil compacting machines.

Keywords: soil compacting machine, vibration exciter, vibration frequency, amplitude, compaction, factory tests.

REFERENCES

1. Permyakov V.B. *Kompleksnaya mexanizaciya stroitelstva: uchebnick dlya vuzov* [Complex mechanization of construction: a textbook for universities.] Moscow: Visshaya Shkola. 2008. 383 p.

2. Podolsky V.P., Glagolyev A.V., Pospelov P.I. *Texnologiya i organizachiya stroitelstva avtomobilnix dorog* [Technology and organization of the construction of highways.] *Zemlyanoe polotno: uchebnick dlya ycheregenii VPO*. Moscow: Academy. 2011. 429 p.

3. Babaskin Yu.G. *Stroitelstvo zemlyanogo polotna avtomobilnix dorog: uchebnoe posobie dlya vusov* [Construction of a road bed of roads: studies. manual for universities.] Minsk: Novoe znaniye. 2018. 332 p.

4. Permyakov V.B., Ivanov V.I., Melnik S.V. *Texnologicheskie mashiny i komplekxy v dorozhnom stroitelstve (proizvodstvennaya u texnicheskaya trspluataciya)* [Technological machines and complexes in road construction (industrial and technical operation)]. Moscow: Bastet. 2014. 752 p.

5. Nedorezov I.A., Saveliev A.G. *Mashini stroitelno go proizvodstva: uchebnoe posobie dlya vusov* [Building production machines: studies. manual for universities]. Moscow: MGTU. N.E. Bauman. 2010. 119 p.

6. А.С. USSR 990330. *Vibroactivator* / Myasnikov AB, Moshkov AG; Claims 02.20.81. Publ. 01/23/1983. Bul. No 3.

7. А.С. USSR 1202631. *Vibroactivator* / Myasnikov A.B., Pavlov Yu.N., Myasnikov B.A.; claims 05/28/84; publ. 01/07/1986, Bul. No 1. (In Russian)

8. Pavlov Yu.N., Kondratiev A.V., Maslennikov D.G., Kochkanyan S.M. The study of the vibratory working body of a soil compacting machine. *Mechanics and physics of processes on the surface and in the contact of solids and parts of technological and energy equipment*. Tver: TvSTU. 2019, pp. 87–91. (In Russian).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНО-РОЛИКОВОГО ПРЕССА ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ТОРФА

И.И. МИХЕЕВ, канд. техн. наук, В.И. ГОРЯЧЕВ, д-р техн. наук, Д.М. ЩЕРБАКОВА

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: dscherbakowa@yandex.ru

© Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М., 2019

Аналитически обоснованы рациональные конструкторско-технологические параметры ленточно-роликового пресса типа ПЛР для обезвоживания торфа в технологии фракционирования малоразложившегося торфяного сырья гидроразмывом. Рекомендовано механическое отжатие крупноволокнистой части торфа. Приведена конструкция ленточного пресса, в котором за конструкторско-технологические параметры приняты: активная длина прессового пространства, на котором происходит обезвоживание торфа; количество нажимных роликов n и расстояние между ними; скорость движения фильтровальных полотен; внешняя нагрузка на торф от гидроцилиндров по активной длине прессового пространства; удельная загрузка фильтровальных полотен сухим веществом торфа и производительность пресса. Предложены решения, позволяющие увеличить производительность ленточного фильтр-пресса по отжиму торфяного сырья в среднем на 40 %.

Ключевые слова: ленточный фильтр-пресс, рациональные параметры, конструкция фильтр-пресса, торф, прессовое пространство, фильтровальные полотна, вал-активатор, производительность.

ВВЕДЕНИЕ

В технологии фракционирования малоразложившегося торфяного сырья гидроразмывом рекомендуется осуществлять механическое отжатие крупноволокнистой части торфа в ленточно-роликовом прессе типа ПЛР [1–3] с использованием в качестве фильтровальных полотен новой конструкции зубчатой цепи, обладающей хорошей фильтровальной способностью и возможностью очистки без остановки фильтр-пресса [4]. Получаемая после центрифугирования волокнистая масса влажностью 87 % (влажносодержание около 7,0 кг воды/кг сухого вещества – торфа) поступает в ленточный фильтр-пресс непрерывного действия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе имеющихся исследований и практического опыта определим основные конструкторско-технологические параметры ленточно-роликового пресса типа ПЛР для удаления влагосодержания малоразложившегося торфа путем отжатия с $W = 7,0$ до $W = 2,5$ кг воды/кг с.в. при различной удельной загрузке фильтровальных полотен $q = 3,0; 2,0; 1,0$ кг с.в./м². За конструкторско-технологические параметры ПЛР приняты (рисунок):

активная длина L (м) прессового пространства, на котором происходит обезвоживание торфа в состоянии грунтовой массы;

количество нажимных роликов n и расстояние l (м) между ними;

скорость V (м/с) движения фильтровальных полотен;

внешняя нагрузка на торф (давление) $P_{ц}$ от гидроцилиндров по активной длине прессового пространства L ;

удельная загрузка фильтровальных полотен сухим веществом торфа G (кг с.в./м²); производительность пресса Q (кг с.в./ч), причем

$$G = 2q, \quad (1)$$

где q – удельная загрузка при фильтровании через одно из фильтровальных полотен.

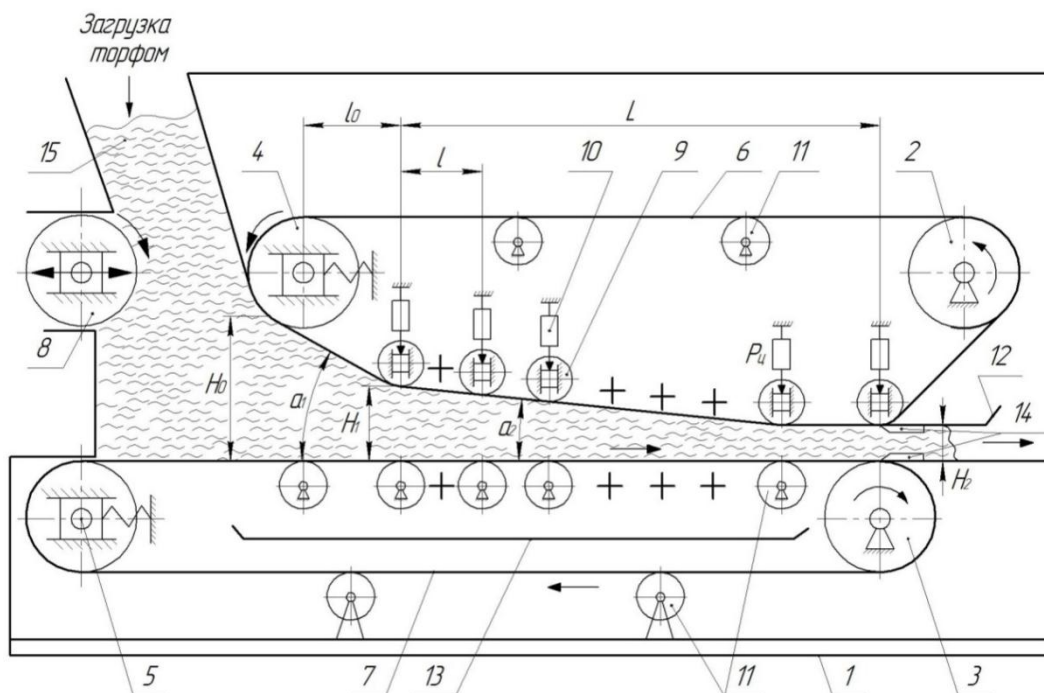


Схема ленточно-роликового пресса типа ПЛР

В соответствии с динамикой отжатия торфа прессовое пространство по высоте уменьшается при движении по мере уплотнения волокнистой массы. Известно [5], что в процессе обезвоживания торфа при перемещении плунжера до 50 % хода происходит лишь уплотнение загруженного торфа. При дальнейшем перемещении плунжера на 30 % хода идет медленный подъем давления до 1,0 МПа и вытекает основная масса воды. В последующие 15 % хода плунжера происходит быстрый подъем давления, достигающий 8–10 МПа. Оставшиеся 5 % хода охватывают период выдержки при максимальном давлении. Аналогичная динамика наблюдается при отжатии верхового торфа малой степени разложения в прессах непрерывного действия [6, 7].

На рисунке приведена схема ленточного пресса типа ПЛР [8]. Он состоит из корпуса 1, на котором установлены верхний 2 и нижний 3 приводные валы, верхний 4 и нижний 5 натяжные валы, фильтровальные полотна – верхнее 6 и нижнее 7, приводной вал-активатор 8, нажимные ролики 9, на которые оказывают давление гидроцилиндры 10, а также опорные ролики 11, лотки для сбора отфильтрованной воды верхний 12 и нижний 13, счищающие ножи 14; внутреннее пространство заполнено отжимаемым торфом 15. При работе пресса в качестве фильтровальных полотен применена зубчатая цепь новой конструкции [4], обладающая хорошей фильтровальной способностью и возможностью очистки без остановки фильтр-пресса. Применение вала-активатора совместно с верхним фильтровальным полотном

обеспечивает равномерную загрузку торфом прессового пространства, что позволяет использовать удельную загрузку фильтр-пресса, равную $q \geq 1,0$ кг с.в./м² [9].

Из рисунка видно, что при работе пресса отжатие воды из торфа осуществляется в рабочем пространстве на его активной длине L между верхним и нижним фильтровальными полотнами под действием внешней нагрузки $P_{ц}$ от гидроцилиндров, передаваемой через нажимные ролики. Усилия от нажимных роликов через слой торфа воспринимаются опорными роликами. Длина l_0 определяется из условия захвата торфомассы фильтровальными полотнами при угле наклона α_1 верхнего фильтровального полотна. Исходный торф на длине l_0 формируется в слой и уплотняется от начальной высоты H_0 до H_1 , где $H_0 \approx 2H_1$. При этом высота слоя торфа H_1 в начале прессового пространства определяется влагосодержанием материала на входе W_1 и удельной загрузкой фильтровальных полотен сухим веществом G . Высота отжатого слоя торфа H_2 на выходе из пресса определяется влагосодержанием W_2 и удельной загрузкой пресса. При этом угол наклона верхнего фильтровального полотна равен α_2 .

Основным фактором отжатия в прессе служит градиент порового давления, действующего на воду в слое торфа. Для достижения наилучших результатов по отжатию воды внешнее давление по длине пресса L должно увеличиваться и быть оптимальным для каждой конкретной точки по длине прессового пространства в соответствии с физико-механическими характеристиками торфяной массы в слое. Из этого следует, что если внешнее давление в данной точке рабочего пространства превышает некоторую оптимальную величину, то произойдет выдавливание торфомассы из прессового пространства или наступит продавливание торфа в щели фильтровальных полотен. При меньшем давлении отжатие воды будет неполным. Все это снижает производительность пресса и качество получаемого продукта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом имеющихся исследований изменение давления (фильтрационного напора $\Delta\bar{p}$) в слое торфа по активной длине прессового пространства L принимаем согласно табл. 1, в которой $\Delta\bar{p} = (\bar{p} - \bar{p}_0)$, где \bar{p} – среднее внешнее давление, \bar{p}_0 – среднее внутреннее давление, соответствующее началу фильтрации воды из сжатого слоя торфа [1]. При этом для $q = 2,0$ и $1,0$ кг с.в./м² фильтрационный напор $\Delta\bar{p}$ скорректирован, поскольку чем меньше удельная загрузка фильтра, тем больше предельное давление на торфомассу, находящуюся в прессовом пространстве [10], и тем быстрее производится его обезвоживание [11]. Знаком «...» отмечено отсутствие изменения диапазона параметров.

Таблица 1. Изменение фильтрационного напора $\Delta\bar{p}$ в слое торфа на активной длине прессового пространства

№ роликов	$\Delta\bar{p}$, кПа для $q = 3,0$ кг с.в./м ²	$\Delta\bar{p}$, кПа для $q = 2,0$ кг с.в./м ²	$\Delta\bar{p}$, кПа для $q = 1,0$ кг с.в./м ²
1-2	200	300	300
2-3	500	800	800
3-4	1 000	1 500	1 500
4-5	1 500	2 000	2 000
5-6	2 000	2 500	3 000
6-7	3 000	3 000	...
7-8	3 000
...
22-23	3 000	3 000	3 000

Время t отжатия между смежными нажимными роликами рассчитывается из соотношения

$$t = \ell/V. \quad (2)$$

Активная длина прессового пространства L определяется из выражения

$$L = \ell \cdot (n - 1), \quad (3)$$

где n – число нажимных роликов.

Удельная загрузка поверхности фильтра сухим веществом торфа принята $q = 3,0; 2,0; 1,0$ кг с.в./м². Высота слоя h определена из выражения, в котором γ и ρ – плотность воды и сухого вещества торфа соответственно [1]:

$$\bar{h} = q \left(\frac{\bar{w}}{\gamma} + \frac{1}{\rho} \right). \quad (4)$$

Ниже приведены результаты расчетов кинетики обезвоживания верхового торфа степенью разложения ~ 10 % при температуре массы 10 °С от влагосодержания на входе в пресс $W_1 \approx 7,0$ кг воды/кг с.в. до влагосодержания на выходе из пресса (после отжатия) $W_2 \approx 2,5$ кг воды/кг с.в. при удельной загрузке фильтровальной поверхности $q = 3,0; 2,0; 1,0$ кг с.в./м², расстоянии между роликами $\ell = 0,21$ м, активной длине прессового пространства $L = 4,41$ м и числе роликов $n = 21$ (табл. 2).

Таблица 2. Кинетика отжимаемого торфяного сырья в ленточном фильтр-прессе непрерывного действия

№ п/п	Удельная загрузка фильтровальной поверхности q , кг с.в./м	Время отжатия T , с	Скорость фильтровальных полотен $V = \frac{L}{T}$, м/с	Высота слоя торфяного сырья		Производительность Q , кг с.в./ч
	Удельная загрузка пресса G , кг с.в./м ² ($G = 2q$)			H_1 , см на входе	H_2 , см на выходе	
1	3	154	0,03	4,6	2,0	648
	6					
2	2	77	0,06	3,0	1,3	864
	4					
3	1	28	0,16	1,5	0,9	1 152
	2					

Исходя из полученных результатов, определим производительность фильтр-пресса по сухому веществу торфа в час:

$$Q = 3\,600 \cdot B \cdot G \cdot V, \quad (5)$$

где $B = 1,0$ м, ширина фильтровальных полотен;

G (кг с.в./м²) – удельная загрузка пресса;

V (м/с) – скорость движения фильтровальных полотен.

Подставив полученные значения из табл. 2, получим:

$$Q_{q=3,0} = 3\,600 \cdot 1,0 \cdot 6 \cdot 0,03 = 648 \text{ кг с.в./ч};$$

$$Q_{q=2,0} = 3\,600 \cdot 1,0 \cdot 4 \cdot 0,06 = 864 \text{ кг с.в./ч};$$

$$Q_{q=1,0} = 3\,600 \cdot 1,0 \cdot 2 \cdot 0,16 = 1\,152 \text{ кг с.в./ч}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитически обоснованы рациональные конструкторско-технологические параметры ленточно-роликового пресса типа ПЛР для обезвоживания малоразложившегося торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразмывом.

2. Предложенные конструктивно-технологические решения позволяют увеличить производительность ленточного фильтр-пресса по отжиму торфяного сырья в среднем на 40 %.

Таким образом, для механического обезвоживания волокнистой торфомассы в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразмывом целесообразно использовать ленточно-роликовый пресс типа ПЛР с фильтровальными полотнами в виде зубчатой цепи новой конструкции [4] с конструкторско-технологическими параметрами:

активная длина прессового пространства $L = 4,41$ м;

скорость движения фильтровальных полотен:

$$V = 0,03 \text{ м/с для } q = 3,0 \text{ кг с.в./м}^2;$$

$$V = 0,06 \text{ м/с для } q = 2 \text{ кг с.в./м}^2;$$

$$V = 0,16 \text{ м/с для } q = 1,0 \text{ кг с.в./м}^2;$$

изменение фильтрованного напора на активной длине прессового пространства $\Delta\bar{p}$ (кПа) выбираем по табл. 1;

расстояние между нажимными роликами $\ell = 0,21$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев В.И. Искусственное обезвоживание торфа: монография. Тверь: ТвГТУ. 2012. 184 с.

2. Горячев В.И., Михеев И.И., Яблонев А.Л., Фомин К.В. Машины и процессы фракционирования торфяного сырья гидроразмывом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № S38. С. 3–10. DOI: 10.25015/0236-1493-2018-7-38-3-10.

3. Горячев В.И., Михеев И.И., Яблонев А.Л., Фомин К.В. Выбор пресса для обезвоживания торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразмывом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № S38. С. 22–30. DOI: 10.25015/0236-1493-2018-7-38-22-30.

4. Горячев В.И., Михеев И.И., Щербакова Д.М. Ленточный фильтр-пресс непрерывного действия для обезвоживания малоразложившегося торфа с очищающимися фильтрованными полотнами // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сборник научных трудов и материалов 14-й Международной конференции по проблемам*

горной промышленности, строительства и энергетики. Тула: ТГУ. 2018. С. 124–130.

5. Прохоров Н.И. Искусственное обезвоживание торфа. Ленинград: Лениздат. 1944. 116 с.

6. Булышко М.Г. Некоторые опытные данные искусственного обезвоживания прессованием верховых торфов малой степени разложения: *Сборник статей по изучению торфяного фонда*. М.: МТИ. 1958. Вып. 3. С. 32–37.

7. Могилевский И.И. Теоретические исследования обезвоживания торфа в прессах непрерывного действия. *Подготовка торфяной залежи к эксплуатации, переработка и транспорт торфа. Сборник трудов ВНИИТП*. Л.: ВНИИТП. 1973. Вып. 33. С. 75–91.

8. Лазарев А.В., Корчунов С.С. [и др.]. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.

9. Патент РФ 187828. *Ленточный фильтр-пресс непрерывного действия* / Михеев И.И., Горячев В.И., Щербакова Д.М.; заявл. 13.11.2018; опубл. 19.03.2019, Бюл. № 8.

10. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products // *Journal of AOAC International*. 2014. V. 97. № 3. P. 721–730.

11. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite. *Fuel*. 2014. V. 134. P. 406–413.

ANALYTICAL JUSTIFICATION OF RATIONAL DESIGN-TECHNOLOGY PARAMETERS OF THE TAPE AND ROLLER PRESS FOR PEAT DEHYDRATION

I.I. MIKHEYEV, Cand Sci, V.I. GORYACHEV, Dr Sci,
D.M. SCHERBAKOVA

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

Rational design and technological parameters of a PLR-type belt-roller press for dehydration of peat in the technology of fractionating low-decomposed peat raw materials by hydraulic washing are analytically justified. The mechanical squeezing of the large-fiber peat is recommended. The design of a belt press is given, in which the design and technological parameters are taken: the active length of the press space, on which peat dehydration occurs; the number of pressure rollers n and the distance between them; the speed of movement of the filter sheets; external load on peat from hydraulic cylinders along the active length of the press space; specific loading of filter cloths with dry matter of peat and press performance. Solutions have been proposed that allow an increase in the belt filter press productivity on the extraction of peat raw materials by an average of 40 %.

Keywords: belt filter press, rational parameters, filter press design, peat, press space, filter sheets, activator shaft, productivity.

REFERENCES

1. Goryachyov V.I. Iskustvennoye obezvozhivaniye torfa: monografiya [Artificial Dehydration of Peat: Monograph]. Tver: TSTU. 2012. 184 p.
2. Goryachyov V.I., Mikheyev I.I., Yablonev A.L., Fomin K.V. Fractionation Processes and Machines of Peat Raw Materials by Hydrosour. *Gorniy Informatsionno-Analiticheskiy Bulletin*. 2018. No S38, pp. 3–10. DOI: 10.25015/0236-1493-2018-7-38-3-10. (In Russian).
3. Goryachyov V.I., Mikheyev I.I., Yablonev A.L., Fomin K.V. Select Press to Dewater the Peat in Fractionation Technologies Peat Raw Materials by Hydrosour. *Gorniy Informatsionno-Analiticheskiy Bulletin*. 2018. No S38, pp. 22–30. DOI: 10.25015/0236-1493-2018-7-38-22-30. (In Russian).
4. Goryachyov V.I., Mikheyev I.I., Scherbakova D.M. Tape Filter Press of Continuous Action for Dehydration of the Low-decayed Peat with the Cleaned Filtered Cloths. *Social and Economic and Environmental Problems of Mining Industry, Construction and Power: Collection of Scientific Works and Materials 14 International Conferences on Problems of Mining Industry, Constructions and Power Engineering Specialists*. Tula: TSU. 2018, pp. 124–130. (In Russian).
5. Prohorov N.I. Iskustvennoye obezvozhivaniye torfa [Artificial Dehydration of Peat]. Leningrad: Lenizdat. 1944. 116 p.
6. Bulinko M.G. Some Experimental Data of Artificial Dehydration Pressing of Riding Peat of Small Extent of Decomposition. *The Collection of Articles on Studying of Peat Fund*. Moscow: MPI. 1958. No 3, pp. 32–37. (In Russian).
7. Mogilevskiy I.I. Theoretical Researches of Dehydration of Peat in the Presses of Continuous Action. *Preparation of a Peat Deposit for Operation, Processing and Transport of Peat. Collection of Works AUSRIPI*. Leningrad: AUSRIPI. 1973. No 33, pp. 75–91. (In Russian).
8. Lazarev A.V., Korchunov S.S. [etc.] Spravochnik po torfu [Reference Book on Peat]. Moscow: Nedra. 1982. 760 p.
9. Patent RF 187828. Lentochniy filtr-press neprerivnogo deystviya [Tape Filter Press of Continuous Action]. Mikheyev I.I., Goryachyov V.I., Scherbakova D.M. Declared 13.11.2018. Published 19.03.2019. Bulletin No 8. (In Russian).
10. Lamar R.T., Olk D.C., Mayhew L., Bloom P.R. A New Standardized Method for Quantification of Humic and Fulvic Acids in Humic Ores and Commercial Products. *Journal of AOAC International*. 2014. Vol. 97. No 3, pp. 721–730.
11. Doskočil L., Grasse L., Valkova D., Pekar M. Hydrogen Peroxide Oxidation of Humic Acids and Lignite. *Fuel*. 2014. V. 134, pp. 406–413.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004:519.8

МОДЕЛЬ ОНЛАЙН-ОЦЕНКИ УДАЛЕНИЯ ОБЪЕКТА, УПРАВЛЯЕМОГО ПО ПРОВОДАМ

Д.А. БАРЧУКОВ, канд. техн. наук, С.М. СЛОБОДЯН, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: bda@mail.ru

© Барчуков Д.А., Слободян С.М., 2019

На основе анализа возможностей применения существующих моделей, методов и методик для онлайн-контроля и управления беспилотными динамическими объектами разработана математическая модель дистанционной оценки удаления беспилотного подвижного объекта, управляемого по кабелю (проводам). Наличие модели и методики дистанционной оценки удаления беспилотного объекта, управляемого по проводам, повышает надежность управления для исключения критических ситуаций в жестких условиях радиопротиводействия и постановки мощных электромагнитных помех управлению.

Ключевые слова: автономный подвижный объект, управление по кабелю, волновой метод, оценка удаленности объекта управления, модель, система навигации.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие возможностей элементной базы и видеотехники позволяет реализовать новые принципы построения автономных подвижных транспортных, информационных и беспилотных систем (БПС) с более эффективными алгоритмами обзора пространства, обнаружения, распознавания, обработки информации, оценки координат для навигации и управления практически во всех средах Земли: воздушной, водной, наземной и подземной [1–5]. Подвижными объектами обычно считаются объекты, движущиеся с относительно невысокой скоростью (порядка десятков километров в час и менее) как на двумерной плоскости – пересеченной местности, так и в трехмерном пространстве.

Разработчики беспилотных средств активно ведут исследования, направленные на обеспечение автономности применения БПС в условиях исключения сигнала спутниковой навигации на основе альтернативных источников данных. К таким данным относятся:

синтезированное изображение, формируемое фазированными антенными решетками радаров;

видеоинформация, снимаемая бортовыми фото- и видеокамерами оптического и инфракрасного диапазонов;

данные цифрового рельефа местности;

космические фото- и аэроснимки;

«сигналы природного воздействия» (вектор силы тяжести, магнитное поле Земли, положение звезд Вселенной).

В частности, компания Rockwell Collins, создающая средства навигации и управления для БПС разных типов, разработала систему Vision Augmented Inertial Navigation System (VAINS), способную к коррекции инерциальной системы по скорости и координатам от видеокамеры в зоне отсутствия сигнала спутниковой навигации [5]. В общем случае области применения БПС широки и разнообразны. Беспилотная система как универсальная платформа наряду с решением задач прямого назначения может решать и побочные задачи, такие как патрулирование в автоматическом режиме охраняемых территорий (например, их периметра).

Применение БПС позволяет:

- снизить время реакции на нештатную ситуацию и число ложных срабатываний;
- патрулировать периметр (в том числе в темное время суток);
- исключить влияние человеческого фактора;
- сократить время обнаружения нарушения;
- выполнять работы аэрофотосъемки и картографирования труднодоступных зон, при этом возможности получения информации существенно шире, чем при использовании самолетов;
- вести поиск людей в любое время суток;
- доставку индивидуальных средств спасения или иных малогабаритных грузов в тех случаях, когда применение пилотируемых средств невозможно или нецелесообразно (например, при большом удалении от существующих аэродромов).

Возможно также использование БПС в качестве ретранслятора связи с обеспечением восстановления, резервирования или быстрого наращивания развернутых сетей (линий) связи; высокоскоростной связи с группами; связи в труднодоступных районах (в том числе зараженных, горных, болотистых, в лесистых местностях и т.д.), связи при высоких темпах движения и др. [1–5].

На практике задача определения координат местоположения, дальности удаления и углового положения БПС возникает при каждом акте применения системы. Определение координат БПС целесообразно калибровать перед их применением, когда элементы и узлы БПС пришли к установившемуся режиму, характеризующемуся тем, что все переходные процессы с момента включения завершились. Надежность управления автономными подвижными объектами основывается на системном подходе, более полно учитывающем все действующие при решении задачи факторы – от способа навигации и особенностей средств обеспечения безопасности до психологического восприятия оператором действий системы. Динамика, мобильность и скорость перемещения беспилотных средств, часто управляемых человеком-оператором, повышают требования к точности навигации и наглядности управления средством для оператора. Таким образом, исследования, направленные на повышение качества управления для навигации подвижного объекта в сложных навигационной обстановке и метеоусловиях, являются актуальными.

Определение координат автономных БПС – чрезвычайно важная задача, для решения которой применяются разные системы навигации. Наиболее распространенными системами навигации для определения координат местоположения автономных БПС являются инерциальные навигационные системы (ИНС) [4–5], которым свойственны такие характерные особенности, как нарастание ошибок измерения координат со временем, а также достаточно большая масса и высокая стоимость. Эти факторы ограничивают область их использования авиацией и морским транспортом. Для снижения этих весьма существенных погрешностей применяют дополнительные средства, обеспечивающие коррекцию и начальную выставку ИНС. Широкое распространение получили также спутниковые навигационные системы (СНС),

которые обладают рядом преимуществ: неограниченной зоной применения, малыми габаритами, меньшей стоимостью и достаточно высокой точностью. Однако учет общеизвестного факта, когда иранские военные смогли угнать американский БПС RQ-170, используя действие внешнего сигнала для формирования ложных координат и обеспечения посадки, показывает, что разработка новых средств навигации является актуальной задачей. Повышение устойчивости к воздействию помех – одна из первоочередных задач в управлении БПС. Наибольшей помехоустойчивостью к внешним воздействиям обладает принцип управления БПС по проводной или кабельной линии, обеспечивающий решение широкого круга задач в локализованной зоне действия [1, 3].

Цель статьи – создание модели и метода оперативного онлайн-определения дистанции удаления автономного подвижного объекта, управляемого по проводной линии, для повышения точности определения координат его положения в условиях возможного воздействия помех на локальной территории контроля.

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Используемый авторами метод можно отнести к методу точной привязки. Этот метод обеспечивает высокую точность определения абсолютных координат по дальности даже при отсутствии инерциальных систем навигации, при нулевой дальности видимости в земных средах и плохих метеорологических условиях применения БПС. Он также позволяет установить абсолютное положение БПС с видеокамерой, когда даже ее примерные координаты неизвестны. Это достигается путем сканирования всей базы данных со снимками местности и сравнения их с текущим снимком. Кроме того, имея «привязанный» к дальности снимок, можно с высокой точностью определять координаты наземных объектов, обнаруженных оптико-электронной видеоаппаратурой.

Рассматриваемый метод оценки координат удаления БПС как метод точной привязки координат по дальности состоит в применении модели и алгоритма волнового способа оценки свойств и параметров линии управления БПС как линии с распределенными параметрами [6–7]. Для этого в модели примем, что геометрический центр БПС совпадает с удаленным концом линии управления, с возможностью обеспечения управляемого короткого замыкания (КЗ) конца линии. Поэтому кратко проанализируем методы и средства определения состояния и поиска мест повреждения линии управления БПС. Сущность применения таких методов сводится к определению мест КЗ. Разрывы проводов линии управления без замыкания редки. Определить их место по соотношению электрических величин бывает сложно даже в простейшем случае однофазного замыкания линий.

По своей специфике методы обнаружения места однофазного замыкания линий управления БПС можно разделить на группы [6]: метод накладной рамки, параметрический, емкостной, топографический, высокочастотные и низкочастотные дистанционные методы, рефлексометрия. Реже применяют петлевой метод и импульсные локационные методы поиска повреждения электрических линий. В принципе для определения места повреждения линий управления БПС пригоден метод стоячих волн.

Сущность метода стоячих волн состоит [6] в том, что к отключенной линии управления БПС подключают источник гармонического сигнала высокой частоты. В области высоких частот электрическую линию управления БПС можно рассматривать как электрическую длинную линию с распределенными параметрами. При совпадении частоты формируемого источником тестового сигнала и f_0 –

собственной частоты резонанса электрической длинной линии амплитудное значение напряжения (тока) в начале линии управления БПС будет максимальным.

При синусоидальном тестовом сигнале частоты ω напряжение в любой точке длинной линии управления БПС можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$U = U_m^+ \exp(i\omega t - yx) + U_m^- \exp(i\omega t + yx), \quad (1)$$

где U_m^+ и U_m^- – комплексная амплитуда прямой (+) и обратной (–) волн тестового сигнала, В; i – мнимое число; y – постоянная распространения; x – расстояние от начала линии управления до измеряемой точки расположения БПС, м.

Распространение волны в длинной электрической линии характеризуется постоянной распространения, которая в общем случае имеет комплексный вид:

$$y = \alpha + i\beta, \quad (2)$$

где α – коэффициент затухания волны в линии управления БПС, характеризующий изменение амплитуды волны на единицу длины линии; β – коэффициент изменения фазы электрического сигнала в длинной линии управления БПС.

Точка, значение фазы тестового электрического сигнала в которой сохраняется неизменным, перемещается в электрической линии с v -фазовой скоростью:

$$v = 2\pi f / \beta, \quad (3)$$

где $f = \omega / 2\pi$ – линейная частота изменения тестового сигнала в линии управления.

Если считать начальный момент времени ввода тестового сигнала в линию управления фиксированным (например, $t = 0$) и рассматривать изменение мгновенного значения тестового сигнала вдоль линии управления в зависимости от x – координаты удаления БПС, то каждое из слагаемых в (1) соответствует гармонической волне. Волна, описываемая первым слагаемым, является прямой или падающей волной. Волна, представленная вторым слагаемым, является обратной или отраженной.

Если падающая синусоидальная волна затухает (убывает по амплитуде) при движении от начала линии управления БПС, совмещенной с началом системы координат отсчета дальности до БПС, к концу линии управления, совмещенной с центром БПС, то отраженная волна затухает при перемещении от конца линии управления, т.е. от центра БПС, к началу линии управления, т.е. к началу системы координат отсчета дальности до БПС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модель и оценка качества. Для примера алгоритма и методики применения метода стоячих волн [6] рассмотрим алгоритм расчета для линии управления БПС, параметры которой, в общем виде, приведены ниже. Длина линии управления БПС $l = l_k$, км; удельное активное сопротивление линии r_k , Ом/км; удельная индуктивность линии L_0 , Гн/км; фазовая скорость (скорость распространения волны) $v = 297\,000$ км/с.

Предположим, что в конце линии управления БПС (в точке места расположения БПС) произошло однофазное замыкание на землю (корпус БПС). Определим f_t – частоту тестового сигнала, при которой возникает эффект стоячих волн, и оценим распределение напряжения и тока в линии управления БПС при данной частоте тестового сигнала. Рассматривая данную длинную линию управления БПС как

электрическую линию без потерь, определим f_0 – собственную частоту резонанса такой линии управления:

$$f_0 = v/4l_k. \quad (4)$$

Зная f_0 – собственную частоту резонанса электрической линии управления БПС, можно определить частоту тестового сигнала, излучаемого в данную линию:

$$f_t = 2f_0. \quad (5)$$

тогда фазовый коэффициент в линии определит следующее выражение:

$$\beta = \omega\sqrt{L_0C_0} = \omega/v. \quad (6)$$

Волновое сопротивление линии управления БПС определит соотношение

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}, \quad (7)$$

длина волны тестового сигнала в линии управления БПС при этом вычисляется по формуле

$$\lambda = 2\pi/\beta. \quad (8)$$

В соответствии с выражением (8) длина волны распространения тестового сигнала в линии управления БПС пропорциональна расстоянию до места повреждения (в нашем случае – до геометрического центра БПС).

Заметим, что метод стоячих волн известен давно, но он не получил широкого применения из-за аппаратной сложности. Современный уровень развития электроники, радио-, нанофотоники и микропроцессорной техники позволяет виртуально и аппаратно с высоким быстродействием реализовать онлайн-алгоритм и методику высокоточного дистанционного определения координат удаления БПС простым путем, используя имеющуюся линию управления БПС и элементарный алгоритм метода определения места повреждения линии на основе возникающего при КЗ в линии эффекта распространения стоячих волн [6].

Метод стоячих волн предполагает измерение полного входного сопротивления поврежденной линии управления в широком диапазоне частот. Входное сопротивление легче всего определить измерением тока в линии при постоянстве напряжения на входе. Следовательно, для определения расстояния как координаты до места замыкания линии, а значит, до центра места нахождения БПС по этому методу требуется высокочастотный генератор синусоидального сигнала, измеритель входного сопротивления линии управления и микроконтроллер (МК), который в реальном времени измеряет параметры электрической линии управления. В основу методики оценки положены приведенные выше модель контроля и алгоритм определения расстояния до места повреждения или точки КЗ линии управления БПС, совмещенной с геометрическим центром БПС. При подключении к неповрежденной линии в МК по ее определению автоматически вводится определенная на данный момент времени длина этой линии управления. Микроконтроллер вычисляет начальную частоту измерения и формирует алгоритм дистанционного контроля и определения координаты удаления БПС. Одновременно измерением тока при сохранении постоянства напряжения на входе определяется входное сопротивление линии управления БПС. Изменением

частоты тестового сигнала, вводимого в линию управления, МК находит по максимальному току частоту резонанса неповрежденной линии. Последующим подключением к другим линиям, связанным с исследуемым БПС, определяются их резонансные частоты. По отношению частот резонанса на длине линии управления МК вычисляет расстояние до БПС, которое соответствует точке заданного КЗ или повреждения линии управления БПС. Совпадение их с геометрическим центром БПС соответствует координате удаления до БПС; несовпадение сигнализирует о проблеме с данной линией управления.

Результаты моделирования, численные результаты и аналитическое описание [6] статистически с удовлетворительной точностью ~10 % от линейного размера БПС совпадают с данными, получаемыми на описанной выше математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод определения координат местоположения БПС, управляемого по линии связи, путем дистанционной онлайн-оценки дальности его удаления при знании углового положения аналогичен методам, используемым человеком для ориентации в трехмерном пространстве. При использовании изложенного в статье дистанционного способа оценки удаления БПС вкуче с видеонавигацией, обеспечивающей получение изображения местности камерой, с последующим анализом этого изображения спецпроцессором или компьютером может быть получен исчерпывающе полный набор координат для обеспечения автономной ориентации БПС. С учетом краткого изложения можно сделать следующий вывод. Рассмотренные модель, алгоритм оценки и методика реализации дистанционного способа определения дальности удаления БПС волновым методом, основанным на эффекте стоячих волн, используемым при контроле состояния электрических линий и определения мест повреждения или короткого замыкания в линиях, являются высокоэффективными для дистанционного контроля состояния БПС [8–13] в критических и опасных для жизни человека ситуациях, в труднодоступной и пересеченной местности [14–17].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась при поддержке Минобрнауки РФ и в соответствии с ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2014–2020 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // *Успехи современной радиоэлектроники. Зарубежная радиоэлектроника*. 1988. № 6. С. 13–20.
2. Bol'shanin A.A., Slobodyan S.M., Yakovlev A.R., Vasil'eva L.A. Two-channel optical transducer for an industrial inspection system // *Measurement Techniques*. 1987. V. 30. № 10. P. 954–956.
3. Цупин А.А., Слободян С.М. Лазерные средства навигационного обслуживания для ориентирования подвижных объектов. М.: Мэйлер. 2013. 168 с.
4. Семенова Л.Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов. *Наука и образование сегодня*. 2018. № 4. С. 6–8.
5. Бондарев В.Г. Видеонавигация летательного аппарата // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 213. С. 54–56.

6. Белецкий А.Ф. Основы теории линейных электрических цепей. М.: Связь, 1967. 608 с.
7. Vashchuk S.P., Slobodyan S.M., Vashchuk D.S. A method of controlling the parameters of a sealed cable gland. *Measurement Techniques*. 2018. V. 61. № 11. P. 1148–1153.
8. Skjetne R., Smogeli Q.N., Fossen T.I. A nonlinear ship manoeuvring model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship // *Modeling, Identification and Control*. 2004, V. 25. № 1. P. 3–27.
9. Sorensen A.J., Sagatun S.I. Fossen T.I. Design of a dynamic positioning system using model-based control // *Control Engineering Practice*. 1996. V. 4 (3). P. 359–368.
10. Sorensen R., Fossen T.I., Kokotovic P.V. Robust output maneuvering for a class of nonlinear systems // *Automatica*. 2004. V. 40 (3). P. 373–383.
11. Lefeber E., Petersen K.Y., Numeuer H. Tracking control of an underactuated ship. *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech.* 2003. V. 11(1). P. 52–61.
12. Cheng Y., Zhang W. Concise deep reinforcement learning obstacle avoidance for underactuated unmanned marine vessels. *Neurocomputing*. 2018. V. 272. P. 63–73.
13. Alsaraj A., Stuffle G. Investigation of hardware-in-loop simulation (HILS) for guidance system // *2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. 2015. P. 704–708.
14. Deeva V., Slobodyan S. Entropy estimation of a dynamical system via a contact interaction. *Safety and Reliability – Theory and Applications – Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017*. P. 2577–2584.
15. Khamis A., Naidu D.S., Kamel A.M. Nonlinear finite-horizon regulation and tracking for systems with incomplete state information using differential state dependent Riccati equation // *International Journal of Aerospace Engineering*. 2014. P. 1–12.
16. Eren F., Pe’eri S., Thein M.-W., Rzhanov Y., Celikkol B., Swift M.R. Position, orientation and velocity detection of unmanned underwater vehicles (UUVS) using an optical detector array // *Sensors*. 2017. V. 17. P. 1741.
17. Yan Z.P., Wang L., Zhang W., Zhou J., Wang M. Polar grid navigation algorithm for unmanned underwater vehicles. *Sensors*. 2017. V. 17. P. 1599.

THE MODEL OF ON-LINE ESTIMATION OF DISTANCE TO WIRE-CONTROLLED OBJECT

D.A. BARCHUKOV, Cand Sci, S.M. SLOBODYAN, Dr Sci

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

Based on the analysis of the possibilities of using existing models, methods and techniques for on-line monitoring and control of unmanned dynamic objects, a mathematical model has been developed for the remote assessment of the removal of an unmanned mobile object controlled by cable (wire). The presence of a model and method for remote evaluation of the removal of an unmanned object controlled by wires increases the reliability of control to eliminate critical situations in harsh conditions of radio countermeasures and to set powerful electromagnetic interference to control.

Keywords: autonomous mobile object, cable control, wave method, assessment of the distance of the control object, model, navigation system.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and in accordance with the FTSTP “Research and development in priority areas of the development of science and technology” for 2014–2020.

REFERENCES

1. Slobodyan S.M., Tsupin A.A. Laser navigation systems of autonomous vehicles // *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki. Zarubezhnaya radioelektronika*. 1988. No 6, pp.13–20. (In Russian).
2. Bolshanin A.A., Slobodyan S.M., Yakovlev A.R., Vasileva L.A. Two-channel optical transducer for an industrial inspection system. *Measurement Techniques*. 1987. V. 30. No 10, pp. 954–956.
3. Tsupin A.A., Slobodyan S.M. Lazernyye sredstva navigatsionnogo oborudovaniya dlya oriyentirovaniya podvizhnykh obyektov [Laser tools of navigation equipment for orienteering mobile objects]. Moscow: Meiler. 2013. 168 p.
4. Semenova L.L. Modern methods of navigation of the unmanned aircrafts. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2018. No 4, pp. 6–8. (In Russian).
5. Bondarev V.G. An aircraft’s video navigation. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. 2015. No 213, pp. 54–56. (In Russian).
6. Beletsky A.F. Osnovy teorii lineynykh elektricheskikh tsepey [Fundamentals of the theory of linear electrical circuits]. Moscow: Svyaz’. 1967. 608 p.
7. Vashchuk S.P., Slobodyan S.M., Vashchuk D.S. A method of controlling the parameters of a sealed cable gland. *Measurement Techniques*. 2018. V. 61. No 11, pp. 1148–1153.
8. Skjetne R., Smogeli Q.N., Fossen T.I. A nonlinear ship manoeuvring model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship. *Modeling, Identification and Control*. 2004. V. 25. No 1, pp. 3–27.
9. Sorensen A.J., Sagatun S.I. Fossen T.I. Design of a dynamic positioning system using model-based control. *Control Eng. Practice*. 1996. V. 4 (3), pp. 359–368.
10. Sorensen R., Fossen T.I., Kokotovic P.V. Robust output maneuvering for a class of nonlinear systems. *Automatica*. 2004. V. 40 (3), pp. 373–383.
11. Lefeber E., Petersen K.Y. Numeuer H. Tracking control of an underactuated ship. *IEEE Trans. Contr. Sys. Tech*. 2003. V. 11 (1), pp. 52–61.
12. Cheng Y., Zhang W. Concise deep reinforcement learning obstacle avoidance for underactuated unmanned marine vessels. *Neurocomputing*. 2018. V. 272, pp. 63–73.
13. Alsaraj A., Stuffle G. Investigation of hardware-in-loop simulation (HILS) for guidance system. 2015. *IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. 2015, pp. 704–708.
14. Deeva V., Slobodyan S. Entropy estimation of a dynamical system via a contact interaction. *Safety and Reliability – Theory and Applications – Proceedings of the 27th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2017*, pp. 2577–2584.
15. Khamis A., Naidu D.S., Kamel A.M. Nonlinear finite-horizon regulation and tracking for systems with incomplete state information using differential state dependent Riccati equation. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2014, pp. 1–12.
16. Eren F., Pe’eri S., Thein M.-W., Rzhanov Y., Celikkol B., Swift M.R. Position, orientation and velocity detection of unmanned underwater vehicles (UUVS) using an optical detector array. *Sensors*. 2017. V. 17, pp. 1741–1745.
17. Yan Z.P., Wang L., Zhang W., Zhou J., Wang M. Polar grid navigation algorithm for unmanned underwater vehicles. *Sensors*. 2017. V. 17, pp. 1599–1604.

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ФОТОИОНИЗАЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Н.И. ИВАНОВА, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет, 170026, Тверь,
наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: enatashai19@yandex.ru

© Иванова Н.И., 2019

Приведен обзор современных фотоионизационных детекторов газов и паров. Представлена их классификация. Показано, что существующую типологию средств фотоионизационного контроля целесообразно дополнить новым классом детекторов, которые основаны на измерении ионного тока между плоскопараллельными электродами, возникающего под действием контактной разности потенциалов, и не требуют внешнего источника питания. Рассмотрены конструкции фотоионизационных детекторов с неразделенными и разделенными объемами излучения и фотоионизации. Описаны принципы действия этих детекторов. Приведены схемы фотоионизационных детекторов с коаксиальным, аксиальным и плоскопараллельным расположением электродов, а также схема нового типа фотоионизационного детектора, не требующего использования внешнего источника питания, в котором сбор ионов осуществляется под действием контактной разности потенциалов. Представлены схемы комбинированного и многоэлектродного фотоионизационного детектора. Описана работа всех детекторов и выделены их достоинства и недостатки. Приведены их метрологические характеристики и области применения.

Ключевые слова: фотоионизация, детектор, ультрафиолетовая лампа, расположение электродов, источник питания, разность потенциалов, высокая чувствительность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие технологий в различных отраслях промышленности сопровождается производством новых веществ и материалов, что в свою очередь расширяет спектр задач контроля качества. Эти задачи решаются с помощью различных средств аналитической техники, среди которых важное место занимают фотоионизационные детекторы (ФИД). Обзор современных детекторов [1] позволил установить, что по сравнению с другими детекторами ФИД обладают такими преимуществами, как высокая чувствительность, быстродействие, простота конструкции и низкая стоимость.

В статье предполагается проанализировать имеющиеся в литературе сведения за последние пятнадцать лет о конструкциях, характеристиках и аналитическом применении ФИД, а также составить классификацию современных ФИД. На рис. 1 представлена классификация современных ФИД, учитывающая следующие признаки: расположение объемов излучения и фотоионизации и конструкции электродов. Как было выявлено предварительными исследованиями ФИД, проводимыми на кафедре, данный детектор может работать в генераторном режиме. Поэтому в классификацию ФИД сочли целесообразным внести новый дополнительный признак – наличие или отсутствие внешнего источника питания. Далее приводится описание ФИД с неразделенными и разделенными объемами излучения и фотоионизации [2], их принципы действия и работа.

ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С НЕРАЗДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕМАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ

В этих детекторах излучение, испускаемое электрическим разрядом в каком-либо инертном газе или водороде, через светопроводящий канал вводится в объем ионизационной камеры. Камера при этом не отделена от излучателя какой-либо преградой, препятствующей движению газа из одного объема в другой.

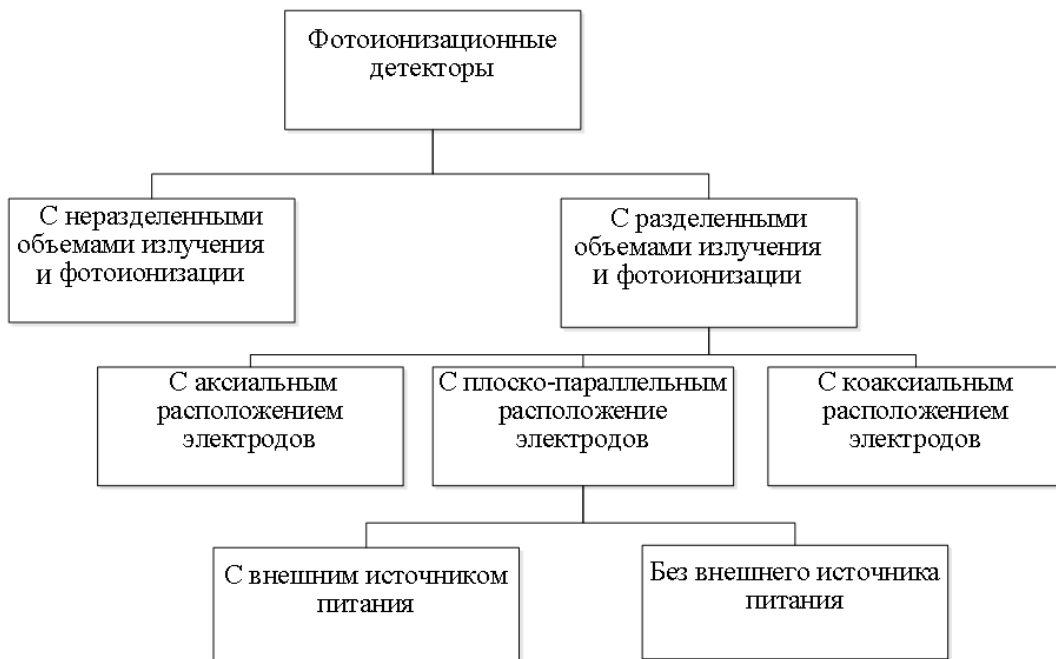


Рис. 1. Типы фотоионизационных детекторов

На рис. 2 представлена схема ФИД с неразделенными объемами излучения и ионизации. Принцип работы такого детектора следующий. В потоке дополнительного газа, например аргона, поступающего в камеру по каналу 1, возбуждается коронный газовый разряд постоянного тока. На электроды 2 и 3 разрядника подается напряжение 2 400 В для создания коронного разряда. В результате образуются метастабильные атомы аргона, которые при высвечивании создают фотопоток, на пути которого помещают коллекторный электрод 3. Анализируемый газ поступает в детектор по каналу 4. Образующиеся фотоны непосредственно ионизируют молекулы компонентов анализируемого газа (либо реакция происходит за счет передачи энергии фотонов через вновь образующиеся метастабильные атомы аргона). Количество образовавшихся ионов измеряется при помощи поляризующегося и коллекторного электродов.

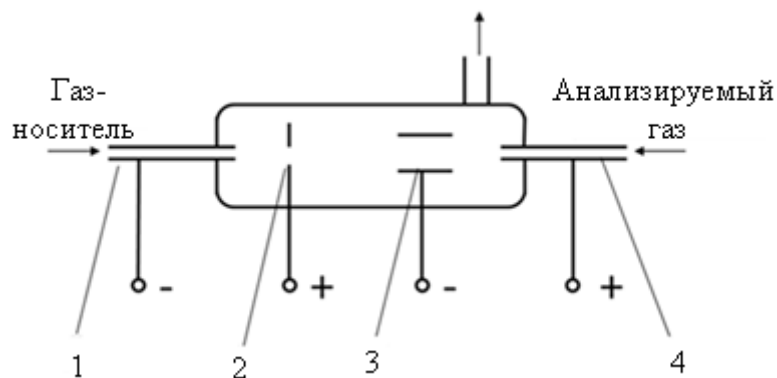


Рис. 2. Схема ФИД с неразделенными объемами излучения и фотоионизации

Несмотря на высокую чувствительность, ФИД с разделенными объемами излучения и фотоионизации не нашел широкого применения. Одним из главных его недостатков является использование вакуумной системы, что усложняет систему детектирования. Кроме того, в детекторах такого типа в зависимости от давления в камере меняется спектральная характеристика излучения, и это влияет на чувствительность. Детекторы, работающие при атмосферном давлении, имеют повышенный уровень шума, определяемый нестабильностью разряда.

ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С РАЗДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕМАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИОНИЗАЦИИ

Наибольшее распространение получили ФИД с разделенными объемами излучения и фотоионизации. Принцип работы таких детекторов состоит в том, что фотоны от источника ультрафиолетового (УФ) излучения попадают в ионизационную камеру детектора. Через эту камеру протекает газ-носитель, выбранный таким образом, чтобы его потенциал ионизации был значительно выше энергии фотонов. В этом случае газ-носитель не ионизируется. При появлении анализируемого вещества в камере детектора возникает ионный ток, пропорциональный концентрации этого вещества.

Важнейшим элементом ФИД с разделенными объемами излучения и фотоионизации является источник УФ-излучения. В качестве источников излучения в детекторах используют УФ-лампы [3], которые определяют чувствительность детектирования и обеспечивают селективность. К лампе предъявляется ряд требований по сроку службе, потребляемой мощности, стабильности светового потока и др. Состав спектра зависит от газового наполнения и материала окна лампы. В основном используются лампы, в которых качестве рабочего газа используются аргон, излучающий фотоны с энергией 11,8 и 11,6 эВ, ксенон (9,57 и 8,44 эВ), криптон (10,64 и 10,03 эВ). Окно лампы изготавливают из фторида магния. В лампах используют два способа питания: постоянным (тлеющий разряд) и переменным (безэлектродный разряд) током. Лампа тлеющего разряда содержит электродную систему, выполненную из титана. К достоинствам этой лампы можно отнести стабильность работы в течение длительного времени, с сохранением постоянного состава спектра. В высокочастотных безэлектродных лампах нет такого эффективного поглотителя, поэтому они имеют худшую стабильность и меньший срок службы. Достоинством безэлектродных ламп является меньшее энергопотребление.

Различают ФИД с коаксиальным [4], аксиальным [1] и плоскопараллельным [5] расположением электродов в ионизационной камере (рис. 3).

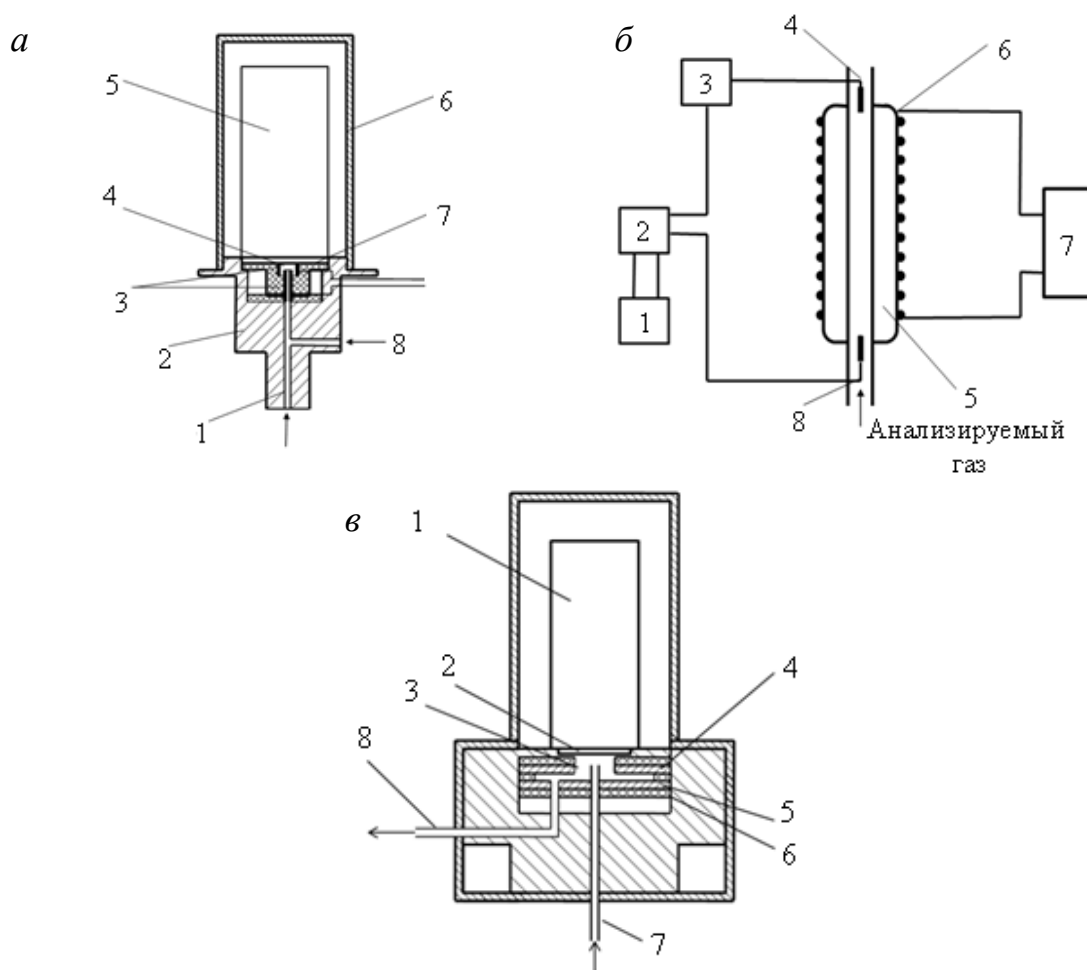


Рис. 3. Схемы ФИД: с коаксиальным (а); аксиальным (б) и плоскопараллельным (в) расположением электродов

В ФИД наиболее часто используют коаксиальную систему расположения электродов. Соответствующая схема детектора изображена на рис. 3а. Анализируемое вещество вводится через канал 1 основания детектора. Капиллярная колонка проходит через канал основания детектора 2. Верхний ее конец находится в ионизационной камере 4. Эта камера образована из коаксиальных электродов 3, соединенных с электрометром и источником питания, и системы изоляторов 7. УФ-лампа 5 прижимается к ионизационной камере при помощи элементов, расположенных внутри кожуха 6. В основании детектора расположен канал 8 для ввода газа поддува. В детекторе отсутствуют герметизирующие уплотнители и применяются изоляционные элементы, что обеспечивает высокую рабочую температуру. Вывод анализируемого вещества осуществляется через зазор между источником ионизации и камерой детектора. Попадание небольшого количества кислорода в ионизационную камеру не ухудшает характеристик ФИД, так как кислород не ионизируется УФ-излучением.

На рис. 3б представлена схема ФИД с аксиальным расположением электродов. ФИД состоит из УФ-лампы 5, расположенной в поле индуктора б колебательного контура генератора 7, электродов 4, на которые подается электрический потенциал от источника питания 3. При включении генератора в лампе возбуждается

сопровождается УФ-излучением разряд в парах металлов, таких как ртуть, цинк, кадмий. Под действием УФ-излучения анализируемое вещество, протекающее по трубке 8, ионизируется. Между электродами возникает ионизационный ток, который поступает к усилителю 2 и регистрируется потенциометром 1.

На рис. 3в приведена схема ФИД с плоскопараллельным расположением электродов. Работа этого детектора заключается в следующем. Анализируемый газ через входное 7 и выходное 8 отверстия непрерывно прокачивается через проточную камеру детектора 3. В камере, образованной электродами 4 и 5 и изолятором 6, газ ионизируется под действием излучения, которое поступает от лампы 1 через окно 2. Образовавшийся ток усиливается в результате ионизации атомов и молекул и измеряется.

Рассмотренные выше ФИД для своей работы требуют использования стабилизированных источников питания, которые прикладываются к электродам. В современную классификацию средств фотоионизационного контроля целесообразно добавить новый классификационный признак, особенностью которого является то, что он позволяет учесть способ формирования разности потенциалов между электродами.

На рис. 4 представлена схема ФИД, способного работать без внешнего источника питания. Такой детектор был назван генераторным ФИД [6, 7]. Детектор содержит проточную камеру, образованную двумя дисковыми электродами 3 и 4 и фторопластовой прокладкой 7, УФ-лампу 1, электрометр 5 и регистратор 6 сигнала детектора. Электрод 3, размещенный на выходном окне УФ-лампы, имеет отверстие 8, в которое вмонтировано окно 2, изготовленное из материала, прозрачного для излучения УФ-лампы. Второй электрод снабжен отверстиями для ввода и вывода потока анализируемого вещества. Оба электрода выполнены из металлов с различными значениями работы выхода электронов. Детектор снабжен защитным экраном 9.

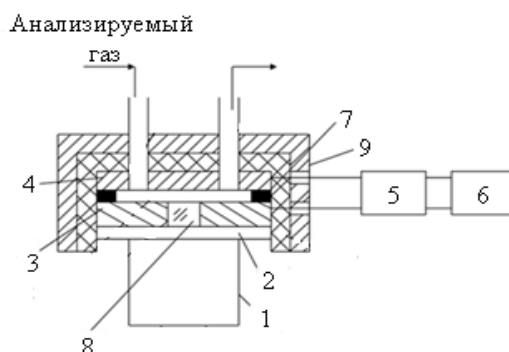


Рис. 4. Схема генераторного ФИД

Отличие этого детектора от ранее известных состоит в том, что сбор ионов в камере происходит за счет контактной разности потенциалов, которая формируется между электродами, выполненными из разнородных металлов. Вследствие этого в камере детектора возникает электрическое поле, под действием которого ионы перемещаются внутри камеры. Значение сигнала измеряется и регистрируется с помощью усилителя и регистратора. Получаемый сигнал пропорционален концентрации анализируемых компонентов.

В последнее время нашли применение комбинированные устройства, которые представляют собой сочетание нескольких детекторов [8, 9]. Анализируемые вещества, выходящие из колонки, одновременно поступают в несколько детекторов, соединенных последовательно и параллельно. На регистрируемых хроматограммах отражаются те вещества, к которым чувствителен один из селективных детекторов.

КОМБИНИРОВАННЫЕ И МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ФОТОИОНИЗАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Схема комбинированного детектора приведена на рис. 5. Он представляет собой ФИД, совмещенный в одном корпусе с детектором электронного захвата, установленным последовательно по ходу потока анализируемого вещества. Работа детектора осуществляется следующим образом. Газ-носитель по каналу 1 через отверстие 2 в изоляторе 3 и аноде 4 поступает в ионизационную камеру 5 детектора электронного захвата. Корпус этого детектора является коллекторным электродом 6. Из детектора электронного захвата через отверстие 7 поток анализируемого вещества поступает в ионизационную камеру ФИД 8, где расположен измерительный электрод 9, а также канал выхода 10 газа из детектора. УФ-лампа 12 соединена с ионизационной камерой через прозрачное окно 11. С помощью крана потоки газов-носителей переключаются таким образом, что комбинированный детектор может последовательно работать в двух режимах: ФИД и детектора электронного захвата.

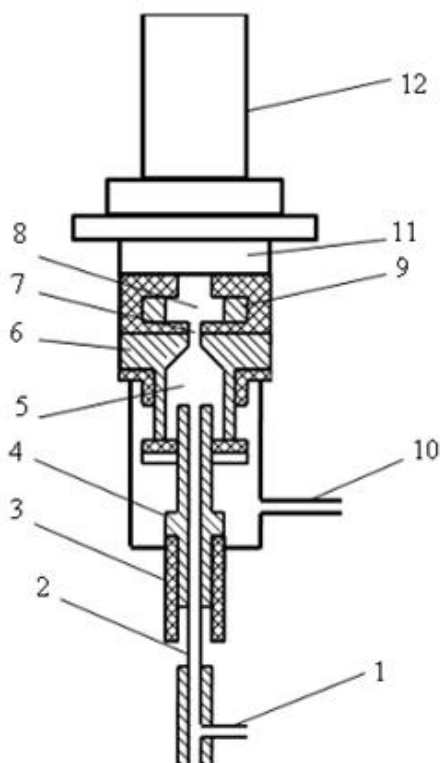


Рис. 5. Схема комбинированного детектора

В комбинированных детекторах нашли применение наборы различных источников света для идентификации многокомпонентных смесей. Двойное детектирование позволяет определять классы органических веществ и в сочетании с измерением времени удерживания обеспечивает идентификацию отдельных компонентов. Данная система позволяет расширить перечень исследуемых соединений за счет тех, на которые не реагирует ФИД.

Среди ФИД находят применение и многоэлектродные детекторы (рис. 6) [10]. С их помощью решается задача идентификации компонентов анализируемого вещества. В пространстве между первой парой электродов анализируемый компонент ионизируется излучением от УФ-лампы 1, прошедшим через фильтр 2 и окно лампы 3.

Затем в пространстве между второй парой электродов анализируемое вещество ионизируется излучением от УФ-лампы, прошедшим только окно лампы и имеющим более высокую энергию фотонов, чем излучение в пространстве между первой парой электродов.

Таким образом, в камере 4 детектора создаются две зоны ионизации с различными условиями ионизации. С помощью собирающихся электродов выделяются два сигнала, отвечающих различным условиям ионизации одного и того же анализируемого вещества. Эти сигналы несут информацию не только о количественном, но и о качественном его состоянии.

В последнее время усиленно разрабатываются многомерные детекторы, в которых имеются одна или несколько зон детектирования, объединенных в одном корпусе, а выходные сигналы отражают разные свойства детектируемых компонентов. На рис. 7 представлена ионизационная камера 1 с парами электродов 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7, установленными в разных частях камеры. УФ-лампа снабжена оптическими фильтрами 8 и 9, имеющими характеристики пропускания УФ-излучения, отличные друг от друга. В камере детектора создаются три зоны ионизации с различными условиями. Фотоионизационный детектор формирует три сигнала, несущих информацию о количественном и качественном составе смеси. Это расширяет возможности идентификации компонентов анализируемой смеси.

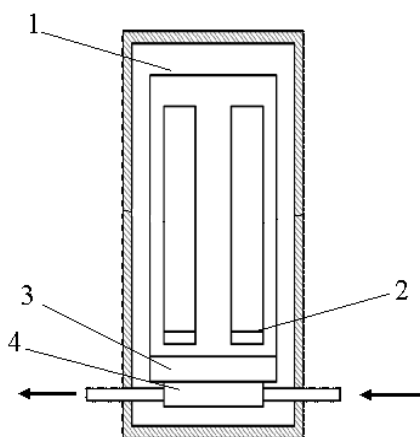


Рис. 6. Схема многоэлектродного ФИД

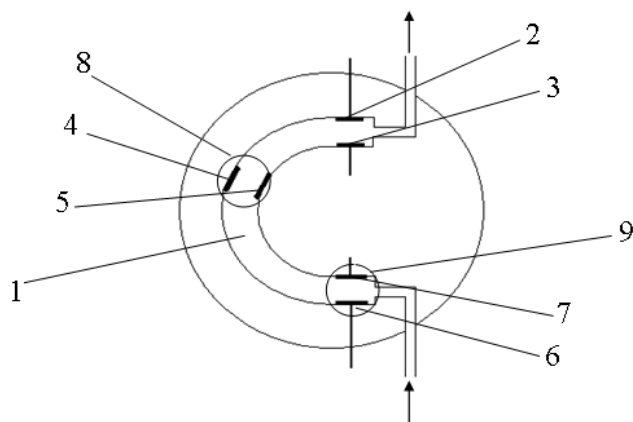


Рис. 7. Ионизационная камера (вид сверху)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотоионизационные детекторы становятся одним из основных детекторов газовых хроматографов наряду с пламенно-ионизационным детектором и катарометром. Высокая чувствительность, составляющая порядка $2 \cdot 10^{-10}$ г/с, ко многим органическим и неорганическим соединениям вместе с ярко выраженной селективностью определяет преимущества применения ФИД в насадочной и газовой хроматографии. Кроме того, ФИД могут обеспечивать селективное измерение концентрации отдельных компонентов в многокомпонентных средах и использоваться в диагностике заболеваний дыхательной системы.

Улучшение конструкции и применение новых материалов – основные пути повышения эксплуатационных характеристик ФИД. Перспективны разработки комбинированных и многоэлектродных детекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фарзане Н.Г., Илясов Л.В. Автоматические детекторы газов и жидкостей. М.: Энергоатомиздат. 1983. 96 с.
2. Бражников В.В. Детекторы для хроматографии. М.: Машиностроение. 1992. 320 с.
3. Будович В.Л., Будович Д.В., Полотнюк Е.Б. Новые лампы вакуумного ультрафиолета для газоаналитической техники // *Журнал технической физики*. 2006. № 4. С. 140–142.
4. Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред. СПб.: Лань. 2012. 431 с.
5. Патент РФ 2043623 *Фотоионизационный детектор для газовой хроматографии* / Костев О.Н., Калмановский В.И.; заявл. 09.03.1993; опубл. 10.09.1995, Бюл. № 13.
6. Патент РФ64345 *Фотоионизационный детектор газов и паров* / Илясов Л.В., Евланова Н.И.; заявл. 02.02.2010; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.
7. Евланова Н.И., Илясов Л.В. Математическая модель статической характеристики фотоионизационного генераторного детектора. *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2013. Вып. 24. № 2. С. 45–49.
8. Сакодынский К.И. Аналитическая хроматография. М.: Химия. 1993. 463 с.
9. Лейбниц Э.В., Штруппе Х.Г. Руководство по газовой хроматографии. М.: Мир. 1988. 250 с.
10. Патент РФ 2043623 *Фотоионизационный детектор для газоаналитической аппаратуры* / Будович Л.В., Шишанская Л.П.; заявл. 01.06.1994; опубл. 20.04.1996, Бюл. № 13.

REVIEW OF MODERN PHOTO-IONIZATION DETECTORS

N.I. IVANOVA, Cand Sci

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: enatashai19@yandex.ru

This article provides an overview of modern photoionization detectors of gases and vapors. Their classification is presented. It is shown that it is expedient to introduce a new class of detectors into the existing classification of photoionization control tools, based

onmeasuring the ion current between plane-parallel electrodes arising from the contact potential difference and not requiring an external power source. The constructions of photoionization detectors are considered: with unseparated and separated volumes of radiation and photoionization. The principles of operation of these detectors are described. The schemes of photoionization detectors with a coaxial, axial and plane-parallel arrangement of electrodes, as well as a scheme of a new type of photoionization detector that does not require the use of an external power source, in which ions are collected under the action of a contact potential difference, are presented. The schemes of the combined and multielectrode photoionization detector are presented. The operation of all detectors is described and their advantages and disadvantages are highlighted. Their metrological characteristics and applications are given.

Keywords: photoionization, detector, ultraviolet lamp, arrangement of electrodes, power source, potential difference, high sensitivity.

REFERENCES

1. Farzana N.G., Ilyasov L.V. Avtomaticheskie detektory dlya gazov i zhidkostej [Automatic detectors for gases and liquids]. Moscow: Energoatomizdat. 1983. 96 p.
2. Brazhnikov V.V. Detektory dlya hromatografii [Detectors for chromatography]. Moscow: Engineering. 1992. 320 p.
3. Budovich V.L., Budovich D.V., Polotnyuk, E.B. New vacuum ultraviolet lamps for gas analysis techniques. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2006. No 4, pp. 140–142. (In Russian).
4. Sazhin S.G. Pribori kontrolya sostava i kachestva tehnologicheskix sred [Devices of control of structure and quality of technological environments]. Saint-Petersburg: LAN'. 2012. 431 p.
5. Patent RF 2043623 *Fotoionizatsionnii detector dlya gazovoi hromatografii* [Photoionization detector for gas chromatography] / Kostev O.N., Kolmanovskii V.I.; Declared 09.03.1993. Published 10.09.1995. Bulletin No 13.
6. Patent RF 64345 *Fotoionizatsionnii detector dlya gazoviparov* [Photoionization detector of gases and vapors]. Ilyasov L.V., Evlanova N.I.; declared 02.02.2010; published 20.05.2010, Bulletin No. 14.
7. Evlanova N.I., Ilyasov L.V. Matematicheskaya model staticheskoy harakteristiki fotoionizatsionnogo generatognogo dektora [Mathematical model of static characteristics of photoionization generator detector] *Vestnik TvGTU*. 2013. V. 24, No 2, pp. 45–49.
8. Sakadynsky K.I. Analiticheskay hromatografiya [Analytical chromatography]. Moscow: Himiya. 1993. 463 p.
9. Leibniz E.V., Struppe H.G. Rukovodstvo po gazovoi hromatografii [Manual of gas chromatography]. Moscow: Mir. 1988. 250 p.
10. Patent RF 2043623 *Fotoionizatsionnii detector dlya gazoanaliticheskoi hromatografii* [Photoionization detector for gas-analyzing equipment]. Budovich L.V., Shishanskaya L.P.; declared 01.06.1994; published 20.04.1996, Bulletin No 13.

СОБЫТИЙНАЯ МОДЕЛЬ ОБМЕНА ДАННЫМИ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Г.М. СОЛОМАХА, д-р физ-мат. наук, С.В. ХИЖНЯК

Тверской государственной университет, 170000, Тверь, ул. Желябова, д. 33,
e-mail: stanislav.khizhnyak@gmail.com

© Соломаха Г.М., Хижняк С.В., 2019

В статье приводится сравнение подходов к организации обмена данных между компонентами системы, работающими с высокой степенью асинхронности. Наиболее подходящими подходами при решении подобной задачи являются событийный и реактивный. В случае использования реактивного подхода неизбежно формирование дополнительных требований к системе, что ведет к усложнению структуры самой системы и ее поддержки. В статье приведена упрощенная схема архитектуры системы, между компонентами которой происходит обмен данными; изложены оба подхода применительно к данной системе; приведены схемы взаимодействия между ее компонентами для каждого из них. Выявлены и обоснованы дополнительные требования, формируемые при использовании реактивного подхода. Показаны дополнительные преимущества, приобретаемые при использовании событийного подхода. Рассмотрен пример работы системы при применении событийного подхода.

Ключевые слова: система мониторинга, событийная модель, реактивная модель, проектирование, событие, мониторинг производства.

ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд возможных подходов к построению архитектур информационных систем, каждый из которых налагает в той или иной мере обязательные требования к модели обмена данными между компонентами. В случае, когда целевая система является распределенной или предполагает возможность работы в распределенном режиме и с ростом количества распределенных компонентов, повышается степень асинхронности процессов функционирования каждого отдельного компонента относительно остальных [1].

В процессе проектирования архитектуры системы мониторинга производственных процессов, обладающей возможностью работы в распределенном режиме, возникла проблема выбора подхода к обмену данными, который удовлетворяет условиям, создаваемым при работе системы в распределенном режиме, и позволяет минимизировать вмешательство в работу системы, необходимое для добавления нового экземпляра одного из компонентов, а также дает возможность сократить затраты на расширение системы в случае необходимости (например, при изменении или расширении топологии инфраструктуры производства).

Рассмотрим упрощенную схему архитектуры системы, о которой идет речь (рис. 1). Ее можно разделить на блоки:

Outer,
Receiver,
Handler Hub,
Storage,
Data Endpoint,
Monitoring.

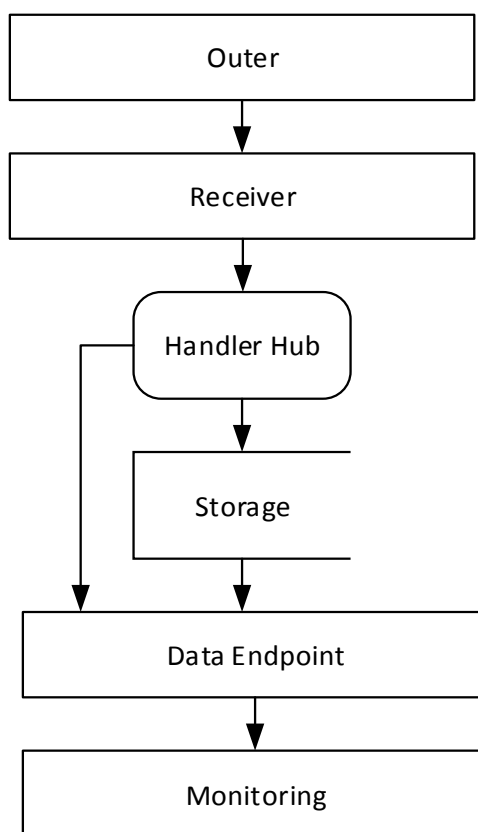


Рис. 1. Упрощенная схема архитектуры

Блок *Outer* не является полноценной частью системы. В него входят всевозможные датчики, программное обеспечение, необходимое для взаимодействия с ними и преобразования в формат, принимаемый системой.

Блок *Receiver* представляет собой точку входа данных о состоянии производства в систему. Данные из *Receiver* направляются в *Handler Hub*. Направление потоков данных на схеме отображено стрелками.

Handler Hub – блок, отвечающий за обработку событий системы и (при необходимости) генерацию новых, агрегирующих событий. После обработки события направляются в блоки *Storage* и *Data Endpoint*.

Блок *Storage* включает в себя программные компоненты, отвечающие за преобразование и сохранение данных в БД.

Data Endpoint является точкой доступа к данным системы с внешних терминалов, составляющих блок *Monitoring*.

Каждый из блоков состоит из ряда компонентов, однако в данном контексте это не имеет большого значения. Важно то, что в распределенном режиме работы в рамках системы может существовать более одного экземпляра каждого из блоков. Экземпляры одного блока могут как дублировать друг друга, так и решать совершенно разные задачи, что приводит к высокой степени асинхронности их работы относительно друг друга и прочих компонентов системы. В силу асинхронности процессов функционирования компонентов наиболее подходящими вариантами модели обмена данными являются реактивный и событийный [2, 3].

СОБЫТИЙНЫЙ ПОДХОД

Событийный подход предполагает работу с событиями и их атрибутами. Событие представляет собой абстракцию, имеющую имя, определяющее произошедшее изменение, и атрибуты, отражающие его суть [4]. В случае с рассматриваемой системой события представляют собой факты получения нового значения показателя с источника, согласно его спецификации, например, получение текущего значения температуры с термодатчика или получение нового значения от одного или нескольких обработчиков. Таким образом, схема взаимодействия между компонентами системы будет иметь вид, изображенный на рис. 2. При этом K больше либо равно M и M больше либо равно N в силу того, что компоненты во время работы могут генерировать собственные события.

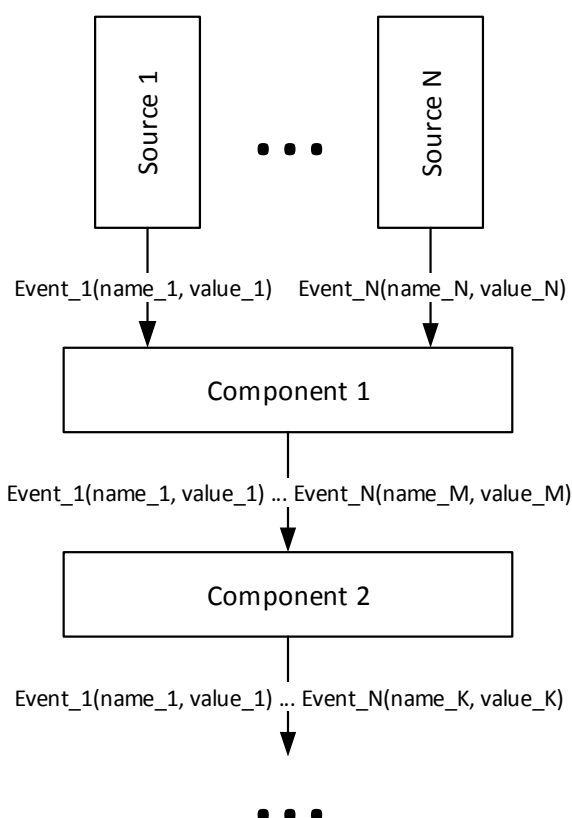


Рис. 2. Схема взаимодействия между компонентами системы при использовании событийного подхода

РЕАКТИВНЫЙ ПОДХОД

Реактивный подход предполагает работу с потоками данных и их изменениями. Его можно свести к частному случаю событийного, при котором всегда происходит одно событие: событие, говорящее об ожидаемом изменении какого-либо заранее определенного значения [5]. Суть реактивного подхода состоит в ожидании этого изменения, что обязывает программу содержать в себе информацию об источнике потока, структуре данных и характере их возможного изменения. В случае его применения схема взаимодействия примет вид, показанный на рис. 3.

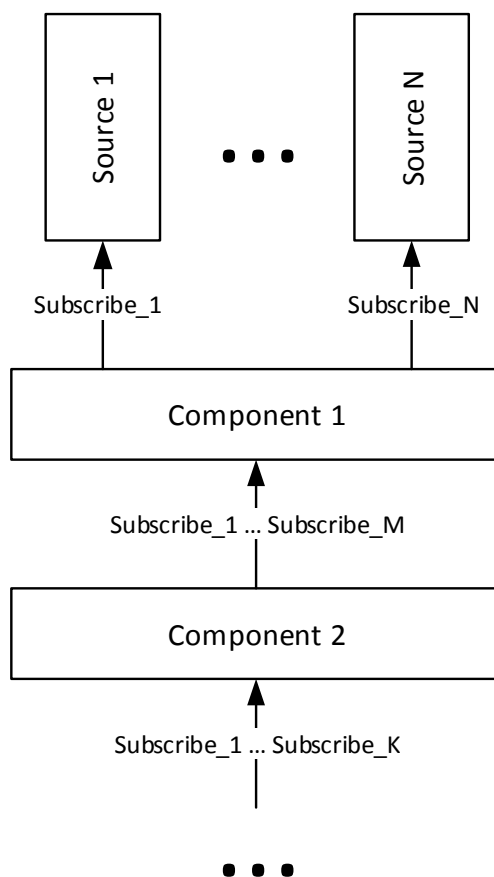


Рис. 3. Схема взаимодействия между компонентами системы при использовании реактивного подхода

Как видно из схемы, каждый из компонентов подписывается на изменения данных в другом для формирования потоков данных. Таким образом, в худшем случае компонент, находящийся в конце цепочки, нуждается в дополнительной информации обо всех источниках данных и их показателях в системе для того, чтобы подписаться на их изменения. В случае применения данного подхода к рассматриваемой системе должны быть предъявлены дополнительные требования:

наличие механизма описания источников данных и сигнатур изменений данных на стороне системы;

возможность добавления описания новых источников данных и сигнатур изменений данных без нарушения работы системы.

Указанные требования обуславливают необходимость реализации отдельного компонента, обеспечивающего их выполнение, что усложняет архитектуру. Кроме того, необходимость в заблаговременном определении источников увеличивает затраты на добавление новых наблюдаемых показателей и поддержку системы в целом.

В случае использования событийного подхода в силу произвольности характера событий и их сигнатуры – не наблюдаемые каким-либо отдельно взятым компонентом показатели игнорируются. Кроме того, так как в построенной архитектуре компонент, отвечающий за загрузку и выполнение обработчиков наблюдаемых показателей, предполагает возможность добавления новых обработчиков независимо от уже имеющихся, использование реактивного подхода существенно затруднит реализацию данного компонента, создание самих обработчиков, а также может снизить скорость их работы в силу необходимости в таком случае организации подписки на обрабатываемые источники.

В силу того, что каждый обработчик в свою очередь может генерировать новые события, событийный подход дает ряд преимуществ, обеспечивая возможность:

- построения суперпозиций обработчиков с помощью цепочек событий;
- обработки множества событий одним обработчиком без необходимости дополнительного описания обработчика в качестве источника данных;
- расширения набора показателей путем увеличения множества возможных событий.

Пример

Пусть имеется некоторый наблюдаемый показатель, отражающий, допустим, температуру некоторого устройства на производстве, и другой показатель, отражающий влажность помещения, в котором находится это устройство.

Текущие значения показателей передаются в систему в виде событий, имеющих имена: `Temperature` и `Humidity` соответственно и атрибут `value`, значение которого является текущим значением показателя. Пусть также условия производства требуют ручного включения системы охлаждения при достижении некоторого порога температуры, ручного включения системы вентиляции при достижении некоторого порога влажности и ручной остановки работы устройства при достижении порога обоих показателей вместе. Тогда могут быть созданы три обработчика:

```
TemperatureHandler,  
HumidityHandler,  
TemperatureHumidityExceedHandler.
```

Обработчик `TemperatureHandler` при получении каждого нового значения текущей температуры проверяет его на предмет превышения порога и в случае превышения генерирует событие `TemperatureExceed`. Затем терминал системы мониторинга, получив это событие, выводит на экран оповещение о необходимости ручного включения системы охлаждения устройства.

Обработчик `HumidityHandler` устроен аналогичным образом относительно влажности и в аналогичных условиях генерирует событие `HumidityExceed`.

`TemperatureHumidityExceedHandler` принимает события `TemperatureExceed` и `HumidityExceed` и при условии появления обоих в рамках заданного промежутка времени, например пяти секунд, генерирует событие `TemperatureAndHumidityExceedWarning`, при получении которого терминал выводит оповещение о необходимости отключения устройства.

Упрощенная схема взаимодействия обработчиков представлена на рис. 4.

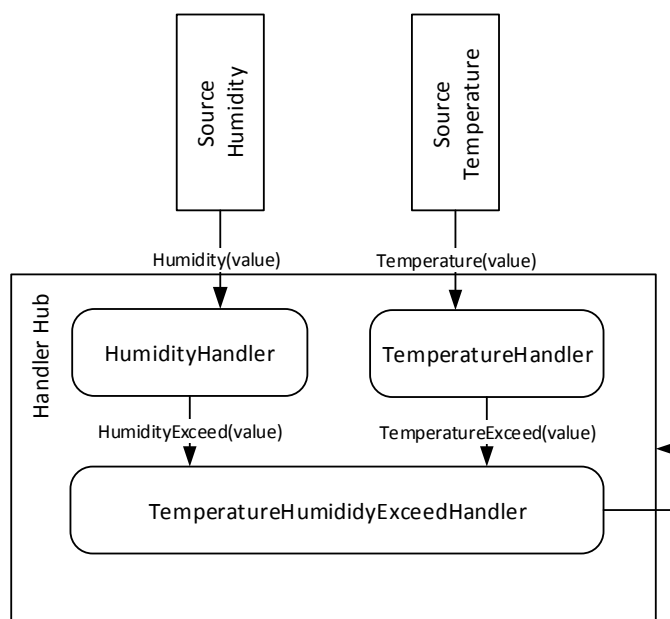


Рис. 4. Схема взаимодействия обработчиков в примере

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В силу особенностей реактивного подхода его применение повлечет формирование дополнительных требований к системе, в связи с чем необходима разработка дополнительных программных решений для обеспечения взаимодействия между компонентами системы – механизма описания и загрузки источников данных и их сигнатур и механизма расширения набора источников данных и их сигнатур без нарушения работы системы.

Кроме того, использование реактивного подхода увеличит сложность расширения и обслуживания системы и, соответственно, повысит затраты на ее поддержку. Событийный подход, напротив, лишен таких недостатков применительно к подобной системе, а также обладает большей степенью гибкости при расширении множества наблюдаемых показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толубаев В.Н. Распределенные системы управления автоматизированных систем // *Труды Братского государственного университета. Серия «Естественные и инженерные науки»*. 2015. Т. 1. С. 37–39.
2. Манифест реактивного программирования: портал [Электронный ресурс]. <http://www.reactivemanifesto.org/> Published on September 16 2014. (v2.0) (дата обращения: 02.08.2019).
3. Достлев Ю.С., Чередникова О.Ю. Событийная модель технологического объекта в системах реального времени // *Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе*. 2015. № 1–2. С. 68–72.
4. Шалыто А.А. Алгоритмизация и программирование для систем логического управления и «реактивных» систем // *Автоматика и телемеханика*. 2001. № 1. С. 3–39.
5. Шпаков В.М. Ситуационно-событийный подход к спецификации гибридных процессов // *Труды СПИИРАН*. 2007. № 4. С. 291–300.

EVENT DRIVEN DATA EXCHANGE MODEL IN PRODUCTION PROCESSES MONITORING SYSTEM

G.M. SOLOMAKHA, Dr Sci, S.V. KHIZHNYAK

Tver State University, 33, Zhelaybova St., 170000, Tver,
Russian Federation, e-mail: stanislav.khizhnyak@gmail.com

The article provides a comparison of the approaches to the organization of data exchange between system components operating with a high degree of asynchrony. The most suitable approaches for solving such a problem are event and reactive. In the case of a reactive approach, it is inevitable that additional requirements for the system will be formed, which leads to complication of the structure of the system itself and its support. The article presents a simplified diagram of the system architecture, between the components of which data is exchanged, both approaches are outlined for this system, and the schemes of interaction between its components for each of them. Identified and justified additional requirements formed when using the reactive approach. The additional benefits gained by using the event approach are given. The example of the system when using the event approach is considered.

Keywords: monitoring system, event model, reactive model, design, event, production monitoring.

REFERENCES

1. Tolubaev V.N. Distributed control systems of automated systems. // *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: yestestvennyye i inzhenernyye nauki*. 2015, V. 1, pp. 37–39. (In Russian).
2. Reactive programming manifest: portal [Electronic resource]. Access mode: <http://www.reactivemano.org/> Published on September 16 2014. (v2.0) (Date accessed: 08/02/2019).
3. Dostlev Yu.S., Cherednikova O. Yu. Event model technological object in real-time systems. *Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii v naukakh o prirode i obshchestve* 2015. No 1-2, pp. 68–72. (In Russian).
4. Shalyto A.A. Algorithmization and programming for logical control systems and “reactive” systems. *Avtomatika i telemekhanika*. 2001. No 1, pp. 3–39. (In Russian).
5. Shpakov V.M. Situational-event approach to the specification of hybrid processes // *Trudy SPIIRAN*. 2007, No 4, pp. 291–300. (In Russian).

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУГОЛЬНИКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПОСРЕДСТВОМ РАЗРАБОТКИ СКРИПТОВ PHP

А.С. КУЗЬМИНА, Н.А. МАНСУРОВА, канд. экон. наук

Тверской государственный университет, 170100, Тверь,
ул. Желябова, 33. e-mail: sasha5169619@gmail.com

© Кузьмина А.С., Мансурова Н.А., 2019

В работе рассмотрен графический метод оценки конкурентоспособности – многоугольник конкурентоспособности. Этот метод позволяет достаточно быстро провести анализ конкурентоспособности компании, базирясь на выделенном перечне критериев и их экспертной оценке. Результатом такого анализа является разработка рекомендаций по повышению уровня конкурентоспособности компании на рынке и эффективных мероприятий на их основе. Предложен алгоритм, который позволит в режиме реального времени строить многоугольник конкурентоспособности и, оценивая положение анализируемой компании в сравнении с конкурентами, обеспечить удержание конкурентоспособного преимущества. Разработана автоматизированная информационная система оценки конкурентоспособности организации, состоящая из PHP-скриптов, которые в зависимости от запросов к базе данных формируют HTML-страницы, доступные финансовым аналитикам и руководству организации. Кроссплатформенность скриптового языка PHP позволяет не беспокоиться о совместимости работы автоматизированной информационной системы с имеющимся в организации программно-техническим комплексом.

Ключевые слова: стратегический менеджмент, методы удержания стратегического преимущества, многоугольник конкурентоспособности, автоматизированная информационная система, PHP, программный алгоритм, лепестковая диаграмма.

ВВЕДЕНИЕ

Завоевание лидерских позиций на рынке товаров и услуг требует от компании точного расчета и максимального использования всех имеющихся у нее ресурсов для достижения желаемой цели. Однако, достигнув этой цели, компания сталкивается с гораздо более серьезной проблемой. Установив однажды определенную «планку», компания не должна снижать ее, уступать позиции по ключевым параметрам и должна постоянно подтверждать свои позиции лидера [1], иначе победа на рынке окажется краткосрочной. Лидирующая компания всегда в той или иной мере является примером осуществления деятельности для конкурентов. Сравнивая свои ресурсы и стратегии с лидером, конкурирующие компании всегда могут скорректировать свое поведение и захватить часть рынка, обнаружив слабые места лидера. В этой связи можно вспомнить провал некогда лидирующей на рынке фототехники и пленки компании «Kodak» [2]. Руководство не рассчитало уровень спроса на цифровую технику, в результате чего была упущена львиная доля своих возможностей и фирма утратила лидерство навсегда, уступив рынок компаниям «Canon», «Nikon», «Sony» и др.

Поэтому главная цель компании, занимающей лидирующие позиции на рынке, – сохранение своего доминирующего положения в течение длительного времени. В связи с этим жизненно необходима разработка методов удержания стратегического

преимущества на рынке товаров и услуг для любой компании-лидера, что и определяет актуальность темы проведения анализа конкурентоспособности в сравнении с ключевыми конкурентами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

К категории наиболее удобных способов оценки конкурентоспособности можно отнести многоугольник конкурентоспособности, который дает возможность сравнить и визуально представить широкий спектр ключевых свойств предприятия. Суть данного метода заключается в сравнительной оценке ключевых свойств данной компании и аналогичных параметров конкурентов и в последующей визуализации результатов сравнения в виде многоугольника [3]. Это обеспечивает сравнимость данных и возможность оценки положения компании как по каждому свойству отдельно, так и общей ситуации в совокупности свойств в целом.

Метод построения многоугольника конкурентоспособности состоит из трех последовательных этапов (рис. 1).

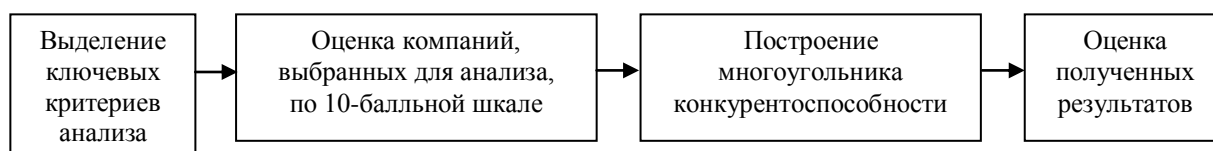


Рис. 1. Этапы построения многоугольника конкурентоспособности

Выделением ключевых критериев для построения многоугольника конкурентоспособности занимаются эксперты в области финансового менеджмента компании – финансовые аналитики. Они также проводят оценку каждого выделенного ключевого свойства конкурентоспособности предприятий по 10-балльной шкале, где 1 – самый низкий балл, а 10 является максимальным баллом – абсолютным преимуществом по данному ключевому свойству. Построение многоугольника конкурентоспособности представляет собой графический процесс соединения оценок положения компании по каждому ключевому свойству, представленных в виде векторов-осей. Путем наложения многоугольников конкурентоспособности компаний друг на друга выявляются сильные и слабые свойства компании по отношению к конкурирующим объектам и оценивается общий уровень конкурентоспособности компании в целом.

В данной работе предложен алгоритм, который позволит в режиме реального времени строить многоугольник конкурентоспособности на основе выделенных ключевых свойств предприятий и присвоенных им оценок с использованием скриптового языка общего назначения PHP. Одно из преимуществ использования скриптов PHP заключается в том, что они позволяют быстро и легко вычерчивать графики нужного вида (в зависимости от запросов к базе данных) и формируют HTML-страницы, отображаемые пользователю. В настоящее время PHP является одним из лидеров среди языков разработки веб-приложений, поскольку он поддерживается большинством хостинг-провайдеров, кроссплатформенен и достаточно удобен в использовании [4].

Построение графиков средствами PHP происходит в четыре основных этапа [5]:
создание рабочей области для строящегося графика;

непосредственное вычерчивание графика с параметрами, задаваемыми пользователем: идентификатор изображения, координаты изображаемого объекта (линии, дуги, многоугольники), цвет и шрифт для вывода текста, если это необходимо;

вывод окончательного рисунка с заданными на предыдущем шаге параметрами; высвобождение ресурсов ПК.

Многоугольник конкурентоспособности представляет собой в общем виде совокупность отрезков, начальные концы которых сходятся в центре диаграммы, а противоположные концы являются вершинами многоугольника, число углов которого задается пользователем на основе того количества ключевых свойств, которые были выбраны для анализа. Таким образом, построение многоугольника конкурентоспособности связано с окружностью, описанной вокруг него. Известно, что в параметрической форме уравнение окружности записывается следующим образом:

$$\begin{cases} x_i = x_0 + R \cos \varphi, \\ y_i = y_0 + R \sin \varphi, \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi, i = 1, n, \end{cases}$$

где x_i, y_i – координаты вершин многоугольника; x_0, y_0 – координаты центра окружности и самого рисунка; R – радиус окружности; φ – центральный угол сектора окружности, определяемый соотношением

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n},$$

где n – число углов многоугольника, которое определяется числом ключевых свойств, выбранных для анализа. Задача алгоритма построения многоугольника конкурентоспособности сводится к тому, что на первом шаге находятся координаты n отрезков, разделяющих окружность на n секторов (по числу ключевых свойств). Затем находятся координаты вершин неправильного многоугольника, которые необходимы для создания границ диаграммы. Данный алгоритм повторяется k -е число раз по количеству сравниваемых по ключевым свойствам компаний.

Приведем алгоритм построения многоугольника конкурентоспособности.

1. Зададим координаты начала координат – точки O .
2. Зададим n – количество отрезков, равное количеству ключевых свойств, выбранных для анализа.
3. Зададим k – число сравниваемых по ключевым свойствам компаний.
4. Вычислим угол φ .
5. Выберем из базы данных числовые значения соответствующих ключевых свойств и занесем эти показатели в массив 1.
6. Организуем цикл, пока не найдем координаты всех вершин: находим по системе уравнений координаты вершины; увеличиваем центральный угол φ на вычисленное значение; заносим координаты вершин в массив 2.
7. По полученным координатам из массива 2 рисуем десять отрезков, сходящихся в точке O .
8. Последовательно соединяем координаты массива 2 прямыми линиями.
9. Шаги 5–8 повторяем k раз.
10. Выводим построенный график на экран.
11. Высвобождаем ресурсы компьютера.

Алгоритм расчета координат вершин (шаг 6) для наглядности приведен на рис. 2. Задание других параметров многоугольника конкурентоспособности (цвет линий, шрифт легенды и др.) происходит до выполнения основного алгоритма и не представляет большого интереса с точки зрения разработки, поскольку они задаются стандартными средствами и настраиваются по желанию пользователя (финансового

аналитика, руководителя компании). Использование многоугольника конкурентоспособности удобно для наглядной интерпретации результата, поэтому, хотя мы и не оговариваем ограничение на число n (количество ключевых свойств) и k (количество компаний для сравнения), при выборе этих значений следует руководствоваться здравым смыслом.

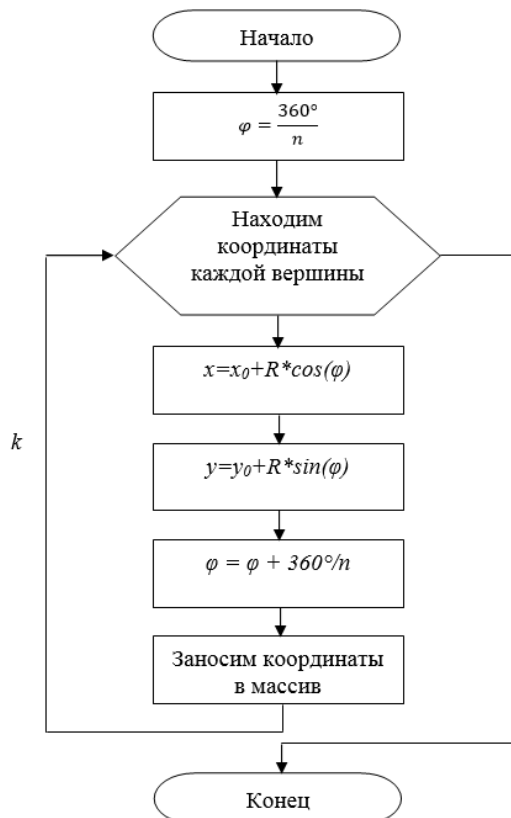


Рис. 2. Алгоритм расчета координат вершин многоугольника

Приведенный основной алгоритм может быть реализован не только средствами языка PHP, но и средствами других языков разработки веб-приложений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера используем данные об оценках конкурентоспособности по следующим ключевым свойствам, которые выделены в качестве преимуществ в целлюлозно-бумажной отрасли:

- 1) территориальное расположение;
- 2) собственный автопарк, хорошая логистика;
- 3) достаточность производственных мощностей;
- 4) высокое качество продукции, подтвержденное обязательной и добровольной сертификацией;
- 5) собственная лаборатория контроля качества на производстве;
- 6) внедрение новых разработок в рамках выпуска гофроизделий;
- 7) высокотехнологичное оборудование производства;
- 8) эффективное использование энергоресурсов;
- 9) налаженные каналы сбыта;
- 10) расширение рынка сбыта (частота появления новых контрагентов);
- 11) расширение линейки выпускаемой продукции;

12) широкий спектр сопутствующих услуг при выполнении индивидуальных заказов;

13) политика поддержки высококвалифицированных кадров.

В таблице представлены оценки финансовых аналитиков по указанным ключевым свойствам конкурентоспособности в целлюлозно-бумажной промышленности семи условных предприятий по выпуску целлюлозно-картонных изделий.

Оценки выбранных ключевых свойств конкурентоспособности

№ п/п	Ключевое свойство	Конкурентные преимущества (по 10-балльной шкале)						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Территориальное расположение	9	8	4	4	8	3	3
2	Собственный автопарк, хорошая логистика	8	7	8	8	5	3	7
3	Достаточность производственных мощностей	7	9	5	7	4	9	10
4	Высокое качество продукции, подтвержденное обязательной и добровольной сертификацией	8	9	6	6	7	5	6
5	Собственная лаборатория контроля качества на производстве	10	7	8	4	8	8	4
6	Внедрение новых разработок в рамках выпуска гофроизделий	5	8	7	8	3	6	4
7	Высокотехнологичное оборудование производства	3	7	7	5	7	6	9
8	Эффективное использование энергоресурсов	4	7	7	7	8	9	9
9	Налаженные каналы сбыта	8	8	8	5	6	5	7
10	Расширение рынка сбыта (частота появления новых контрагентов)	5	7	7	8	5	5	5
11	Расширение линейки выпускаемой продукции	4	7	6	5	5	5	5
12	Широкий спектр сопутствующих услуг при выполнении индивидуальных заказов	9	8	7	6	7	7	8
13	Политика поддержки высококвалифицированных кадров	6	10	6	8	7	8	8

Из данных таблицы видно, что исходными параметрами для выполнения алгоритма будут $n = 13$ и $k = 7$. Результат работы алгоритма представлен на рис. 3. Приведенный алгоритм позволяет достигнуть высокой степени наглядности имеющихся сильных и слабых сторон и обеспечить возможность сравнительной оценки ключевых преимуществ компаний-конкурентов. Сопоставление полученных результатов становится отправной точкой для определения реальной конкурентоспособности компании и создает достаточные основания для совершенствования деятельности компании и усиления ее позиций на рынке.

Предполагается использование данного алгоритма в клиент-серверной архитектуре, в которой клиентами выступают браузеры, а сервером – веб-сервер. Клиенты по протоколу HTTP (HyperText Transfer Protocol – протокол передачи гипертекста) инициируют соединение и посылают запрос, а сервер ожидает соединения для получения запроса, производит необходимые действия и возвращает обратно по тому же протоколу сообщение с результатом [6]. Одним из преимуществ такого подхода является независимость клиентов от конкретной операционной системы пользователя, поэтому веб-приложения являются кроссплатформенными. Корректное

функционирование системы подтверждено тестированием в браузерах Opera (Linux SUSE 10.0), Kroneker (Linux Mandriva), Internet Explorer (MS Windows 7) и Mozilla Firefox (MS Windows 10).

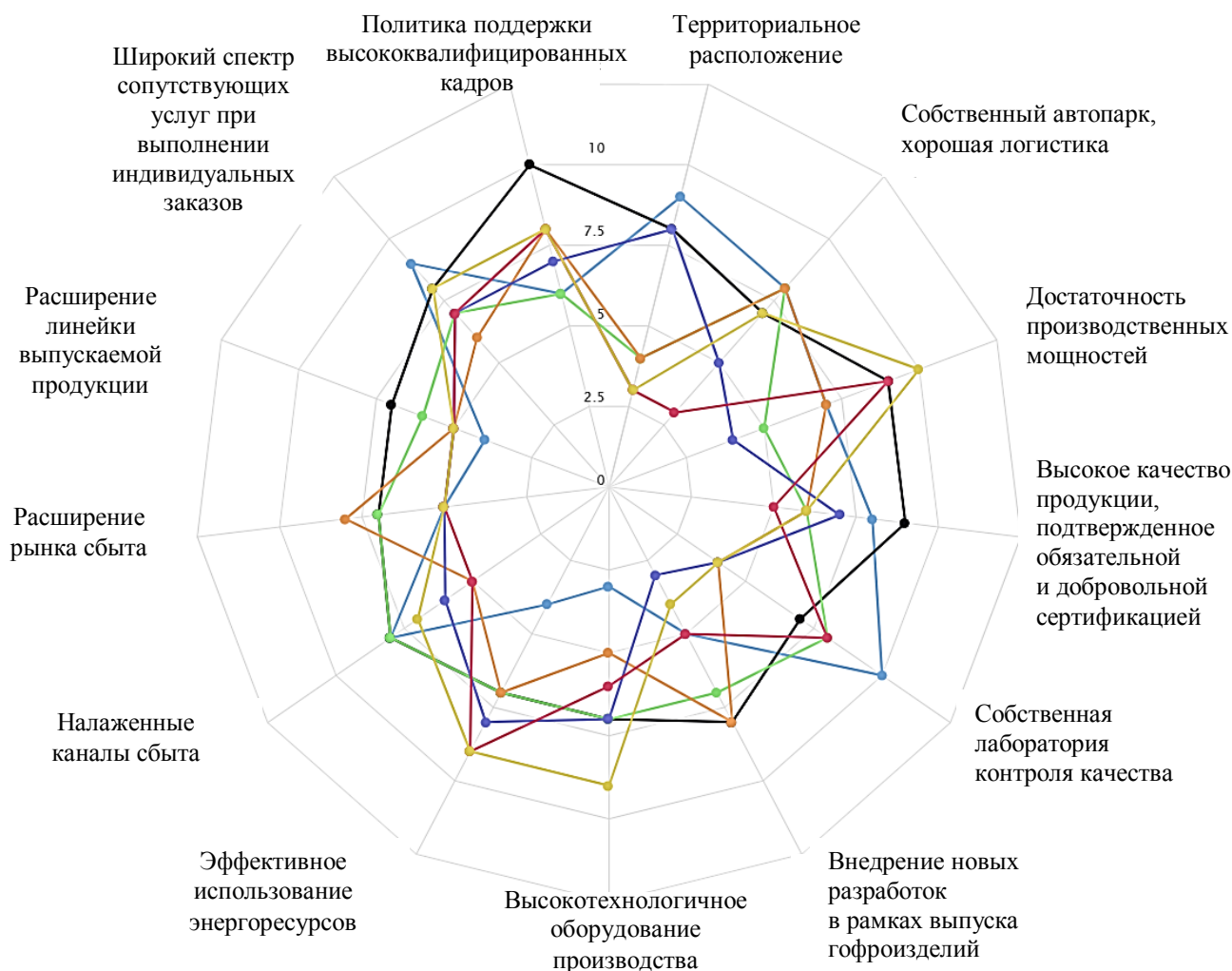


Рис. 3. Многоугольник конкурентоспособности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный алгоритм позволяет строить многоугольник конкурентоспособности с плавающей величиной ключевых свойств и компаний-конкурентов. Алгоритм является удобным инструментом финансового анализа для оценки конкурентоспособности компании в сравнении с ключевыми конкурентами. Приведенный алгоритм позволяет в режиме реального времени построить многоугольник конкурентоспособности на базе использования возможностей языка скриптов PHP; при изменении количества ключевых свойств и/или компаний-конкурентов легко меняет внешний вид.

Данный алгоритм может быть реализован средствами как PHP, так и других языков программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березин А.Е. Инновационно-инструментальный механизм повышения конкурентоспособности. М.: LAP Lambert Academic Publishing. 2014. 156 с.
2. Квасникова В.В. Конкурентоспособность товаров и организаций. М.: Инфра-М, Новое знание. 2016. 192 с.

3. Терехин В.И. Финансовое управление фирмой. М.: Экономика. 2018. 350 с.
4. Дунаев В.В. Сценарии для Web-сайта. PHP и JavaScript. СПб.: БХВ-Петербург. 2017. 576 с.
5. Локхарт Д. Современный PHP. Новые возможности и передовой опыт. М.: ДМК Пресс. 2016. 304 с.
6. Кузнецов М.В. PHP 5 на примерах. СПб.: БХВ-Петербург. 2016. 263 с.

CONSTRUCTION OF COMPETITIVE ABILITY POLYGON BY MEANS OF PHP SCRIPTS DEVELOPMENT

A.S. KUZMINA, N.A. MANSUROVA, Cand Sci

Tver State University, 33, Zheliabova str., 170100, Tver,
Russian Federation, e-mail: sasha5169619@gmail.com

In work the graphic method of an estimation of competitiveness - a polygon of competitiveness is considered. This method allows you to quickly analyze the competitiveness of the company in comparison with key competitors, based on a selected list of criteria and their expert evaluation. The result of this analysis will be the development of recommendations to improve the company's competitiveness in the market and the development of effective measures based on them. An algorithm that allows real-time (based on assessments of key properties of the company) to build a polygon of competitiveness and, evaluating the position of the analyzed company in comparison with competitors, to give general proposals to retain a competitive advantage is proposed. An automated information system for assessing the competitiveness of an organization has been developed, consisting of PHP scripts that, depending on database requests, form HTML pages that are accessible to financial analysts and managers of the organization. Cross-platform scripting language PHP allows you not to worry about the compatibility of the automated information system with the existing software and hardware complex in the organization.

Keywords: strategic management, strategic advantage retention methods, competitiveness polygon, automated information system, PHP, program algorithm, radar chart.

REFERENCES

1. Berezin A.Ye. Innovatsionno-instrumentalyy mekhanizm povysheniya konkurentosposobnosti [Innovative Instrumental Mechanism of Increasing of Competitive Ability]. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 156 p.
2. Kvasnikova V.V. Konkurentosposobnost' tovarov i organizatsiy [Competitive Ability of Goods and Organizations]. Moscow: Infra-M, Novoe Znaniye, 2016. 192 p.
3. Terekhin V.I. Finansovoye upravleniye firmoy [Financial Management of a Company]. Moscow: Ekonomika, 2018. 350 p.
4. Dunaev V.V. Stsenarii dlya Web-sayta. PHP i JavaScript [Web Site Scripts. PHP and JavaScript]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2017. 576 p.
5. Lockhart J. Sovremennyy PHP. Novyye vozmozhnosti i peredovoy opyt [Modern PHP. New Features and Good Practices]. Moscow: DМК Press, 2016. 304 p.
6. Kuznetsov M.V. PHP 5 na primerakh [PHP 5 via Examples]. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2016. 263 p.

ХРОНИКА

УДК 004.896(470.331)

КАФЕДРА Е.В. ЗОЛотова И НЕЛИДОВСКАЯ АСУТП

Г.Б. БРОНФЕЛЬД, канд. техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: stolem1985@gmail.com

© Бронфельд Г.Б., 2019

Рассмотрены этапы работы выпускника Калининского политехнического института кафедры академика Е.В. Золотова, начиная с создания Нелидовской автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) и разработки метода решения ряда нелинейных многокритериальных задач в варианте метода надувного шарика (МНШ). Кратко рассказано о ведущих преподавателях по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов (АХП)» и выпускном комплексном дипломном проекте. Описано создание Нелидовской АСУТП.

Ключевые слова: Е.В. Золотов, КПИ, АСУТП, Нелидово, управление, оптимизация, метод надувного шарика.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим историю некоторых первых научно-технических достижений одного из выпускников второго года выпуска (1972 г.) Калининского политехнического института по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов» (АХП), подготовленных кафедрой автоматизации производственных процессов (АПП) [1] под руководством академика Е.В. Золотова. К числу первых выпускников специальности АХП относятся профессора Б.В. Палюх и А.П. Виноградов.

Поскольку специальность АХП считалась тогда одной из самых сложных в институте, к поступающим предъявлялись высокие требования. В результате был большой конкурс (1967 г.). На первом курсе лекции по начертательной геометрии читал уже тогда легендарный профессор А.Д. Посвянский, по физике – доцент В.Г. Клиггер. Запомнились преподаватели философии – доцент П.А. Беренштейн, электротехники – доцент М.И. Снаксарев, теории автоматического управления – профессор Н.М. Караваева, автоматизации производственных процессов – профессор А.А. Николаев, профессор Г.А. Дмитриев, доцент Г.В. Соловьев. Для нас, студентов, жизнь особенно забурлила с появлением в институте в 1969 г. профессора Евгения Васильевича Золотова (с 1970 г. – член-корреспондент АН СССР, с 1987 г. – академик АН СССР) и организацией кафедры автоматизации производственных процессов (АПП). Заместителем заведующего кафедрой стал проф. Анатолий Алексеевич Николаев, с которым меня в дальнейшем связали семь лет сотрудничества. А.А. Николаев стал первым научным руководителем по моей кандидатской диссертации, был для меня «отцом в науке».



Е.В. Золотов, академик, д.т.н.,
зав. кафедрой АПП



А.А. Николаев, профессор, к.т.н.,
зам. зав. кафедрой АПП

В этот период кафедра заключила договор с Нелидовским заводом пластмасс на создание автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) для производства листов из термопластов. Другим основным исполнителем этой работы был Редкинский филиал опытного конструкторского бюро автоматики (ОКБА). Руководил работами по созданию АСУТП на кафедре А.А. Николаев. Одним из участников работ был его аспирант – В.Н. Кузнецов (будущий д.т.н., профессор). Для исследования объекта управления (ОУ) кафедрой проводились эксперименты на заводе, к обработке результатов которых были привлечены студенты, обучающиеся по специальности АХП, в том числе я. Естественно, я понятия не имел, что в будущем Нелидовский завод пластмасс окажется местом моей работы и что именно обработка результатов экспериментов поможет мне более глубоко понять нелинейные свойства поведения ОУ.

Заканчивали институт комплексным дипломным проектом пяти дипломников под руководством А.А. Николаева на темы, связанные с созданием Нелидовской АСУТП. Весной 1972 г. мы были направлены на Нелидовский завод пластмасс на преддипломную практику собирать исходный материал для дипломной работы. Работали в три смены (посменно) на рабочих местах, жили в городской гостинице. Так случилось, что мои четверо сокурсников сделали все раньше и уехали в Калинин, а меня привлекли в период практики для участия в турнире в составе институтской сборной команды по шахматам. Поэтому, когда я вернулся в Нелидово, то остался один. Когда все сделал, тоже собрался уезжать в Калинин и уже купил билет на утренний автобус. Вдруг вечером раздается стук в дверь моего номера гостиницы, а на пороге стоит руководитель нашей практики от института – В.Н. Кузнецов. Оказалось, на завод доставлено много ящиков с составными частями компьютера 1010Б венгерского производства, который должен был управлять производством в составе АСУТП. И уже приехала большая группа венгерских специалистов для сборки и наладки компьютера. На заводе не было ни одного специалиста, который хоть что-то понимал в компьютерах и в его использовании для автоматизации управления производством. Тогда вспомнили о студентах-дипломниках на заводе соответствующей специализации, но оставался только я один. В.Н. Кузнецов все согласовал с А.А. Николаевым и пришел ко мне с предложением переехать из Калинина на работу в Нелидово и заняться созданием и подготовкой к эксплуатации новейшей АСУТП на

основе новейшего тогда в СССР компьютера. Мне такая перспектива понравилась, хотя она и была абсолютно неожиданной. Рано утром сдал автобусный билет и уже в 8 часов был в кабинете директора завода Н.И. Майкова. Он поговорил со мной минут пятнадцать и предложил стать начальником ЭВМ по окончании института. Я согласился и пошел в цех, где уже была группа венгерских специалистов-наладчиков, и я, уже как представитель завода, принял участие во вскрытии ящиков и начале сборки ЭВМ. После недели работы вернулся в Калинин доучиваться и защищать диплом. По итогам второго выпуска специальности АХП зав. кафедрой АПП чл.-кор. АН СССР Е.В. Золотов написал небольшую заметку в институтской газете «Политехник» [2]. Там был упомянут и наш комплексный дипломный проект.

Специальность АПП — выпуск второй

(Окончание. Начало на 1 стр.) развивающихся науки и техники.

Основным сдерживающим фактором в осуществлении этой задачи является слабая оснащенность института современными приборами, особенно электронно-вычислительными машинами. В этом году на кафедре должен вступить в строй аналого-цифровой комплекс, что позволит резко улучшить как учебный процесс, так и ве-

дение научно-исследовательских работ. Однако этого еще далеко недостаточно для подготовки специалистов будущего.

Назрела необходимость создать мощный межвузовский вычислительный центр, включающий в себя межвузовские кафедры, учебные и научные лаборатории и оснащенный современным оборудованием. Создание такого центра позволит поднять на новый уровень подготовку специалистов всеми

учебными заведениями Калинина.

На кафедре АПП была проведена большая научная и организаторская работа по созданию методов и принципов рационального внедрения ЭВМ в вузы страны. Результаты этой работы рассмотрены и одобрены Коллегией Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР. Принято решение о создании экспериментального межвузовского ВЦ при Калининском политехническом институте.

В этом году в научно-исследовательские и проектные институты, на предприятия придут еще 46 выпускников КПИ, специалистов по автоматизации производственных процессов. Перед ними открывается большая и широкая дорога, на которой они сделали пока первый самостоятельный шаг.

Больших творческих удач вам, наши молодые коллеги, большого человеческого счастья. Доброго вам пути, дорогие друзья!

Е. В. ЗОЛОТОВ, заведующий кафедрой АПП, член-корреспондент Академии Наук СССР.

НА СНИМКЕ: «Нелидовцы», так называли их друзья, так называют они себя сами, авторы комплексного проекта для Нелидова.



Фрагмент статьи Е.В. Золотова в газете «Политехник», КПИ, 1972 г.
На фото: студенты-дипломники (справа налево) – Н.Е. Демидов, А.В. Клиnger, С.И. Торбин, А.В. Ильичев, Г.Б. Бронфельд

СОЗДАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕЛИДОВСКОЙ АСУТП

Нелидовская АСУТП производством листов из термопластов на Нелидовском заводе пластмасс была окончательно внедрена в 1974 г. Производство обеспечивало листом из полистирола около 70 % выпуска холодильников в СССР и АВС-пластиком производство легковых автомобилей «Жигули» в Тольятти [3]. Она

оказалась первой АСУТП в подотрасли переработки пластмасс на основе управляющей ЭВМ третьего поколения 1010Б. Работа выполнялась в три смены в режиме непосредственного цифрового управления (НЦУ) экструзионными агрегатами АЛ-1500 от ЭВМ. В режиме НЦУ контролировалось 400 параметров, управлялось 384 (в основном температурные режимы). Для этого типа технологических процессов управление температурой позволяло корректировать толщину листа. Постепенно заводскими специалистами управление контурами по температуре было оригинальным образом модифицировано [4] в связи с выявленными нелинейными свойствами многосвязного ОУ. АСУТП обеспечивала более стабильные режимы управления по сравнению с локальными аналоговыми регуляторами, что повышало качество листа.

Поскольку вначале для круглосуточного управления производством использовалась только одна управляющая ЭВМ, для обеспечения надежности работы АСУТП было изобретено и использовано специальное устройство обнаружения отказов (УОО, позже в мире стало известно под названием «сторожевой таймер» (*watchdog timer*)) [5–7]. В случае остановки управляющей ЭВМ (например, ночью) сразу же срабатывало УОО и включался мощный звонок, на который реагировал оператор ЭВМ. Он перезапускал ЭВМ или, в случае серьезной неисправности, по громкой связи оповещал рабочих агрегатов о переходе на режим работы от локальных аналоговых регуляторов.

В ноябре 1974 г. Нелидовская АСУТП была представлена на международную выставку ВДНХ «АСУ-технология-74», которая была посвящена юбилею образования химической промышленности СССР. Высокие эксплуатационные свойства системы, хорошая научно-техническая проработка основных подсистем, новизна предложенных решений поставили АСУТП в разряд лучших. По результатам конкурса система была удостоена золотой медали.

Сложная ситуация возникла также с проблемой планирования производства с помощью ЭВМ. Вначале эта задача казалась простой, ведь технологи цеха ее решали регулярно даже на калькуляторах. Однако первые разработки программы на ЭВМ, выполненные представителями РФ ОКБА (этим занимались выпускники МФТИ), привели только к разработке приближенного метода [8]. Для планирования производства мы вынуждены были сами разрабатывать оригинальный метод векторной многокритериальной оптимизации с нелинейными целевыми функциями, который позже был назван методом «надувного шарика» (МНШ) [9–11]. Он позволял находить лучшие решения. Найти нужный алгоритм решения задачи помог профессор А.А. Николаев. Он же предложил использовать «метод максимального элемента» (ММЭ) профессора Е.А Берзина [12]. Весной 1975 года Анатолий Алексеевич на научно-технической конференции в КПИ выступил с объединенным докладом и изложил основы нового решения по планированию производства на Нелидовском заводе пластмасс. Дела с АСУТП на заводе постепенно налаживались [13]. За первый год работы Нелидовской АСУТП (1975 г.) были полностью отлажены основные алгоритмы управления работой АСУТП и обеспечено ее надежное круглосуточное функционирование. Было отработано взаимодействие центра АСУТП с рабочими цеха у агрегатов АЛ-1500 в различных ситуациях. Около 10 % продукции основного производства завода выпускалось с помощью АСУТП. Сокращение времени подготовки к запуску агрегатов после переналадок и ремонтов, обеспечение более стабильных режимов регулирования по температуре привело к повышению производительности работы агрегата АЛ-1500 в среднем на 5 %.

Потом для повышения надежности Нелидовской АСУТП была подключена вторая управляющая ЭВМ в качестве резерва. Нелидовская АСУТП до серьезной модернизации функционировала около 20 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 1966 году в Калининском политехническом институте (КПИ) открыли новую специальность – АХП. В 1970 г. будущий академик АН СССР Е.В. Золотов организовал кафедру АПП, которая стала выпускающей кафедрой специальности АХП. КПИ заключил договор о разработке Нелидовской АСУТП, которая с 1974 года функционировала круглосуточно, управляя агрегатами АЛ-1500 в режиме НЦУ от управляющей ЭВМ. Это была первая в подотрасли пластмасс АСУТП в СССР и успех кафедры прозвучал на всю страну. Основным ядром работников АСУТП на Нелидовском заводе пластмасс стали выпускники кафедры АПП. В 1974 г. на крупной юбилейной выставке химической промышленности СССР в Москве Нелидовская АСУТП получила золотую медаль ВДНХ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калининскому политехническому институту – 50 лет (сборник очерков). Калинин: КПИ, 1972. 213 с.
2. Золотов Е.В. Специальность АПП-выпуск второй // *Политехник* от 29.06.1972, № 34. Калинин. С. 1–2.
3. На Нелидовском заводе пластмасс... // *Калининская правда* от 20.03.1973, № 66, Калинин. С. 1.
4. Бронфельд Г.Б., Михайлов А.В. Контроль и управление технологическими параметрами в режиме НЦУ в АСУ ТП «Нелидово» // *Качество пластмасс и надежность изготавливаемых из них изделий*. Ленинград: ЛДНТП. 1976. С. 39–44.
5. Авт. свид. СССР на изобретение 585478. *Устройство для контроля релейных объектов* / Бронфельд Г.Б., Иванов И.А., Мухин Н.Л.; заявл. 18.06.1975; опубл. 27.12.77, Бюл. № 47.
6. Бронфельд Г.Б. Обнаружение отказов в АСУТП // *Приборы и системы управления*. 1984. № 8. С. 16–18.
7. Santic J.S. Watchdog Timer Techniques // *Embedded Systems Programming*. April 1995. P. 58
8. Алешин А.Я., Самсонов В.Г., Фаянс А.М., Федорук В.Н., Цельковский В.П. Подход к созданию АСУ ТП производства листа из полистирола // *Приборы и системы управления*. 1975. № 2. С. 1–2.
9. Бронфельд Г.Б. Алгоритм решения задачи оптимального распределения плана производства // *Автоматизация и механизация управления производством*. Горький, НИИУ автопром, 1977. Вып. 2. С. 75–83.
10. Бронфельд Г.Б. Метод «надувного шарика» для решения задач планирования производства // *Сб. докл. Первой Всероссийской научно-практической конференции по вопросам решения оптимизационных задач в промышленности ОПТИМ-2001*. СПб.: ЦНИИ ТС, 2001. С. 167–170.
11. Бронфельд Г.Б. Основы искусственного интеллекта. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 253 с.
12. Берзин Е.А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / ред. Е.В. Золотов. М.: Советское радио, 1974. 304 с.
13. В условиях АСУТП // *Знамя коммунизма* от 27.05.1976, № 84. С. 2.

DEPARTMENT OF E.V. ZOLOTOV'S AND NELIDOVO'S APCS

G.B. BRONFELD, Cand Sci

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev 24, Minin St.,
Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation, e-mail: stolem1985@gmail.com

Considered the phased development of the graduate work of the Kalinin Polytechnic Institute, Department of Academician E.V. Zolotov, starting with the Nelidov automated process control system (APCS) and the development of a method for solving a number of non-linear multi-criteria tasks in a variant of the inflatable ball method (MNS). Briefly described the leading teachers for the specialty automation and complex mechanization of chemical-technological processes (AHP) and the graduation complex diploma project. The creation of Nelidov automated process control system is described.

Keywords: E.V. Zolotov, KPI, ASUTP, Nelidovo, control, optimization.

REFERENCES

1. Kalininskomu politekhnicheskomu institutu – 50 let (sbornik ocherkov). [Kalinin Polytechnic Institute-50 years (collection of essays)]. Kalinin: KPI, 1972. 213 p.
2. Zolotov E.B. Specialty APP – the release of the second. *Politekhnik* from 29.06.1972. No 34. Kalinin, pp.1–2. (In Russian).
3. In Nelidovo Plastics Plant. *Kalininskaya pravda* from 20.03.1973. No 66, Kalinin, p. 1. (In Russian).
4. Bronfeld G.B., Mikhailov A.V. Monitoring and Control of process parameters in mode DDC in the APCS "Nelidovo". *The quality of the plastics and the reliability of them manufactured goods*, Leningrad: LDNTP, 1976, pp. 39–44. (In Russian).
5. Aut. cert. of the USSR for the invention 585478. *Ustrojstvo dlya kontrolya relejnyh obektov*. Bronfeld G.B. et al. Appl. 18.06.1975. Publ. 27.12.77. Bul. No 47.
6. Bronfeld G.B. The detection of failures in the APCS // *Pribory i sistemy upravleniya*, 1984, No 8, pp.16–18. (In Russian).
7. Santic J.S. Watchdog Timer Techniques // *Embedded Systems Programming*, April 1995. p. 58.
8. Aleshin A.Ya., Samsonov, V.G., Fayans A.M., Fedoruk V.N., Zelikowsky V.P. Approach to creation of APCS of polystyrene sheet production // *Pribory i sistemy upravleniya*. 1975. No 2, pp. 1–2. (In Russian).
9. Bronfeld G.B. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of the production plan. Gorky, SRIU car industry, 1977, V.2, pp.75–83. (In Russian).
10. Bronfeld G.B. The "inflatable ball" method for solving planning problems productions. *OPTIM-2001*, St. Petersburg: CSRI ST, 2001, pp.167–170. (In Russian).
11. Bronfeld G.B. *Osnovy iskusstvennogo intellekta* [The Basics of artificial intelligence]. N. Novgorod: NSTU n.a. R.E. Alekseev, 2014. 253 p.
12. Berzin E.A. *Optimal'noe raspredelenie resursov i ehlementy sinteza sistem* [Optimal resource allocation and system synthesis elements] / edited by E.V. Zolotov. Moscow: Soviet radio, 1974. 304 p.
13. In condition of the APCS. *Znamya kommunizma* from 27.05.1976. No 84, p. 2. (In Russian).

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 3 (3), 2019**

Редактор М.Б. Юдина
Корректор С.В. Борисов
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22